



TITTONELL, P.  
El Carbono Orgánico

2004

60193

# El carbono orgánico en los suelos de la región central de Argentina

Derivando indicadores de sustentabilidad a partir de su evolución y  
estado de equilibrio actual

60193

Tesis de Maestría

Pablo Tittonell

Directora

Ing. MSc. Estela Bricchi

Escuela de Posgraduación

Facultad de Agronomía y Veterinaria

Universidad Nacional de Río Cuarto

Septiembre 2004

60193

MFN:
Clasif.:
E-364

**Direcciones de contacto:**

- Pablo Tittonell    Cátedra de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Ruta Provincial 4, Km. 2 (1836) Llavallol, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Tel/Fax: 0054 11 4282 6263  
Plant Production Systems Group, Department of Plant Sciences, Wageningen University. P.O. Box 230, 6700 AK Wageningen, The Netherlands.  
E-mail: [ptittonell@yahoo.com.ar](mailto:ptittonell@yahoo.com.ar)
- Estela Bricchi    Departamento de Ecología Agrícola. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta 36 km 601, Río Cuarto (5800), Córdoba, Argentina  
E-mail: [ebricchi@ayv.unrc.edu.ar](mailto:ebricchi@ayv.unrc.edu.ar)

# Tabla de contenidos

	Página
Prefacio	5
Agradecimientos	6
Resumen	7
1 El carbono orgánico como indicador de sustentabilidad	9
1.1 Introducción	9
1.2 Objetivos	10
1.3 Evaluando la sustentabilidad de los sistemas productivos	10
1.4 Calidad y salud del suelo: el papel de la fracción orgánica	12
1.5 Modelización de la dinámica de la fracción orgánica edáfica	15
1.6 Hipótesis de trabajo	18
1.7 Enfoque metodológico conceptual	19
2 El modelo Century Agroecosystems	21
2.1 Estructura, conceptos y requerimientos de información	21
2.2 El sub-modelo materia orgánica	22
2.3 Balances hídricos, lixiviación y régimen térmico del suelo	26
2.4 Sub-modelos de producción de biomasa	27
2.4.1 Producción del pastizal y pastoreo	27
2.4.2 Bosques y sabanas	30
2.5 El sub-modelo N	33
3 La región de trabajo	35
3.1 Selección de las situaciones a estudiar	35
3.2 Ubicación geográfica y estratificación sub-regional	38
3.3 Gradientes geológicos y geomorfológicos	40
3.4 Gradientes climáticos	43
3.5 Formaciones vegetales originales y actuales	45
3.6 Tipos de suelo desarrollados en la región	47
3.7 El patrón de uso de las tierras	49
4 Origen de la información y metodología	53
4.1 Fuentes de información	53
4.1.1 Información climática	53
4.1.2 Variables edáficas	54
4.1.3 Tipos de vegetación	56
4.1.4 Historia de uso de la tierra	57
4.2 Caracterización de los sitios	57
4.2.1 Atributos del paisaje	57
4.2.2 Clima y suelos	59
4.3 Diseño de las simulaciones	59
4.3.1 Definición de los agroecosistemas	59
4.3.2 Definición de situaciones de uso de la tierra (ecológicas/productivas)	60
4.3.3 Formulación de escenarios	62
4.4 Análisis y procesamiento de información y resultados	63
4.4.1 Factores de control sobre los niveles de C y propiedades derivadas	63
4.4.2 Evaluación de los resultados de las simulaciones	65
4.4.3 Análisis de sensibilidad	65

5 Factores que controlan los niveles de materia orgánica en los suelos de la región	67
5.1 Variabilidad regional de la fracción orgánica edáfica	67
5.1.1 Textura	68
5.1.2 Clima	71
5.1.3 Vegetación	81
5.1.4 Desarrollo del perfil de suelo	86
5.1.5 Modelos empíricos para la variación regional del C	87
5.2 Casos particulares: Intrazonalidad y ambientes serranos	91
5.2.1 La fracción orgánica en condiciones de anegamiento	91
5.2.2 Variabilidad del C orgánico en los suelos de las sierras	95
5.3 Integración en el contexto paisaje - suelo	97
5.6 Observaciones finales	103
6 La fracción orgánica, su composición y su relación con propiedades que definen calidad y salud de los suelos de la región	105
6.1 Materia orgánica y propiedades relacionadas	105
6.1.1 Capacidad de intercambio catiónico	105
6.1.2 Retención hídrica	109
6.1.3 Densidad aparente y porosidad total	118
6.2 Aspectos cualitativos de la fracción orgánica	122
6.3 Observaciones finales	127
7 Sensibilidad del modelo CENTURY a las condiciones regionales y su aplicación al análisis de escenarios futuros	129
7.1 Evaluando la sensibilidad del modelo a las condiciones regionales	129
7.1.1 Grado de ajuste general para la condición "natural"	130
7.1.2 Aspectos mecanísticos: simulación de procesos clave	137
7.1.3 Análisis de sensibilidad	146
7.2 Aplicando CENTURY para el análisis de escenarios futuros	152
7.3 Observaciones finales	153
8 Discusión general y conclusiones	155
8.1 El carbono orgánico en los suelos del centro de Argentina	155
8.1.1 Protección fisico-química del C en el suelo	155
8.1.2 Determinación ecológica de los niveles de C en la región	157
8.1.3 Conceptualización ecológica	159
8.2 Calidad y salud de los suelos: determinación, evaluación y monitoreo	161
8.2.1 La materia orgánica y la fertilidad del suelo	161
8.2.2 Variabilidad de la fracción orgánica: implicancias metodológicas	163
8.2.3 Conceptualización metodológica	165
8.3 Conclusiones y recomendaciones	167
Referencias bibliográficas	171
Imágenes	183
Apéndices	
I Parámetros y funciones del modelo	187
II Aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos de la región	194
III Información climática	197
IV Detalle de las formaciones vegetales de cada sub-región	200
V Caracterización de los sitios de simulación	204
VI Desarrollo y validación de los modelos empíricos	215
VII Estudio de caso para la relación suelo-paisaje	231
VIII Composición de la fracción orgánica	233
IX Análisis de sensibilidad	234
X Ejemplo de aplicación regional	238
Summary	239



## Prefacio

Durante el desarrollo de esta tesis he empleado a menudo los conceptos de resistencia y resiliencia, basándome en la definición más ampliamente adoptada, es decir, la proveniente de aquel emblemático primer número de *Conservation Ecology* en el que Ludwig y otros<sup>1</sup> dieron a conocer su influyente opinión sobre la sustentabilidad y estabilidad de los agroecosistemas. Sin embargo, quisiera compartir en algunas líneas la conceptualización de estos términos que he adoptado en forma explícita y que me fue revelada al observar por largas horas el desorden sobre mi escritorio. Un ejemplo sencillo y, presumo, ilustrativo de la posible ambigüedad de estas definiciones.

En pocas palabras, la resistencia de un sistema se relaciona con la magnitud del disturbio que debe aplicarse al mismo para alejarlo de su situación - ¿de equilibrio? - inicial, mientras que la resiliencia representa su capacidad para restablecer tal equilibrio (¿cuando se interviene en tal sentido?). Supongamos que nuestro sistema está representado por una hoja de papel en blanco, lisa. Si tomamos la hoja y la arrugamos, haciendo un bollo de papel, podemos pensar que nuestro sistema ha perdido sus condiciones originales, ha sido transformado. Restablecer su condición inicial requiere - indefectiblemente - de nuestra intervención, ya sea estirándolo con las manos, planchándolo con vapor o en última instancia reconstituyéndolo por completo, reciclándolo. Cada una de estas intervenciones varía en intensidad y en el tipo de tecnología requerido en cada caso. Sin embargo, es muy probable que por ninguno de estos medios (u otros) podamos recuperar la superficie lisa original, aunque nos acerquemos en más o en menos. ¿Qué podemos decir acerca de la resistencia y resiliencia de nuestro sistema? Aparentemente, y de acuerdo a los supuestos asumidos, el mismo es poco resistente y poco resiliente (¿?).

¿Qué ocurría si su condición actual, su estado de 'bollo', fuera ahora considerada como una nueva situación inicial? Al tratar de arrugarlo, el mismo parecería disturbarse menos, y su regreso a la condición original sería aparentemente más fácil: el sistema aparecería como más resistente y más resiliente. ¿Qué ocurría si, en lugar de utilizar la uniformidad superficial como indicador de estabilidad se utilizara la uniformidad de su color blanco? Al arrugar el papel no se han producido cambios de color, por cuanto podríamos asumir que el mismo no ha sido disturbado: el indicador utilizado para evaluar la estabilidad del sistema tal vez no haya sido el adecuado. En consecuencia, las definiciones de resistencia y resiliencia requieren precisar el tipo de disturbio que afecta a la estabilidad original del sistema, cómo queda ésta definida, qué tipo de intervención(es) se debe(n) aplicar para restablecerla, y cuáles son los indicadores adecuados para la evaluación y monitoreo de estos procesos. Por último, es posible que el cambio de estado (i.e. de liso a arrugado) no afecte a la funcionalidad del sistema (e.g. cuando el papel sea utilizado para encender una hoguera). En tal caso, será necesario revisar los objetivos del análisis. Espero que éste no sea el caso aquí, y que ésta tesis resulte en un aporte concreto al esfuerzo multidisciplinario de diseñar, implementar y evaluar agroecosistemas sustentables.

---

<sup>1</sup> Ludwig, D., Walker, B., Holling, C.S. 1997. Sustainability, stability and resilience. *Conservation Ecology* 1 (1): 7.

## Agradecimientos

Desde luego, éste trabajo no habría sido posible sin el apoyo incondicional de la Ing. MSc. Estela Bricchi, en términos tanto prácticos como conceptuales, durante todo el proceso que llevó a su conclusión – agradezco a la vez su paciencia y flexibilidad. Asimismo, el Ing. MSc. José Cisneros estuvo codo a codo durante momentos clave del mismo, brindando su influyente perspectiva y su colaboración. El Ing. Juan Carlos Ceriani me ha guiado desde mis primeros pasos en la cátedra de Edafología, iluminando nuevos caminos y formas de pensar la agronomía y la ciencia. Pero además, éste trabajo debería llevar el nombre de un co-autor en su portada: el Ing. Javier De Grazia, quien pensó, diseñó, ejecutó y analizó el contenido de esta tesis junto a mí (gracias, amigo). Y en las noches frías de Wageningen o durante las tardes calurosas de Santiago, Simone fue una testigo beligerante de la redacción de esta tesis – ¡agradezco su estoicismo!

Por haber hecho materialmente posible éste y otros proyectos, me encuentro perpetuamente en deudas con la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Sin embargo, buena parte de los recursos materiales estuvo disponible merced a la colaboración del área Suelos de la Universidad Nacional de Río Cuarto. Quisiera también expresar mi agradecimiento al Ing. César Nuñez por su aporte de conocimientos en relación con las formaciones vegetales y la flora nativa; a la Ing. Stella Bogino por abrimos muchas puertas en su región y por sus aportes sobre los aspectos funcionales y florísticos del Caldenal puntano; al Ing. Peña Zubiato por su esclarecimiento en relación con los procesos geomorfológicos; al Ing. Mauro Uberto por compartir sus conocimientos y su información sobre el uso del instrumental de campo; al Ing. Luís Veldi por compartir los datos de sus experimentos; a los Ing. Ileana Paladino y Pablo Veronés por su apoyo durante el muestreo de suelos y su análisis en el laboratorio. Además, agradezco profundamente a los Sres. Bogino, Rodrigo, Bonnivardo y a todos aquellos que nos permitieron realizar relevamientos de suelos y vegetación en sus establecimientos.

## Resumen<sup>2</sup>

Los agrosistemas sustentables (agroecosistemas) deben cumplir sus múltiples funciones productivas y ambientales, armonizando sus dimensiones biofísica y socioeconómica – eficiencia, diversidad, conservación – en el corto y en el largo plazo. Los agrosistemas actuales en vastas regiones de Argentina muestran claros signos de simplificación y degradación que los hace insustentables. El (re-)diseño de agroecosistemas requiere de herramientas metodológicas para evaluación y monitoreo de su sustentabilidad. La calidad y salud del suelo constituyen pilares básicos de dicha sustentabilidad en términos biofísicos y como fuente de indicadores sensibles a cambios en diferentes escalas espacio-temporales. La dinámica de la fracción orgánica edáfica integra diferentes aspectos funcionales que hacen a la calidad y salud del suelo, y es por ello que su simulación mediante el uso de modelos constituye una herramienta de gran utilidad para el análisis de escenarios posibles en el uso sustentable de las tierras. Tal enfoque metodológico requiere de estudios regionales de referencia sobre (i) los factores que controlan la dinámica orgánica, (ii) su relación con propiedades y funciones del suelo y (iii) la sensibilidad de un modelo de simulación capaz de representar el efecto de los factores ambientales y de manejo sobre el balance de C en el sistema. A fin de contar con estos valores y funciones de referencia para la región central de Argentina – caracterizada por amplios gradientes ambientales y agroproductivos – se realizó un estudio combinando el uso de modelos empíricos (descriptivos) y mecanísticos (explicativos) en el marco de una definición utilitaria de calidad y salud de los suelos, y analizando (i) la importancia relativa de y (ii) la sensibilidad del modelo CENTURY a los factores geocológicos (regionales) y agroecológicos (sistémicos). Los resultados muestran que los niveles de materia orgánica aparecen regulados por factores de variación *zonal* (textura, clima, vegetación, uso de la tierra) cuya importancia relativa varía para las diferentes sub-regiones identificadas: llanuras bien y mal drenadas, llanuras medanosas, sectores serranos y pedemontanos. Factores de variación intrazonal (e.g. drenaje) pueden tener también un efecto importante, y aún mayor al de los zonales. La textura aparece como el factor de mayor determinación debido a los múltiples mecanismos de estabilización del C en el suelo, y que deben ser tenidos en cuenta al establecer valores de referencia para evaluación de calidad y salud del suelo. Esto permitió hallar modelos empíricos capaces de estimar propiedades físicas (retención hídrica) y químicas (capacidad de intercambio) de referencia para los suelos de la región a partir de datos simples, como la textura y el contenido de materia orgánica. Sin embargo, se observaron importantes diferencias cualitativas para el C del suelo (fracciones), que son fuertemente afectadas por el manejo y que deben ser homologadas con aquellas que se asumen en modelización dinámica (activa-estable-pasiva), a fin de comprender el significado de las simulaciones. El modelo CENTURY fue sensible a los gradientes de uso y manejo regionales, siendo satisfactoriamente empleado para balances de C de largo plazo (dinámica del CO<sub>2</sub>), o para representar la curva de producción de biomasa (fijación fotosintética) anual. Un ejemplo de aplicación regional es presentado para ilustrar los posibles usos del modelo en el análisis de escenarios futuros, en el largo plazo.

---

<sup>2</sup> Palabras clave alternativas para indexación: agroecosistemas sustentables, modelos de materia orgánica, calidad y salud de suelos, CENTURY, Córdoba, San Luis

# 1. El carbono orgánico como indicador de sustentabilidad

## 1.1 Introducción

El concepto de sustentabilidad, más allá de ciertas discrepancias entre autores, es concebido en forma unánime como el mantenimiento de ciertas condiciones favorables de los sistemas productivos en un nivel aceptable a través de un horizonte temporal determinado (Eswaran, 1994; Ludwig *et al.*, 1997; Bosshard, 2000), y concierne en general a los aspectos ambientales, sociales, económicos y productivos del uso de las tierras (Smyth & Dumanski, 1995; Altieri, 1999). La calidad del suelo es un componente clave de la sustentabilidad (e.g. Warkentin, 1995; Doran *et al.*, 1996; FAO, 1997; Arshad & Martin, 2002), por lo que su evolución en el tiempo resulta un indicador primario del manejo sustentable de los agrosistemas (Seybold *et al.*, 1999; Doran, 2001).

La materia orgánica edáfica, en lo que respecta tanto a su contenido como a su composición, constituye uno de los indicadores más conspicuos de los factores calidad y salud del sistema suelo (Rovira, 1993; Bouma, 1997; Nortcliff, 2002). Su importancia reside en que se trata de una componente central para el ciclo de los nutrientes, influye en gran medida sobre las relaciones hídricas y sobre la erodabilidad potencial, y constituye un factor clave en relación con la estabilidad estructural de los suelos (Tisdale & Oades, 1982; Yang, 1996; van Keulen, 2001). Mas allá de sus efectos favorables sobre la productividad y calidad del suelo (e.g. Stevenson, 1986; Vanlauwe *et al.*, 2001; Janssen, 2002), se destaca su potencial contribución en el secuestro de carbono a partir del CO<sub>2</sub> atmosférico, actualmente en incremento (Thornley *et al.*, 1991; Feller & Beare, 1997).

La modelización y simulación de la dinámica del C orgánico – como variable integral e indicadora de la sustentabilidad de los agroecosistemas a través de su componente edáfica – bajo condiciones naturales y de uso de la tierra ha demostrado amplia utilidad en investigación agronómica aplicada (Janssen, 2002). Los modelos de simulación pueden ser definidos como aproximaciones teóricas a los procesos dinámicos naturales que ocurren en el ecosistema. La importancia relativa de los diferentes componentes del sistema que afectan al funcionamiento de tales procesos puede ser así ponderada (Leffelaar, 1993). Los modelos de simulación de la dinámica orgánica, validados y *parametrizados* bajo condiciones locales, constituyen herramientas de gran valor para el monitoreo de la sustentabilidad de los agrosistemas actuales, para el estudio de los factores biofísicos y antrópicos que determinan la cantidad y composición de la materia orgánica a través del tiempo, y para el planteo de escenarios alternativos en el diseño de sistemas productivos sustentables (van Keulen, 2001).

Complementariamente, la definición de indicadores de calidad y salud del suelo requiere de la determinación de valores de referencia para la función suelo seleccionada a tal respecto (Lal, 1997). Tales (rangos de) valores de referencia dependen de la interacción de los múltiples factores que afectan a las propiedades seleccionadas como indicadores, e.g. el rango de referencia para la estabilidad estructural del suelo depende, en principio, de sus propiedades inherentes tales como la textura o el contenido de carbono al estado



natural (i.e. situación de equilibrio con los factores formadores). Sin embargo, es posible suponer que el estado natural resulta demasiado distante y que su recuperación es impracticable, manteniendo un nivel de productividad aceptable (e.g. en tierras de desmonte). El rango de valores de referencia deberá ser definido entonces como una solución de compromiso, armonizando los aspectos sociales, económicos y ambientales de la sustentabilidad de los agrosistemas.

La región central de Argentina constituye un área de transición ecológica, caracterizada por la convergencia de múltiples gradientes ambientales y consecuentemente de uso de la tierra. La existencia de tales gradientes ofrece una oportunidad interesante para la validación de un modelo de simulación de la dinámica orgánica edáfica, frente a los rangos de los factores clima, relieve, materiales originarios y bioma identificados en la región (e.g. Cantú y Degiovanni, 1984; Cantero *et al.*, 1998 a y b). De la interacción de éstos factores entre sí y con los diversos sistemas de uso de la tierra deberían surgir los rangos de referencia necesarios para la definición de indicadores de sustentabilidad.

## 1.2 Objetivos

El presente trabajo fue llevado a cabo a fin de determinar la relevancia de los factores que controlan el contenido y el tipo de materia orgánica, de establecer los rangos de variación de este indicador de calidad en los suelos de la región central de Argentina y de estudiar la potencialidad del uso de modelos matemáticos en su evaluación; ello permitirá contar con una herramienta metodológica para el monitoreo de la sustentabilidad de los agroecosistemas de la región. A partir de estas consideraciones, han sido planteados los siguientes objetivos:

1. Analizar la interrelación, la variación espacio-temporal y ponderar la importancia relativa de los factores textura, clima, vegetación natural y uso de la tierra, que controlan los niveles de carbono orgánico en los suelos de la región.
2. Establecer rangos de referencia regionales aproximados para la cantidad y tipo de materia orgánica edáfica a ser usados en la definición de indicadores de calidad de suelos, y para el grado de determinación de ésta sobre las propiedades físicas y químicas que hacen a la calidad de los suelos de la región.
3. Evaluar un modelo de la dinámica de la fracción orgánica edáfica simulando la evolución del carbono orgánico frente a los gradientes regionales de los factores de control sobre la dinámica orgánica, como herramienta para el monitoreo de la sustentabilidad de los agrosistemas a través de su componente edáfica.

## 1.3 Evaluación de la sustentabilidad de los sistemas productivos

La intensificación o 'simplificación' de los sistemas productivos agropecuarios trae aparejadas ventajas y desventajas desde los puntos de vista socioeconómico y ambiental. Beneficios económicos de corto plazo se encuentran frecuentemente ligados al deterioro de los recursos productivos en el mediano y en el largo plazo (Serageldin, 2002). La

magnitud de tal deterioro y su reversibilidad dependen de la intensidad y eficiencia en el uso de los recursos y de las propiedades de resistencia y resiliencia de los ecosistemas (Holling, 2000). Las consecuencias sociales, económicas y ambientales de tales procesos de deterioro se encuentran a menudo estrechamente relacionadas (e.g. Cantero A. *et al.*, 1998).

Actualmente en Argentina – especialmente en las regiones peri-pampeanas – tiene lugar un proceso de reemplazo de sistemas de producción tradicionales, con un importante sesgo cultural y regional, por sistemas de producción de *commodities* a gran escala (ver por ej. Alessandria *et al.*, 2001 ó Pengue, 2001). Ecosistemas marginales son crecientemente incorporados a la producción y frecuentemente bajo monocultivos, resultando en agrosistemas de extrema fragilidad. Sistemas tradicionalmente mixtos (i.e. rotaciones agrícola-ganaderas) son abandonados y/o simplificados, con pérdidas de diversidad espacial y temporal a diferentes escalas. Sistemas de producción intensivos son corrientemente concebidos como insumo-dependientes, afectando a la calidad alimenticia y ambiental de la producción, y comprometiendo su eficiencia biofísica y económica. Un denominador común a todos estos procesos es el bajo grado (y en algunos casos la ausencia total) de sustentabilidad de los agrosistemas resultantes de tal proceso de ‘intensificación’.

Es por ello que resulta necesario transformar o re-diseñar los sistemas productivos actuales (agrosistemas), propendiendo a su productividad y estabilidad, mediante el diseño de alternativas tecnológicas tendientes a maximizar su eficiencia, incrementar su diversidad y asegurar su conservación. El diseño de agro(eco)sistemas, que incorporen una creciente diversidad de procesos ecológicos para asegurar su productividad y estabilidad, requiere de una metodología formal para la evaluación y el monitoreo de su sustentabilidad (Altieri, 1999). Un marco de referencia para la evaluación de sustentabilidad debe considerar como mínimo: (i) la definición del objeto de evaluación, (ii) la determinación de los puntos críticos del sistema, (iii) la selección de criterios de diagnóstico e indicadores, y (iv) herramientas para la medición y monitoreo de los indicadores (López-Ridaura *et al.*, 2001).

Actualmente, existe abundante documentación sobre la selección de indicadores de sustentabilidad, y particularmente de calidad y salud del suelo (Bouma, 2002). Si bien es probablemente imposible definir un índice de sustentabilidad universalmente aplicable, las mediciones del carbono orgánico edáfico – cuando son consideradas en el contexto de tipo de suelo, uso de la tierra y clima – representan un componente importante en la valoración de la sustentabilidad (Powlson, 1996). En tal sentido, los modelos de la dinámica de la fracción orgánica del suelo son una herramienta esencial para proyectar la tendencia en la evolución de las propiedades y procesos inherentes a ella. Un ejemplo frecuente de estas aplicaciones ha sido el uso del modelo CENTURY (Parton *et al.*, 1987), desarrollado para representar la dinámica a largo plazo del carbono (C) y los nutrientes mayores (N, P, S) a través de la vegetación y el suelo en diferentes tipos de ecosistemas, el cual fue validado y utilizado en diversas regiones del mundo (e.g. Paustian *et al.*, 1992; Kelly *et al.*, 1997; Zingore, 2002).

Por otra parte, es casi imposible conducir experimentos en sitios que cubran todas las combinaciones posibles de tipos de suelo, clima, uso de la tierra, opciones de manejo,

escenarios de cambio climático, etc. para la evaluación de indicadores de sustentabilidad. Mediante el uso de modelos, es posible extrapolar el conocimiento en el tiempo y en el espacio (Powlson, 1996), haciendo un uso eficiente de los recursos de investigación y complementando a la experimentación clásica (i.e. direccionándola). Sin embargo, la sensibilidad de los modelos al rango de condiciones agroecológicas en que se desarrollan los sistemas a evaluar es un requisito indispensable para definir su utilidad como herramientas de monitoreo.

#### 1.4 Calidad y salud del suelo: el papel de la fracción orgánica

La *calidad* del suelo ha sido conceptualizada como la *aptitud* de una clase específica de suelo para cumplir, dentro de los límites del ecosistema natural o manejado, las funciones necesarias para sostener la producción de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, asegurando la salud del hábitat humano (Karlen *et al.*, 1997). Doran (2001) ha definido en una forma similar a la *salud* del suelo, haciendo referencia a la *capacidad* de un suelo para cumplir con sus funciones. A partir de estos conceptos y de lo discutido por otros autores (e.g. Larson & Pierce, 1994), resulta evidente que deben considerarse tanto la capacidad productiva natural o genética de un suelo, como la dinámica influenciada por el uso y el manejo. Bouma (2002), por su parte, se atiene a la definición de calidad de *tierras* propuesta inicialmente por FAO (1993), aunque enfatiza que la producción agrícola es sólo una de las diversas opciones que dirigen los objetivos del manejo de tierras. En tal sentido, la calidad de los suelos ha sido concebida por Parr *et al.* (1992) como el resultado de una combinación de los procesos de degradación y de las técnicas de conservación o mejoramiento, mientras que Pieri *et al.* (1995) señalaron que la "aptitud de un cierto tipo de suelo para funcionar" depende fuertemente de las condiciones climáticas, y de su variabilidad en espacio y tiempo; considerar al suelo y no al clima en la definición de calidad carece de realismo, por lo que indicaron que la definición de calidad de tierras resulta más apropiada.

Más allá de las discrepancias conceptuales, el término calidad del suelo será adoptado aquí, bajo la conceptualización representada por el esquema de la Figura 1.1. La calidad del suelo resulta potencialmente definida por la interacción de los factores formadores en un cierto lugar, durante el tiempo cronológico de su evolución. Sin embargo, la actividad antrópica no puede ser ignorada, por cuanto existe una historia de uso y manejo para la mayor parte de las situaciones en que se requiere de la evaluación de sustentabilidad y del (re-)diseño de los sistemas productivos. El sistema de uso de la tierra desde que existe actividad humana - que en la región bajo estudio podría definirse someramente como pastoril (con o sin desmonte), agrícola o mixto -, ha provocado cambios en los atributos de calidad del suelo que pueden resultar irreversibles. Estos sistemas, junto con las prácticas de manejo aplicadas a las actividades productivas en particular (i.e. de corto plazo), condicionan el estado de salud del suelo con relación a su calidad original.

La evolución temporal de una o más propiedades que definen el estado de salud del suelo constituye una herramienta para el monitoreo de la sustentabilidad del sistema, siempre que la propiedad elegida sea capaz de integrar múltiples funciones del mismo. La salud

del suelo en un momento determinado puede ser caracterizada mediante indicadores ‘puntuales’, que consideran uno o más aspectos de las funciones del suelo, y que contrastan los valores actuales de una variable con valores de referencia para la misma (Figura 1.1). Sin embargo, tales valores de referencia (o rangos de valores) son afectados por la definición de calidad de suelo. En tal sentido, existe una calidad *inherente*, definida por el estado de equilibrio natural del suelo; una calidad *transformada*, que surge luego de la adecuación de las tierras para el establecimiento de actividades productivas (e.g. en tierras que son habilitadas para riego, desmontadas o drenadas artificialmente), y por último, puede definirse una calidad *percibida* por el usuario, que depende del uso al que la tierra será destinada y cuya definición responde a variables socioculturales y económicas, que le imprimen un carácter dinámico. La importancia de esta última reside en que en ella se basan normalmente los criterios para la toma de decisiones de uso y manejo.

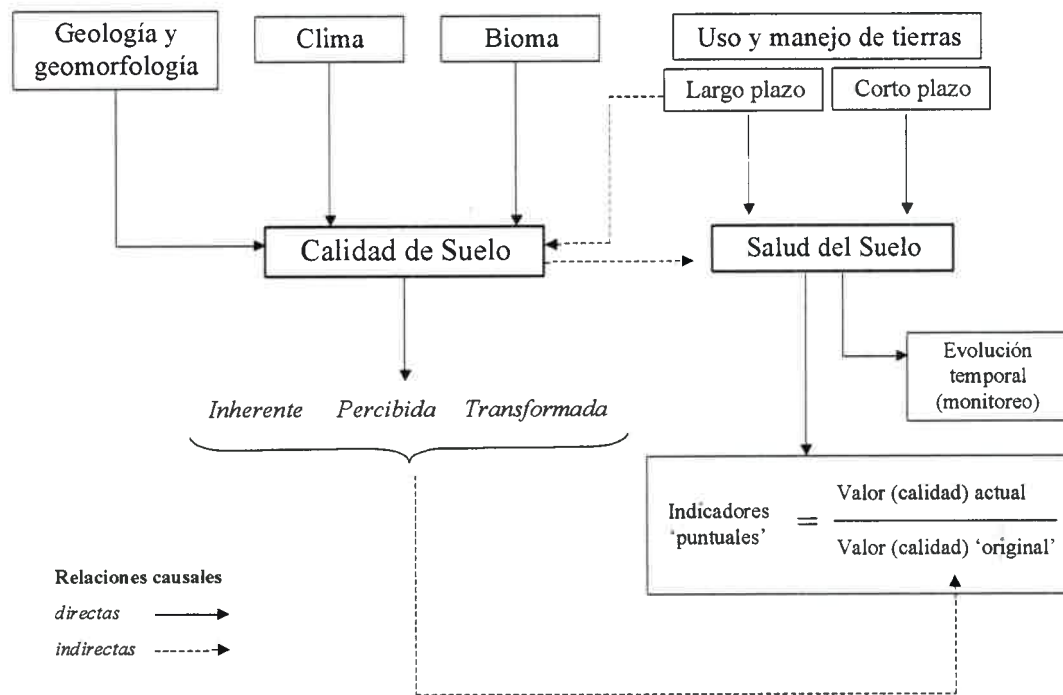


Figura 1.1: El enfoque conceptual adoptado para las definiciones de calidad y salud del suelo y de sus condicionantes. Explicación en texto principal

Un marco para la evaluación de calidad del suelo debe considerar (i) la función que éste debe cumplir, (ii) los procesos específicos para soportar tal función, (iii) las propiedades o atributos mensurables que tienen influencia sobre la capacidad del suelo para cumplirla y que reflejan cambios en los procesos específicos. El atributo o indicador debe ser fácil de medir, con bajo error de muestreo, confiable y relativamente sensible a las variaciones producidas por el manejo del suelo. De allí que, a la secuencia indicada anteriormente, debe agregarse la metodología adecuada para la cuantificación del atributo (Acton & Padbury, 1993). Diversos indicadores de calidad de suelo han sido propuestos por diferentes autores durante los últimos 10 años (Tabla 1.1). Ellos constituyen un conjunto



mínimo de datos necesario para la evaluación de sustentabilidad de los agrosistemas a través de su componente edáfica (Arshad & Martin, 2002).

Tabla 1.1: Indicadores clave para la evaluación de calidad del suelo (Doran & Parkin, 1994; Larson & Pierce, 1994; Carter *et al.*, 1997; Arshad & Martin, 2002).

<b>Indicador</b>	<b>Criterio de selección</b>
Materia orgánica	Define fertilidad y estructura del suelo, retención hídrica, adsorción de pesticidas, interviene en modelización de procesos
Profundidad epipedón	Estima el volumen radical para la producción de cultivos y control de la erosión
Agregación	Estructura del suelo, resistencia a la erosión, emergencia de cultivos, indicador primario de los efectos del manejo del suelo
Textura	Retención y transporte de agua y elementos químicos, uso en modelos de simulación
Densidad aparente	Penetración de raíces, porosidad, ajuste de resultados de análisis en términos volumétricos
Infiltración	Escurrimiento, lixiviación y erosión potencial
pH	Disponibilidad de nutrientes, adsorción y movilidad de pesticidas, uso en modelos de procesos
Conductividad eléctrica	Define crecimiento del cultivo, estructura del suelo, infiltración de agua; actualmente ausente en la mayoría de los modelos
Contaminantes	Calidad vegetal, salud animal y humana
Respiración del suelo	Actividad biológica, uso en modelos de procesos, indicador primario del efecto del manejo sobre la materia orgánica
Formas del N	Disponibilidad para el cultivo, lixiviación potencial, tasas de mineralización/inmovilización, uso en modelos de procesos
Disponibilidad de NPK	Capacidad para sostener crecimiento del cultivo, indicador de calidad ambiental

La literatura arroja crecientes evidencias que permiten definir el carácter integrador de la fracción orgánica en términos de las funciones que definen calidad de suelos. El contenido y el tipo de materia orgánica en los horizontes superficiales condicionan sus características estructurales, afectando de esta forma a la transmisión de agua y aire a través del mismo, a su resistencia frente a los procesos de degradación física y a su erodabilidad (Vazquez *et al.*, 1990). Con relación a los procesos químicos, constituye la fuente y el reservorio de nutrientes, actúa como regulador del pH y condiciona las características del ambiente en el que tienen lugar las diferentes reacciones químico-biológicas (Hassink *et al.*, 1993). Desde un punto de vista ambiental, la materia orgánica interviene en el ciclo del carbono atmosférico y es capaz de disminuir los efectos de la contaminación por el uso de

plaguicidas fijando sus principios activos y, en algunos casos, actuando como un degradador de tóxicos (Larson & Pierce, 1994). El carácter integrador de la materia orgánica puede ser ilustrado por las interrelaciones entre atributos seleccionados como indicadores por varios autores (Tabla 1.2), de acuerdo con Arshad & Martin (2002).

Tabla 1.2: Interrelación entre atributos y propiedades del suelo seleccionados como indicadores de calidad (Arshad & Martin, 2002).

<b>Indicador seleccionado</b>	<b>Otros atributos y propiedades que afectan al indicador</b>
Agregación	Materia orgánica, actividad microbiana (especialmente fúngica), textura
Infiltración	Materia orgánica, agregación, conductividad eléctrica, proporción de sodio intercambiable (PSI)
Densidad aparente	Materia orgánica, agregación, profundidad del epipedón, PSI, actividad biológica
Biomasa y/o respiración microbiana	Materia orgánica, agregación, densidad aparente, pH, textura, PSI
Disponibilidad de nutrientes	Materia orgánica, pH, profundidad del epipedón, textura, parámetros microbianos (tasas de mineralización e inmovilización)

En los suelos de las diversas áreas de la región pampeana y de su cordón periférico (i.e. Espinal) en el centro de Argentina se han reportado importantes pérdidas de materia orgánica. Los pastizales naturales pampeanos han sido destruidos por el pastoreo y el fuego durante el siglo XIX a lo que se sumó el uso agrícola posterior (Soriano, 1991). Amplios contrastes han surgido a partir de estudios comparativos entre situaciones de manejo agrícola y/o pastoril con situaciones de escasa alteración antrópica como parques de cascos de estancias (Michelena *et al.*, 1988 ; Vazquez *et al.*, 1990). La magnitud de tales pérdidas en la Pampa Ondulada alcanzó valores de hasta 35% de la concentración de carbono en superficie bajo situaciones agrícolas (Alvarez *et al.*, 1995). En la región bajo estudio, mediciones en áreas provenientes de desmonte o de pastizal natural bajo diferente intensidad de uso agrícola-ganadero mostraron importantes diferencias en cantidad y composición de materia orgánica (Moreno *et al.*, 1996), y en propiedades relacionadas (Bricchi, 1996), al compararlas con situaciones en estado cuasi natural. El impacto de diferentes sistemas de labranza en los suelos pampeanos ha sido también estudiado mediante modelos de simulación de la dinámica orgánica (Andriulo, 1995).

### 1.5 Modelización de la dinámica de la fracción orgánica edáfica

Tal como fue documentado, la literatura ofrece abundante información sobre las características y propiedades de la materia orgánica edáfica y sobre la dinámica del

carbono, nitrógeno, azufre y fósforo a través de ella. Estos conocimientos pueden ser integrados mediante la incorporación de los conceptos de formación y transformación de materia orgánica en un modelo dinámico que permita simular variaciones de mediano y largo plazo en las diferentes fracciones que la componen (Stevenson, 1986). Diferentes modelos de este tipo han sido desarrollados durante los últimos 25 años a fin de mejorar el conocimiento sobre la dinámica de la materia orgánica del suelo en su estado de equilibrio y sobre los cambios provocados por el uso de la tierra (Janssen, 2002). Los mismos han sido utilizados con múltiples objetivos: (i) la simulación del efecto de los gradientes climáticos sobre el nivel de materia orgánica, o (ii) la identificación de los factores que controlan este nivel dentro de una misma zona climática (e.g. Parton *et al.*, 1987); (iii) la simulación de los cambios provocados por el uso de la tierra y (iv) el efecto de las prácticas de manejo sobre la dinámica de las fracciones orgánicas (e.g. Yang, 1996).

Ciertos modelos han sido desarrollados para estudiar casos específicos (e.g. Probert *et al.*, 1998; Tittonell, 2003), mientras que otros revisten un carácter de mayor universalidad (e.g. Gijssman *et al.*, 2002). En ocasiones, los modelos descriptivos simples rinden mejores resultados que aquellos explicativos sofisticados; tal es el caso en los estudios de predicción (Spitters, 1990). Los modelos de materia orgánica se distinguen básicamente de acuerdo al número de fracciones con diferente tasa de descomposición en que se divide al carbono del suelo, i.e. componentes (van Keulen, 2001). Los modelos *mono-componentes*, i.e. que no distinguen entre diferentes fracciones orgánicas, pueden resultar de utilidad en ciertas aplicaciones (ver por ej. Yang & Janssen, 2000). Sin embargo, los modelos *multi-componentes* permiten entender con mayor profundidad los procesos que gobiernan la dinámica de las fracciones orgánicas; el número de componentes puede variar ampliamente, desde dos (Seligman & van Keulen, 1981) hasta siete (Juma & Paul, 1981). Actualmente, la tendencia en la modelización de la materia orgánica persigue la homologación entre las fracciones obtenidas por métodos de laboratorio y las fracciones (componentes) discriminadas por los modelos (Six *et al.*, 2002).

La complejidad de los modelos ha ido incrementando de acuerdo al avance de los conocimientos y al refinamiento de los métodos experimentales. El modelo desarrollado por Jenkinson & Rayner (1977) asume que la materia orgánica edáfica puede dividirse en las fracciones activa, estable y pasiva, con tasas de transformación que involucran tiempos medios de descomposición de 1, 30 y 1500 años, respectivamente. Campbell *et al.* (1978) casi simultáneamente, desarrollaron un modelo que considera sólo dos fracciones: la activa y la estable, con periodos de transformación de 53 y 1429 años. Van Veen & Paul (1981) utilizaron un enfoque similar, pero introdujeron los efectos de la presencia de fracciones orgánicas protegidas física o químicamente, de la erosión y de los tipos de labranzas en su modelo. Además, estos autores dividieron a los residuos vegetales en descomponibles y recalcitrantes. Más tarde, Parton *et al.* (1987), incluyeron el efecto de la textura y desarrollaron un modelo generalizado para el ciclo de los nutrientes que simula la dinámica del carbono, nitrógeno, fósforo y azufre. Una versión más reciente del modelo de Jenkinson & Rayner incluyó el concepto de protección física que la arcilla ejerce sobre la materia orgánica (Jenkinson, 1990).

El uso de modelos requiere de su previa validación frente a condiciones agroecológicas específicas. Debido al efecto de la temperatura sobre las tasas de transformación, se

distingue principalmente entre condiciones tropicales (normalmente de bajos insumos) y templadas. Para estas últimas, el modelo de Jenkinson & Rayner fue validado utilizando datos de los ensayos de largo plazo de la estación experimental de Rothamsted, UK (Jenkinson, 1990); el de Van Veen & Paul fue probado con datos de materia orgánica para diferentes condiciones ambientales en Canadá (Van Veen & Paul, 1981; Voroney *et al.*, 1981). El modelo de Parton y colaboradores (i.e. CENTURY) fue validado inicialmente con datos de C y N orgánicos y con valores de producción de biomasa de los pastizales de las *Great Plains* americanas (Parton *et al.*, 1987) y para esquemas de producción agrícola en la misma región (Parton *et al.*, 1988); posteriormente se lo validó en Suecia (Paustian *et al.*, 1992), utilizando datos de experimentos de largo plazo en donde se involucró fertilización nitrogenada y también en Pendelton, US (Rasmussen & Parton, 1993; Parton & Rasmussen, 1994), donde se emplearon datos provenientes de ensayos de manejo de residuos de cosecha para un monocultivo de trigo de 54 años.

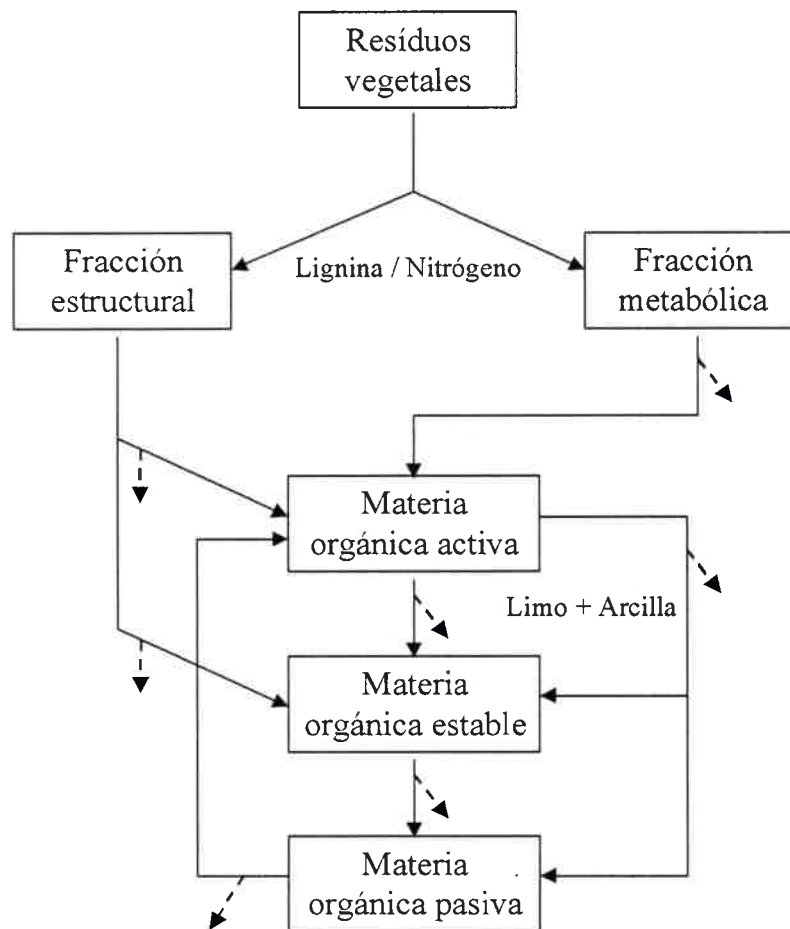


Figura 1.2: Versión simplificada de la estructura original del modelo CENTURY (adaptado de Parton & Rasmussen, 1994). Las flechas con líneas de puntos indican procesos de descomposición con liberación de CO<sub>2</sub>. Una versión más completa de este esquema es presentada en el capítulo correspondiente a la descripción del modelo.

Debido a su solidez conceptual, a su flexibilidad y a los antecedentes sobre su utilización en diferentes regiones del mundo, el presente trabajo propone el uso del modelo CENTURY (Figura 1.2) para el estudio de los factores que controlan los niveles de carbono en los suelos del centro de Argentina. Desarrollado para simular los efectos de gradientes macroambientales (como una primera aproximación hacia los efectos del cambio climático), su diseño involucra tanto a las propiedades del suelo y de la vegetación como a las variables de uso y manejo del sistema durante largos períodos de tiempo (50 - 2000 años).

El modelo es capaz de simular la productividad primaria, así como la dinámica del agua y los nutrientes dentro del suelo, pero pone su énfasis en la dinámica de la materia orgánica edáfica, ya que ésta permite integrar los conceptos dinámicos de variaciones anuales en la producción y descomposición de los tejidos vegetales (Figura 1.2). Involucrando tanto a las fracciones estables (de lenta transformación) como a las lábiles (de rápida transformación), además de estimar la cantidad total de materia orgánica presente en el suelo, ofrece una medida de su capacidad para el abastecimiento de nutrientes a las plantas.

### **1.6 Hipótesis de trabajo**

A partir de los antecedentes y de las consideraciones teóricas expuestas en las secciones precedentes, que sostienen la utilidad del monitoreo de la dinámica de la fracción orgánica del suelo en la evaluación de la sustentabilidad de los agrosistemas, se han formulado las siguientes hipótesis de trabajo:

1. Las características de cantidad y tipo de materia orgánica, necesarias para la definición de indicadores de calidad y salud de los suelos de la región, varían de acuerdo a la interacción de los factores textura, clima, vegetación y sistema de uso de la tierra
2. La textura de suelo es el factor de mayor determinación en la definición de rangos de valores de referencia para el indicador materia orgánica, en los suelos dominantes de la región
3. El efecto del factor clima sobre la capacidad de fijación de C orgánico puede ser estudiado mediante la selección de situaciones cuasi naturales para suelos de texturas similares, bajo un mismo tipo de vegetación natural, a diferentes altitudes
2. A partir de los valores de C orgánico del suelo, es factible derivar modelos descriptivos simples para estimar el valor de propiedades relacionadas que hacen a la calidad del suelo (e.g. capacidad de intercambio de cationes), para rangos de texturas definidos
5. Debido a la irreversibilidad de ciertos cambios provocados por el hombre, la definición de valores de referencia para evaluar calidad y salud del suelo debe considerar tanto a los niveles de materia orgánica en equilibrio natural, como al sistema de uso histórico de la tierra
6. El uso del modelo CENTURY, validado para las condiciones de la región, permite estudiar la interacción entre tales factores y establecer rangos de valores de referencia para los niveles de materia orgánica, necesarios para su utilización como indicador



7. El planteo de escenarios futuros de evolución climática y/o de cambios en el sistema de uso de las tierras, y el estudio de sus efectos sobre el C orgánico edáfico, puede realizarse mediante el uso del modelo CENTURY

8. Apoyándose en los resultados de las simulaciones, es posible estudiar la dinámica de fijación/liberación potencial de CO<sub>2</sub> durante la evolución de los agrosistemas, y estimar la tendencia de diferentes escenarios futuros

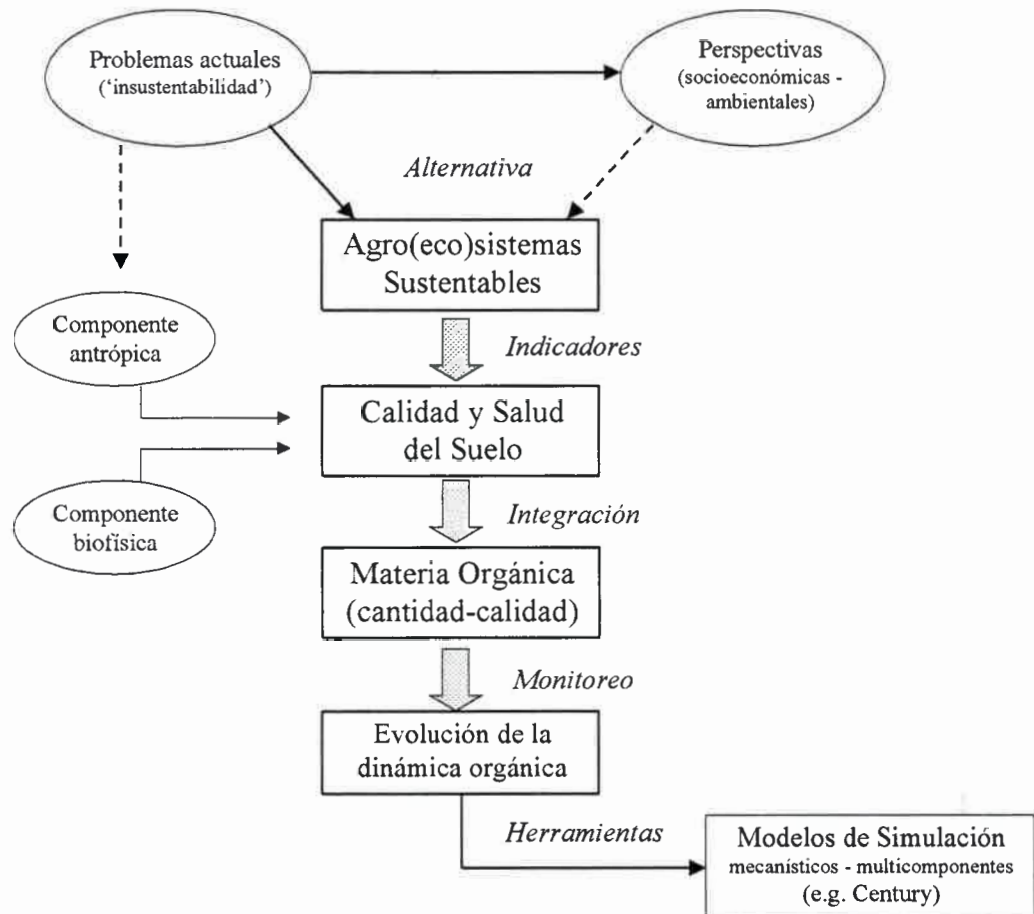


Figura 1.3: Diagrama teórico simplificado representando el enfoque metodológico para el desarrollo de la tesis. Los agroecosistemas sustentables aparecen como alternativas a la situación de 'insustentabilidad' actual y futura; la calidad y salud del suelo resultan claves para la sustentabilidad, mientras que la fracción orgánica del suelo constituye una variable integradora de ambas. La dinámica de la fracción orgánica puede ser monitoreada mediante el uso de modelos, los cuales presentan un grado variable de complejidad. El modelo Century es utilizado aquí como herramienta de monitoreo y estudio del carbono orgánico edáfico.

### 1.7 Enfoque metodológico conceptual

El marco conceptual teórico que fundamenta los procedimientos de esta tesis es simplificado en el diagrama de la Figura 1.3. El diagnóstico de la situación actual en la mayor parte de los sistemas productivos (agrosistemas), y la consideración de las

perspectivas vislumbradas en términos socioeconómicos y ambientales, sugieren la necesidad de plantear *alternativas* para su (re-)diseño. Éstos deben perseguir el concepto de sustentabilidad, lo cual propende hacia la incorporación y capitalización de diversos procesos ecológicos originales para su funcionamiento (agroecosistemas).

La sustentabilidad de los sistemas productivos debe ser evaluada a través de *indicadores* de carácter socioeconómico y ambiental, capaces de reflejar la evolución de sus atributos y de sus elementos de diagnóstico (Sección 1.3). La calidad y salud del suelo aparecen como pilares fundamentales para la sustentabilidad de los agrosistemas (Sección 1.3); no obstante, su definición es afectada no sólo por elementos biofísicos sino además antrópicos (Sección 1.4). La cantidad y calidad de la materia orgánica del suelo, por su parte, resulta en una variable *integradora* de procesos ecológicos (i.e. flujos de energía y ciclos de materia en el agroecosistema) así como de los procesos físicos, químicos y biológicos particulares del suelo (Sección 1.4).

El seguimiento de la evolución de la fracción orgánica edáfica aparece así como una metodología para el *monitoreo* de los aspectos económicos y ambientales de la sustentabilidad de los agrosistemas (i.e. atributos de Productividad y Estabilidad). Los modelos de simulación que describen y representan la dinámica del carbono orgánico del suelo constituyen *herramientas* de gran valor en tal sentido (Sección 1.5). Sin embargo, la utilidad y confiabilidad de tales modelos depende de su grado de complejidad en relación con el número de procesos involucrados en la simulación, el nivel de detalle en su descripción y el tipo de supuestos asumidos, entre otros (Sección 1.4).

Los modelos mecanísticos o explicativos intentan reproducir los procesos ecológicos basándose en sus principios biofísicos fundamentales; su empleo permite estudiar con profundidad dichos procesos y predecir tendencias, una vez que han sido validados frente a las condiciones locales (Sección 1.5). CENTURY (descrito en detalle en el siguiente capítulo) es un modelo de simulación dinámico, mecanístico, que distingue diferentes fracciones orgánicas de acuerdo a su tasa de descomposición (i.e. enfoque multi-componentes) y que fue ampliamente utilizado bajo diversas condiciones ecológicas. Su validación y aplicación a las condiciones locales permitirá (i) contar con una herramienta para el monitoreo de atributos de sustentabilidad de los agrosistemas a través de la salud y calidad del suelo y (ii) estudiar la interrelación entre los factores que controlan los niveles de materia orgánica y que definen los rangos de referencia para la construcción de indicadores.

En el siguiente capítulo (2) se describe el modelo CENTURY, mientras que en el Capítulo 3 se presenta una caracterización de la región de trabajo y en el Capítulo 4 se describen los métodos empleados. En el Capítulo 5 se analiza la interrelación de factores que controlan los niveles de materia orgánica en los suelos de la región; en el Capítulo 6 se estudia la relación entre el contenido de materia orgánica y diferentes atributos de calidad de los suelos de la región; en el Capítulo 7 se estudia la sensibilidad del modelo frente a los gradientes biofísicos y de uso que se encuentran en la región y se presenta un ejemplo para el análisis de escenarios futuros mediante el uso del modelo. Finalmente, en el capítulo 8 se sintetiza, discute y concluye sobre la base de los resultados y planteos teóricos propuestos en los capítulos precedentes. Buena parte de la información en tablas y figuras es presentada en los apéndices, a fin de agilizar la lectura del texto principal.

## 2. El modelo Century Agroecosystems

Century Agroecosystems<sup>3</sup> es un modelo de simulación que ha sido diseñado para el análisis de la evolución de la productividad y sustentabilidad de los agroecosistemas, siendo posible su aplicación a un amplio rango de condiciones ecológicas y sistemas productivos; i.e. desde esquemas ganaderos extensivos sobre pastizales naturales hasta complejos sistemas de cultivos y rotaciones. La versión utilizada en este trabajo integra el efecto de las variables directrices edáficas y climáticas, junto a las variables de manejo, para simular la dinámica del carbono y del agua en el sistema suelo-planta. CENTURY es un modelo de tipo mecanístico o explicativo sobre la base de sus fundamentos biofísicos, determinístico por la naturaleza de sus entradas y salidas, y dinámico, ya que calcula e integra los resultados dentro de un horizonte temporal (cf. Sección 1.5). El presente capítulo intenta describir los lineamientos generales sobre la estructura del modelo, los requerimientos de información y la base conceptual sobre la cual se asientan los cálculos y simulaciones que el mismo genera. El desarrollo inicial del modelo, su estructura, su base científico-matemática y la forma en que los diferentes parámetros fueron estimados son descritos en Parton *et al.* (1987), Parton *et al.* (1988), y Sanford *et al.* (1991), mientras que los aspectos relativos a la versión actual fueron discutidos por Metherell (1992).

### 2.1 Estructura, conceptos y requerimientos de información

El modelo CENTURY fue desarrollado y calibrado para representar a nivel del sistema suelo-planta la dinámica a largo plazo del carbono y los nutrientes mayores (N, P, S) a través de los residuos vegetales (RV) y la materia orgánica edáfica (MO) en diferentes tipos de ecosistemas (pastizales, bosques, sabanas y cultivos). Está integrado por diferentes submodelos interrelacionados: el *submodelo materia orgánica* reviste un carácter central e integrador respecto de los *submodelos nitrógeno, fósforo y azufre*, que incluyen a los compartimentos orgánicos e inorgánicos, y de los *submodelos de producción de biomasa* (submodelos pastizales, cultivos, bosques y sabana), estrechamente ligados al primero. La emisión de dióxido de carbono a la atmósfera por la actividad microbológica edáfica, al igual que la captación de este gas para el proceso fotosintético pueden ser, asimismo, simuladas. El modelo trabaja con un paso temporal mensual y requiere relativamente pocos datos, sencillos y normalmente disponibles o posibles de ser estimados a partir de la literatura existente. Los de mayor importancia son los siguientes:

- (1) Temperaturas máxima y mínima medias mensuales del aire,
- (2) precipitación mensual y su coeficiente de variación,
- (3) contenido de lignina promedio de la vegetación o cultivo,
- (4) contenido promedio de N, P, y S en la vegetación o cultivo,

---

<sup>3</sup> A pesar de ser éste el nombre oficial para la última versión del modelo, en adelante se empleará el nombre original CENTURY, con el que fuera citado en la mayoría de las publicaciones pertinentes.



- (5) granulometría de los materiales originarios del suelo y textura,
- (6) aportes atmosféricos y disponibilidad edáfica de N, y
- (7) niveles iniciales de C, N, P, y S en el suelo.

Es necesario contar además con una serie de datos menores como profundidad del *solum* y de los diferentes horizontes, condiciones de drenaje, densidad aparente, etc., que deben ser incluidos durante las simulaciones. Debido a la interdependencia interna entre los diferentes submodelos, y a la dependencia de éstos respecto del *submodelo materia orgánica*, el grado de ajuste de este último define la bondad de las estimaciones de los restantes.

El submodelo materia orgánica, y en segunda instancia, el submodelo producción de biomasa son los de mayor importancia a la hora de plantear una validación frente a los gradientes de condiciones biofísicas y de manejo locales, y son los que serán estudiados en mayor profundidad durante el desarrollo de esta tesis. Derivaciones posteriores de los resultados de los restantes submodelos serán ilustradas en aquellos casos en que se verifique un ajuste conveniente entre los valores de carbono edáfico simulados y los medidos en los muestreos a campo. La descripción de los submodelos *materia orgánica* y *producción de biomasa*, y de los utilizados para el balance hídrico y clima del suelo, permitirá visualizar claramente el modelo conceptual que respalda a las simulaciones producidas por CENTURY. La concepción de los submodelos *nitrógeno*, *fósforo* y *azufre* será ilustrada mediante una breve descripción del primero de ellos. Los módulos de cálculo de la dinámica del CO<sub>2</sub> y del efecto de pérdida de C por erosión pueden ser consultados en la fuente original (Metherell, 1992).

## 2.2 El submodelo materia orgánica

Este submodelo, al igual que otros modelos de la dinámica orgánica (Jenkinson and Rayner, 1977; Jenkinson, 1990; van Veen and Paul, 1981), se basa en el fraccionamiento conceptual de la materia orgánica edáfica. La Figura 2.1 ilustra los flujos de carbono que tienen lugar entre las diferentes fracciones del C, de acuerdo al marco conceptual del modelo. El mismo diferencia tres compartimentos o fracciones orgánicas (activa, estable y pasiva) de acuerdo a su tasa de descomposición, dos fracciones de restos vegetales (superficial y subsuperficial) y una fracción microbiana superficial asociada a los restos vegetales en descomposición sobre la superficie del suelo. El carbono proveniente de los aportes de residuos vegetales y excretas animales al suelo son particionados en una fracción estructural (STRUCC(\*)) y una metabólica (METABC(\*)) en función de la relación entre sus contenidos de lignina y nitrógeno (Rel L/N). La descomposición de la materia orgánica edáfica, así como de los residuos vegetales se asume como microbiológicamente mediada, con pérdidas asociadas de CO<sub>2</sub> (RESP(\*)) como resultado de la respiración microbiana. Tales pérdidas de CO<sub>2</sub> a partir de la fracción activa son mayores al aumentar el contenido de arena del suelo.

Los productos de la descomposición pueden fluir hacia un compartimento microbiano superficial (SOMIC(1)) o hacia uno de los tres compartimentos que representan las fracciones orgánicas edáficas, cada uno caracterizado por diferentes tasas máximas de

descomposición (Figura 2.1). Las tasas de descomposición potenciales son afectadas por un factor de corrección (M) derivado de funciones multiplicativas que involucran humedad y temperatura del suelo (media mensual cerca de la superficie) y que puede ser positivamente afectado por efecto del laboreo. La función humedad del suelo utiliza la relación entre el agua almacenada hasta los 0,3 m de profundidad sumado a la precipitación mensual y la evapotranspiración potencial. La tasa de descomposición del material estructural (STRUCC(\*)) es una función de la fracción de lignina en el mismo. A medida que los residuos vegetales se descomponen, la fracción lignina de los mismos no fluye a través del compartimento superficial microbiano (SOM1C(1)) ni de la fracción orgánica activa (SOM1C(2)), sino que se asume un flujo directo hacia la fracción orgánica estable (SOM2C). La fracción orgánica activa (SOM1C(2)) representa a la masa microbiana edáfica y a sus productos primarios y secundarios (la fracción activa total es dos a tres veces mayor que biomasa microbiana) y presenta un período de transformación (*turnover time*, la función inversa de la tasa de transformación o descomposición) en el rango de meses a unos pocos años, dependiendo de las condiciones ambientales y del contenido de arena del suelo.

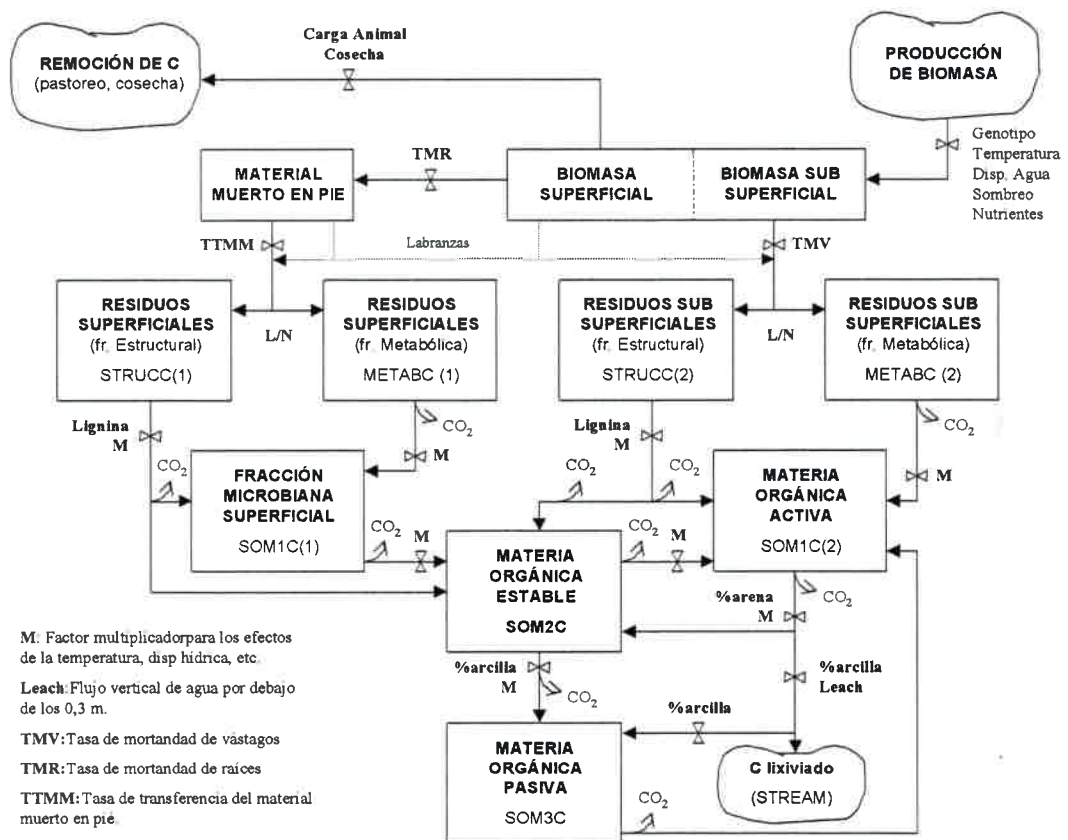


Figura 2.1: Esquema ilustrando el marco conceptual del submodelo materia orgánica dentro del modelo Century Agroecosystems. Las flechas representan flujos de C. Las líneas punteadas representan los flujos provocados por las labranzas en los sistemas agrícolas. Las siglas STRUCC(\*), METAMC(\*), SOM1C(\*), SOM2C y SOM3C corresponden a la codificación de las fracciones asignada por el modelo.

#### *Efecto de la textura:*

La textura del suelo afecta no solo a la tasa de transformación de la fracción orgánica activa (mayores tasas en suelos arenosos) sino además a la eficiencia de su estabilización en materia orgánica estable (mayor tasa de estabilización en suelos arcillosos). La tasa de transformación de la fracción microbiana superficial (SOM1C(1)) es independiente de la textura (Figura 2.1), y regula la transferencia directa de carbono hacia la fracción estable (SOM2C). Esta última presenta períodos de transformación de entre 20 a 50 años e incluye al material vegetal resistente a la descomposición derivado de la fracción de residuos estructurales (STRUCC(\*)) y a los productos bio-estabilizados derivados de las fracciones activa y microbiana superficial (SOM1C(\*)). La fracción orgánica pasiva (SOM3C) presenta una elevada resistencia a la descomposición, con períodos de transformación de entre 400 a 2000 años, e incluye materia orgánica química y físicamente estabilizada. La proporción de productos de la descomposición de las fracciones activa y estable que fluye hacia la fracción pasiva es mayor a medida que aumente el contenido de arcilla del suelo.

#### *Efecto de las condiciones de drenaje:*

Una parte de los productos de la descomposición de la fracción activa se pierde por lixiviación (STREAM (5)) (Figura 2.1). La lixiviación de materia orgánica es una función de la tasa de descomposición de la fracción activa y del contenido de arcilla del suelo (menores pérdidas en suelos arcillosos), y sólo ocurre cuando existe un drenaje considerable de agua por debajo de los 0,3 m de profundidad (nivel crítico prefijado). Las tasas de descomposición se ven reducidas en condiciones anaerobias. El factor drenaje (DRAIN) es un coeficiente que varía entre 0 y 1 (DRAIN=0 para suelos arcillosos pobremente drenados y DRAIN=1 para suelos arenosos bien drenados) y que permite asignar a cada suelo un cierto régimen de drenaje (i.e. clase natural).

#### *Dinámica de los macronutrientes N, P y S:*

En forma análoga a los diferentes compartimentos que el modelo diferencia para la distribución del carbono edáfico, existen aquellos para nitrógeno, fósforo y azufre. Cada fracción orgánica presenta un rango admisible de valores para la relación entre el contenido de C y de los restantes elementos (Rel. C/N, C/P y C/S) basados en el modelo conceptual de McGill y Cole (1981). Las relaciones C/N son plausibles de variar dentro de rangos estrechos, reflejando el concepto de que el N es estabilizado en asociación directa con el C. Las uniones éster en las que participan el P y el S, en cambio, permiten que los rangos de valores de las relaciones C/P y C/S varíen ampliamente. Estas relaciones adquieren valores elevados (fijos) en las fracciones estructurales (STRUCC(\*)), mientras que en las fracciones metabólicas (METABC(\*)) varían de acuerdo al contenido de nutrientes de los residuos vegetales.

Los valores de las relaciones C/N, C/P y C/S para los materiales que ingresan a cada compartimento del modelo (i.e. a cada fracción orgánica edáfica) son funciones lineales de la cantidad de cada elemento en la fracción inorgánica lábil del horizonte superficial del suelo (datos facultativos). Bajos niveles de nutrientes en la fracción orgánica lábil resultan en elevadas relaciones C/nutriente para los diferentes compartimentos. El flujo de N, P y S

entre los diferentes compartimentos está en relación con el correspondiente al C, de manera que la cantidad de un determinado elemento que es transferida resulta del producto entre flujo de C y la relación entre el contenido del elemento considerado y el de C en el compartimento de origen.

Los procesos de mineralización e inmovilización de N, P y S ocurren en la medida necesaria para mantener en equilibrio las relaciones discutidas anteriormente. De esta forma, la mineralización se encuentra vinculada a las pérdidas de C bajo la forma de CO<sub>2</sub> y a los flujos de C desde fracciones con bajos (activa) hacia aquellas con altos (estable) valores para la relación C/nutriente. La inmovilización, consecuentemente, ocurre cuando el C fluye desde fracciones con altos (residuos vegetales estructurales) hacia aquellas con bajos (materia orgánica activa) valores para la relación C/nutriente. Asimismo, las tasas de descomposición se ven reducidas si la cantidad de cualquiera de los elementos considerados es insuficiente para afrontar la demanda de inmovilización.

### **2.3 Balances hídricos, lixiviación y régimen térmico del suelo**

El modelo CENTURY incluye un módulo simplificado para el balance hídrico que calcula, para un paso mensual, las pérdidas por evaporación y transpiración, el contenido hídrico de los diferentes horizontes del suelo, el aporte y almacenamiento hídrico en la nieve, y el flujo saturado de agua entre los diferentes horizontes (Figura 2.2). Cuando la temperatura media del aire es menor a cero, las precipitaciones ocurren en forma de nieve; la sublimación y evaporación desde la superficie nevada ocurre a una tasa similar a la evapotranspiración potencial (ETP). El deshielo ocurre cuando la temperatura del aire es superior a cero y su ritmo aumenta linealmente con la misma. El agua aportada sobre la superficie del suelo es particionada en escurrimiento, transpiración, evaporación directa, flujos subsuperficiales (percolación, flujos hipodérmicos horizontales) y almacenaje de agua en el suelo. La tasa de evapotranspiración potencial es calculada como función de las temperaturas máximas y mínimas medias mensuales mediante una ecuación desarrollada por Linacre (1977). El cálculo del escurrimiento es presentado en el Apéndice I - 1 (Tablas A y B).

Las pérdidas por evaporación directa desde la superficie del suelo dependen de la cantidad de material vegetal muerto en pie, de la biomasa de residuos cubriendo el suelo, de las precipitaciones (PP) y de la ETP. Las pérdidas de agua por interceptación aumentan en función del nivel de biomasa aérea (que determina al mismo tiempo la magnitud de las pérdidas por transpiración) y dependen asimismo de PP y ETP. Tanto las pérdidas por evaporación como por interceptación son calculadas como fracciones de la PP mensual y sustraídas de ésta, mientras que la restante es el agua que es efectivamente adicionada al suelo. El agua es distribuida entre los diferentes horizontes a partir de la adición de agua al horizonte superficial (0 - 0,15 m) y el posterior drenaje del exceso hacia el horizonte inmediato inferior. Las pérdidas de agua por transpiración ocurren luego de que el agua fue adicionada al suelo. La suma de las pérdidas por interceptación, evaporación directa y transpiración no supera a la ETP, que representa la tasa máxima mensual de pérdida de agua.

El número de horizontes es una de las variables dato, aunque la profundidad de cada horizonte es fija (0,15 m hasta los 0,6 m de profundidad y 0,3 m a profundidades mayores) para el cálculo del balance hídrico. El agua que percola más allá del último horizonte no es considerada disponible para la evapotranspiración, e indica una medida de las pérdidas por lixiviación. Ajustando los parámetros STORMF y BASEF, el modelo es capaz de simular los flujos hipodérmicos dentro de una cuenca. Estos ajustes resultan relevantes cuando se trabaja con los submodelos N, P y S, ya que sus formas minerales lábiles (e.g  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_4$  para N) son susceptibles a la lixiviación, aumentando con el régimen de precipitaciones y con el contenido de arena del suelo.

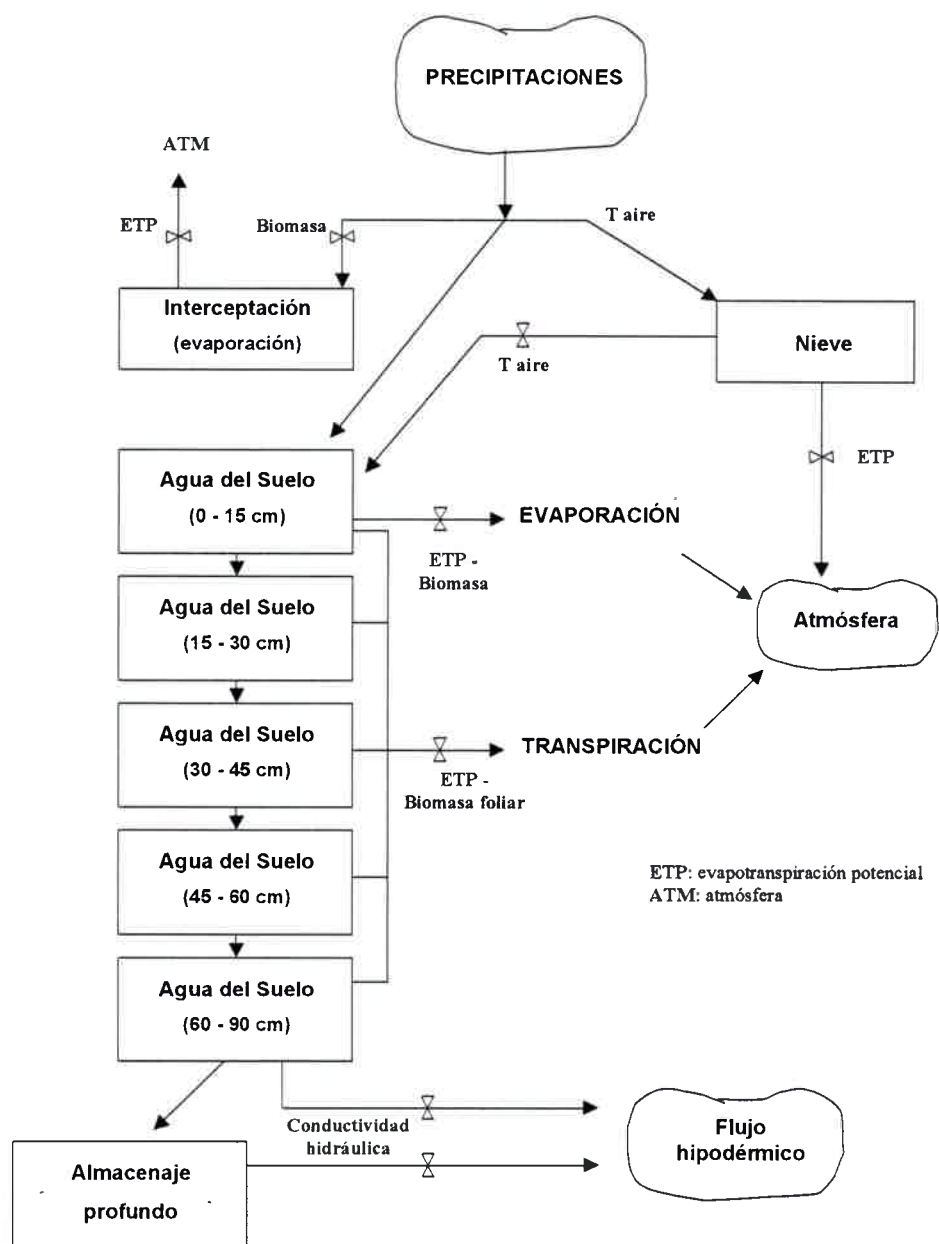


Figura 2.2: Esquema indicando la conceptualización del modelo simplificado utilizado en Century para el cálculo de los balances hídricos.



La temperatura media mensual del suelo cerca de la superficie es calculada mediante ecuaciones desarrolladas por Parton (1984). Las mismas estiman las temperaturas máxima y mínima del suelo en función de las del aire y de la biomasa vegetal que lo cubre. La temperatura de suelo utilizada para el cálculo de las tasas de descomposición y de crecimiento vegetal resulta del promedio de las temperaturas máxima y mínima del suelo.

## 2.4 Los submodelos de producción de biomasa

El estudio de la dinámica del C en los diferentes agroecosistemas requiere de la simulación de la componente biomasa vegetal, ya sea en sistemas agrícolas, en pastizales naturales como en sistemas de bosques y sabanas. El submodelo de *pastizales y cultivos* simula la producción de biomasa en comunidades vegetales (e.g. pastizales invernales o estivales, etc.) así como en diferentes cultivos herbáceos. Diferentes eventos tales como pastoreo, incendios, labranzas, fertilización, riego, cosecha, etc., pueden ser incluidos en las simulaciones, ya que los mismos afectan en forma directa a la producción de biomasa aérea y, en los casos de pastoreo y fuego, a las relaciones raíz/vástago y al contenido de nutrientes. El submodelo *forestal* simula el crecimiento de bosques caducifolios o perennifolios en sus estadios juveniles y maduros. El fuego, los disturbios de gran escala (huracanes) y las prácticas de tala y manejo forestal son las variables de mayor impacto sobre la producción de biomasa. Los ecosistemas de tipo sabana son simulados mediante la combinación de los sistemas pastizal y bosque, combinando los submodelos mencionados, y considerando las interacciones competitivas por efecto del sombreado y la competencia por nitrógeno.

Ambos submodelos de producción de biomasa asumen que la máxima producción mensual es controlada por la disponibilidad hídrica y por la temperatura, y que las tasas de producción máxima pueden ser limitadas por la disponibilidad de nutrientes (macronutrientes). La disponibilidad de nutrientes inorgánicos para el crecimiento vegetal se encuentra en función de la biomasa radical (i.e. volumen de suelo explorado), incrementando exponencialmente dentro del rango de 20 a 300 g m<sup>-2</sup> de biomasa de raíces. Se asume que la mayoría de los sistemas de pastizales y bosques se encuentran limitados por la disponibilidad de nutrientes, y responden favorablemente a las adiciones de N y P. La simulación bajo sistemas de sabana modifica la producción máxima del pastizal a través de un índice de sombreado que depende de la biomasa de hojas del estrato arbóreo y de su cobertura. Existe una limitación adicional sobre la tasa de crecimiento del pastizal impuesta por la partición diferencial de nutrientes entre los componentes arbóreo y herbáceo del sistema.

### 2.4.1 Producción del pastizal y pastoreo

Es posible simular la producción de biomasa de una amplia variedad de pastizales alterando un cierto número de parámetros de sitio específicos sobre las opciones que presenta el modelo. Sin embargo, el presente modelo no fue diseñado específicamente para simular producción de biomasa, de manera que algunos otros parámetros deberían ser re-calibrados o generados localmente, para una mayor exactitud. En la Figura 2.3 se

representan los compartimentos vástago, raíz y material vegetal muerto en pie que componen este submodelo. La producción potencial de biomasa (y la consecuente fijación de C, en  $\text{g m}^{-2} \text{mes}^{-1}$ ) es estimada en función de un máximo impuesto por las características genéticas de las especies involucradas y afectada por factores de reducción del crecimiento que adquieren valores entre 0 y 1, los cuales dependen de la temperatura del suelo, de la disponibilidad hídrica, del sombreado que ejerce la vegetación muerta y del crecimiento de nuevas plántulas.

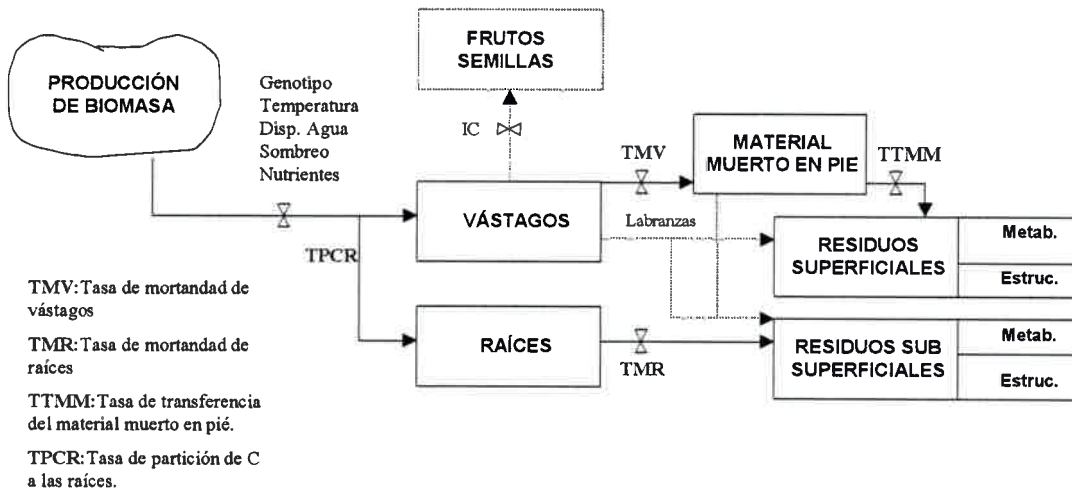


Figura 2.3: Esquema ilustrando la conceptualización del submodelo de producción de biomasa en pastizales y cultivos. Durante la simulación de la rutina de pastizal, el compartimento de producción de granos (semillas, frutos) y los flujos de materiales generados por labranzas no son considerados.

La producción potencial máxima, cuando no existen limitantes de temperatura, humedad o nutrientes, es básicamente determinada por el nivel de radiación fotosintéticamente activa, la tasa máxima de asimilación fotosintética, la eficiencia de conversión de asimilados en los diferentes constituyentes de los tejidos vegetales y la tasa de respiración de mantenimiento (van Heemst, 1986). De esta forma, el parámetro que determina la máxima producción potencial presenta componentes genéticos y ambientales. Sin embargo, en CENTURY, la distribución estacional de la producción de biomasa es controlada por la función de respuesta a la temperatura, y no así por la variación estacional de la radiación, asumiendo que la producción potencial refleja la que ocurriría en óptimas condiciones en días claros durante los meses de verano. El efecto del sombreado sobre el crecimiento potencial considerado en el modelo es una superficie de respuesta que depende al mismo tiempo de las cantidades de material vegetal vivo y muerto, y que fue inicialmente desarrollado para pastizales altos (Parton *et al.*, 1987).

En general, las especies C4 presentan mayores tasas de crecimiento potencial que las C3, debido a sus mayores tasas de asimilación neta (van Heemst, 1986). Para el rango de tasas de crecimientos potenciales de entre 200 a 580  $\text{kg MS ha}^{-1} \text{día}^{-1}$  corresponden valores de flujo de C en la biomasa vegetal de 240 a 700  $\text{g C m}^{-2} \text{mes}^{-1}$ . El crecimiento de la mayoría de las especies vegetales exhibe una respuesta de tipo sigmoideo a la temperatura en la

zona radical hasta una cierta temperatura óptima; se mantiene dentro de una banda de temperaturas dentro de la cual existe poco efecto sobre el crecimiento, y luego declina rápidamente ante mayores incrementos térmicos (Cooper, 1973). La tasa de crecimiento resultante depende de la respuesta combinada de los procesos de fotosíntesis y respiración al incremento de la temperatura. Para la mayoría de las especies de clima templado la temperatura base para el desarrollo se encuentra entre 0 y 5 °C, aumentando la tasa de desarrollo hasta temperaturas óptimas de 20 a 25 °C, para luego disminuir hasta un límite superior de entre 30 y 35 °C. Para especies tropicales, las temperaturas base, óptima y máxima son aproximadamente 10 °C más altas (Monteith, 1981). En este submodelo, la curva de respuesta a la temperatura puede ser *parametrizada* para cada especie utilizando una función de densidad de Poisson generalizada (Apéndice I – Figura A, Parámetros y funciones del modelo).

La disponibilidad hídrica disminuye la producción potencial de biomasa cuando la relación entre la suma del contenido hídrico del suelo en la zona explorada por las raíces más los aportes de agua básicamente por precipitaciones (por riegos, escurrimiento, capilaridad) y la tasa de evapotranspiración potencial adquiere valores menores a 0,8. La pendiente de esta relación lineal depende de la capacidad de retención hídrica del suelo, que varía a su vez con la textura (Apéndice I – Fig. B). Este efecto de la textura fue observado en experimentos a campo (Sala *et al.*, 1988) y explica el efecto de mayores tasas de infiltración y consecuentemente menores tasas de evaporación directa que ocurre en suelos de texturas gruesas, particularmente en regiones áridas.

La producción potencial simulada por el modelo es la correspondiente a la biomasa aérea, siendo necesario considerar la distribución de biomasa entre vástagos y raíces utilizando valores que sean acordes con los observados en condiciones de producción potencial y que varían a lo largo del año. Para representar la dormancia invernal de los pastizales, la relación raíz/vástago se mantiene constante durante los meses en que la temperatura del suelo es menor a 2 °C. En una formulación alternativa (Parton *et al.*, 1987) desarrollada para los pastizales de las *Great Plains* de América del norte, la relación raíz/vástago es controlada por la precipitación anual.

La producción del pastizal simulada se encuentra limitada por la disponibilidad de nutrientes, manteniendo la concentración de los mismos en los tejidos vegetales dentro de rangos predeterminados, discriminando entre vástagos y raíces. El principio de la ‘Ley del Mínimo’ de Liebig es aplicado, por cuanto el nutriente más limitante es el que define el nivel de producción. Los límites para el rango de concentración de los nutrientes para el crecimiento de la biomasa aérea se definen en función de la biomasa total, a fin de reflejar los cambios en la concentración de nutrientes que ocurren durante el desarrollo (Apéndice I – Fig. C). Los límites para la concentración de nutrientes en las raíces están en función de las precipitaciones y restringidos de acuerdo a la biomasa de raíces que es capaz de explorar el suelo (Apéndice I – Fig. D).

La muerte de vástagos y raíces durante el período de crecimiento es igualmente simulada, como función del agua disponible en todo el perfil del suelo y en la zona radical, respectivamente (Apéndice I – Fig. E). La muerte de los órganos aéreos puede verse aún incrementada debido al sombreado si la cantidad de biomasa acumulada supera un cierto valor crítico. La muerte de raíces sólo es simulada cuando las raíces se encuentran



fisiológicamente activas, es decir, con temperaturas del suelo superiores a 2 °C. Durante los meses establecidos como período de senescencia (variable para cada tipo de pastizal), la muerte de los órganos aéreos se fija en proporción a la biomasa aérea total, y el material muerto en pie es transferido a los compartimentos de residuos superficiales (cf. sub-modelo materia orgánica) a una tasa de transferencia específica para cada pastizal. El contenido de lignina promedio de la vegetación del pastizal puede ser especificado para vástagos y raíces mediante valores constantes, o estimado (por defecto) mediante una función lineal a través del régimen de precipitación anual (Parton *et al.*, 1992). El contenido de lignina siempre debe reflejar aquel que presenta el material vegetal senescente, que efectivamente es incorporado al suelo.

#### *Efectos del pastoreo y del fuego:*

Los efectos del pastoreo y del fuego sobre la producción del pastizal son representados en el modelo empleando datos generados por Holland *et al.* (1992) y por Ojima *et al.* (1990). El mayor impacto del fuego es el incremento de la relación raíz/vástago y de la relación C/N de la vegetación remanente, la remoción de la vegetación (reducción del *stand*) y retorno de los nutrientes al suelo durante los años en que los incendios ocurren (Ojima *et al.*, 1990). Del mismo modo, el pastoreo remueve vegetación, retorna nutrientes al suelo y altera la relación raíz/vástago, pero incrementa el contenido de N de la vegetación remanente (Holland *et al.*, 1992). El modelo presenta tres opciones para estimar el impacto del pastoreo. La primera de ellas (GRZEFF=0) no hay un impacto directo sobre la producción del pastizal, exceptuando la remoción de vegetación y el retorno de nutrientes mediante las excretas. La segunda opción (GRZEFF= 1) representa un efecto leve e incluye un valor constante para la relación raíz/vástago (no afectada por el pastoreo) y una disminución lineal de la producción del pastizal con el aumento de la intensidad de pastoreo. La tercera opción (GRZEFF=2) simula un efecto mas pronunciado y utiliza una curva de optimización del pastoreo (Holland *et al.*, 1992) compleja, según la cual la producción aumenta con intensidades de pastoreo moderadas y decrece abruptamente con intensidades altas (i.e. más de 40% de remoción mensual). La relación raíz/vástago se mantiene constante para intensidades de pastoreo entre leves y moderadas, y se reduce rápidamente con intensidades altas. En ésta, como en las opciones anteriores, la concentración de nutrientes en los rebrotes aumentará de acuerdo a la cantidad de biomasa aérea remanente.

#### *2.4.2 Bosques y sabanas*

El submodelo de crecimiento forestal (Figura 2.4) divide al estrato arbóreo en hojas, raíces finas, ramas finas, tallos leñosos (madera) y raíces leñosas, y distribuye al C y a los nutrientes entre ellas de acuerdo a un esquema de partición fijo. La máxima producción mensual bruta es calculada a través del producto de la tasa de producción máxima y una serie de índices que representan el efecto de la disponibilidad de agua, de la temperatura del suelo y del área foliar efectiva (hojas funcionales).

Los efectos de la disponibilidad hídrica y de la temperatura sobre la producción potencial son los mismos empleados en el sub-modelo de producción del pastizal (Apéndice I), mientras que el efecto del índice de área foliar sobre la producción es ilustrado en

Apéndice I – Figura F. La tasa de respiración de la biomasa es calculada en función del contenido de nitrógeno de los tejidos leñosos y de la temperatura, mediante una ecuación desarrollada por Ryan (1991) y sustraída de la tasa de producción bruta para obtener la tasa de producción neta, la cual no puede superar al producto entre la tasa máxima de producción neta específica del rodal y los índices que representan a los factores limitantes.

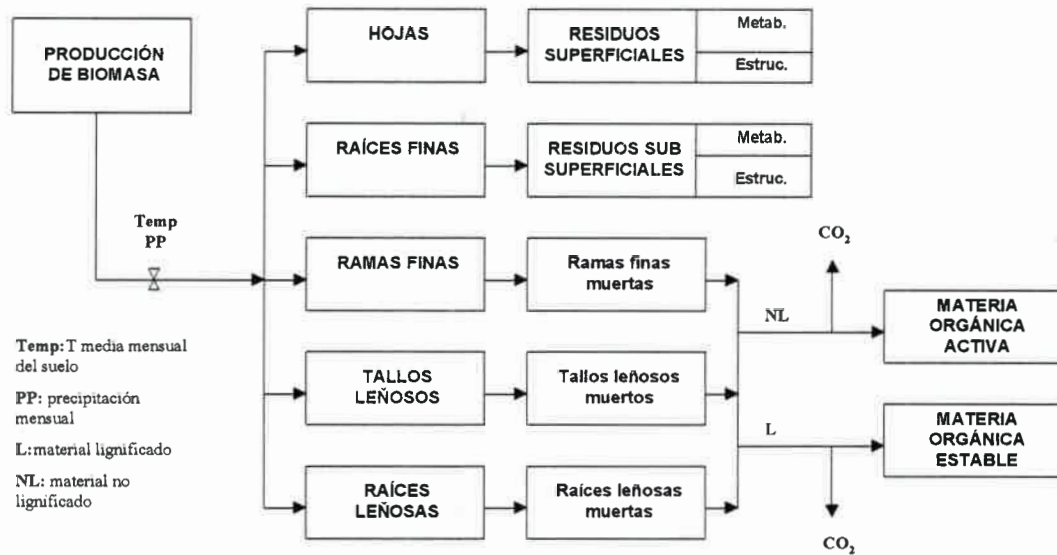


Figura 2.4: Esquema ilustrando la conceptualización del sub-modelo de crecimiento forestal en Century

El submodelo presenta una serie de supuestos en relación con la partición de la fracción leñosa en activa y no activa que exceden los alcances de este trabajo y que pueden ser consultados en la bibliografía original (Ryan, 1991). Sólo la fracción activa es atacada por los microorganismos, con liberación de CO<sub>2</sub>, y su proporción sobre la fracción leñosa total es determinada de acuerdo a la curva del Apéndice I – Figura G, también empleada para la fracción activa de raíces. La cantidad biomasa foliar adquiere un valor máximo que es función de la cantidad de biomasa leñosa activa (Apéndice I – Fig. H). Esta función que especifica el efecto de la estructura arbórea sobre el área foliar máxima es potencialmente diferente para diferentes especies forestales. De esta forma, los parámetros específicos más importantes que definen a cada masa forestal son las tasas de producción bruta y neta de biomasa, la relación entre el índice de área foliar y la biomasa leñosa, la partición de C entre biomasa leñosa activa y no activa, y la distribución del C entre los diferentes órganos vegetales (i.e. compartimentos). El submodelo forestal presenta además diferentes patrones de distribución de carbono para masas forestales jóvenes y maduras, así como para bosques caducifolios y perennifolios. Para estos últimos la tasa de mortandad foliar es establecida en forma específica para cada mes del año, mientras que para bosques caducifolios la misma aumenta abruptamente durante los meses de senescencia. Además, para este tipo de bosques la tasa de crecimiento foliar es mucho más elevada durante los primeros meses de desarrollo foliar en cada estación de crecimiento.

Las masa de hojas senescentes, así como de las raíces finas son transferidos a los compartimentos de residuos vegetales superficiales y subsuperficiales, respectivamente, y distribuidas entre las fracciones estructurales y metabólicas (Figura 2.4 y c.f. Submodelo materia orgánica, Figura 2.1). La incorporación de biomasa foliar al suelo requiere ciertos ajustes cuando la misma es provocada por remoción (tala) u otro tipo de disturbios. En tales casos, la concentración foliar de nutrientes corresponde a la de hojas activas y por lo tanto la tasa de retorno de los mismos es mayor. Los compartimentos que representan a la biomasa muerta de ramas finas, madera y raíces gruesas (Figura 2.4) reciben aportes de materia desde sus correspondientes fracciones activas (leñosas), y cada una de tales transferencias es gobernada por una tasa específica. Finalmente, los compartimentos de biomasa leñosa muerta transfieren materia al suelo siguiendo el mismo mecanismo de descomposición de los residuos vegetales estructurales (c.f. sub-modelo materia orgánica), la fracción lignina se dirige a la fracción orgánica estable y la restante hacia las fracciones activas superficiales y subsuperficiales. Las tasas de transferencia de las fracciones leñosas al suelo son afectadas por factores de reducción que dependen del efecto de la temperatura y la humedad sobre la tasa de descomposición, e incluyen el cálculo de las pérdidas de CO<sub>2</sub> por respiración durante este proceso.

#### *Combinación de submodelos en el caso de sabanas*

Se trata de un sistema mixto bosque-pastizal que utiliza ambos sub-modelos en forma conjunta. La diferencia fundamental en este caso es que la producción total es obtenida mediante la suma de las producciones del bosque y del pastizal. Esta última, sin embargo, es afectada por efecto del sombreado mediante el cálculo de un factor de reducción que depende de la cobertura y de la biomasa foliar del estrato arbóreo (Apéndice I – Fig. I). De esta forma, el aumento de la cobertura y/o de la biomasa foliar forestal, disminuye la producción de pasto. El efecto de fuego puede ser igualmente simulado bajo el sistema sabana en forma independiente para ambos estratos vegetales, de manera que la frecuencia e intensidad de incendios puede ser ajustada para cada situación. De esta forma, las quemadas de pastizales pueden ocurrir con mayor intensidad y frecuencia, aún sin generar pérdidas por combustión del estrato leñoso. En este submodelo se asume que la distribución y el establecimiento de las especies forestales no son regulados ni influidas por el fuego.

La competencia por N es otro de los ejes centrales que describen la interacción entre ambos estratos de vegetación. Los factores que controlan dicha interacción en el modelo son el área basimétrica del estrato arbóreo, la disponibilidad de N total y las características de sitio (potenciales) que definen a la producción forestal. La fracción de N disponible para la absorción por el estrato arbóreo es calculada en función del área basimétrica (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) y del N mineral disponible (Apéndice I – Fig. J). La fracción de N disponible para la absorción por el pastizal es igual a uno menos la fracción absorbida por el estrato arbóreo. Si el pastizal no absorbe todo el N disponible, el remanente es adicionado a la fracción de N disponible para el estrato arbóreo. Dos parámetros de sitio específicos en el submodelo sabana son el factor de potencial de sitio (SITPOT) y el factor de conversión del área basimétrica, que calcula su valor en función del nivel de C presente en el compartimento de biomasa leñosa del estrato arbóreo. El parámetro SITPOT controla en que medida el

pastizal es dominado por el bosque con el mínimo número de individuos posibles en este último.

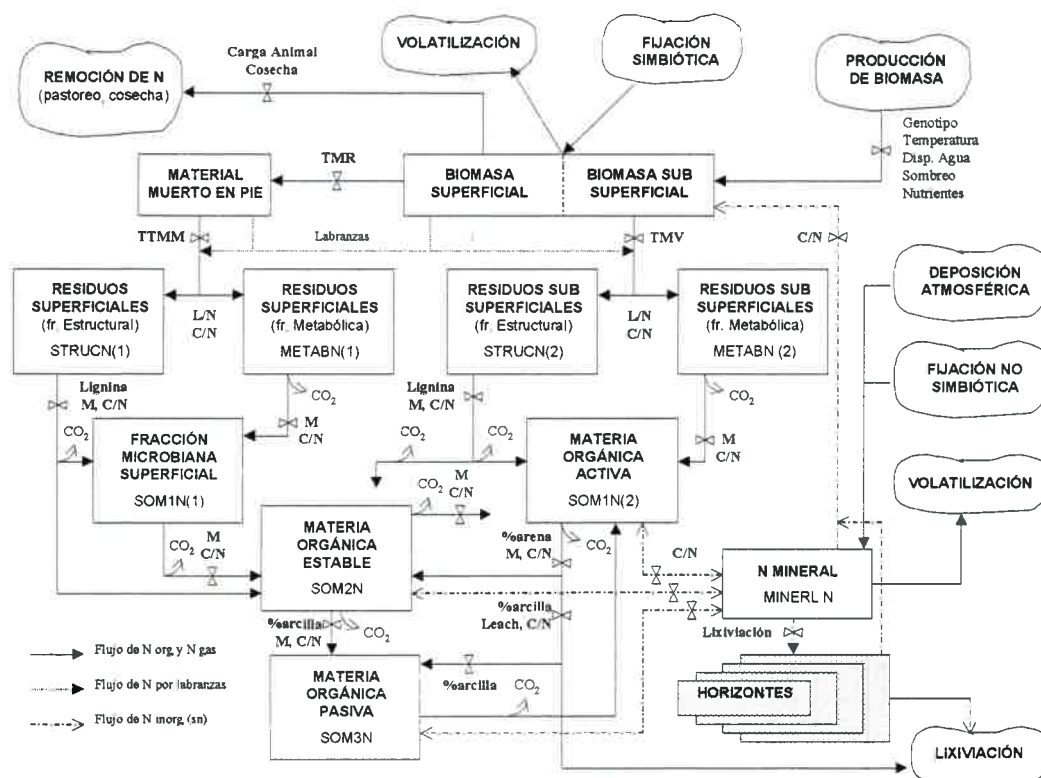


Figura 2.5: Esquema representando la conceptualización del submodelo N en Century

## 2.5 El submodelo Nitrógeno

El submodelo N presenta una estructura similar al correspondiente a materia orgánica (Figura 2.5). El flujo de N sigue los mismos pasos que el de C, y es estimado a través de la magnitud del flujo de C y de la relación C/N de la variable de estado que recibe el carbono. La relación C/N de los compartimentos estructurales (150) es mantenida constante, mientras que el contenido de N en los compartimentos metabólicos varía en función del contenido de N del material residual aportado, así como la relación C/N de la biomasa microbiana superficial que se genera como consecuencia (aumenta cuando los residuos presentan poco N). La relación C/N de la materia orgánica que ingresa a cada una de las fracciones orgánicas edáficas varía en función lineal con el contenido de N mineral. Así, a medida que el contenido de N en el horizonte superficial aumenta de 0 a 2 g m<sup>-2</sup>, las relaciones C/N decrecen de 15 a 3 para la fracción activa, de 20 a 12 para la fracción estable y de 10 a 7 para la fracción pasiva. La relación C/N de la fracción estable que es generada a partir de la biomasa microbiana superficial depende y es función de la relación C/N de esta última.

El modelo asume que el N asociado con la fracción de C que se pierde durante la respiración (30 a 80% del flujo de C es respirado) es mineralizado. Dadas las relaciones



C/N de cada una de las variables de estado y las pérdidas por respiración microbiana asociadas a cada flujo de C en el sistema, los procesos de descomposición de los residuos metabólicos y de las fracciones activa, estable y pasiva determinan la mineralización neta de N, mientras que la descomposición de los residuos estructurales determina la inmovilización de N.

El modelo utiliza ecuaciones simples para representar los aportes de N por deposición atmosférica y por fijación (del suelo y de la vegetación). La deposición atmosférica es una función lineal del régimen de precipitaciones. Para el cálculo de la tasa de fijación de N por el suelo, el modelo permite optar entre el empleo de una función que depende de la relación entre el contenido de N mineral y de P lábil (alta tasa de fijación a menores N/P) o, del mismo modo, de una función lineal del régimen de precipitaciones. Sólo se asume la ocurrencia de fijación simbiótica cuando el N mineral es insuficiente para abastecer los requerimientos de la vegetación, y su valor puede alcanzar un cierto nivel de g N fijado por g C fijado, específico para cada pastizal y en relación con su tasa de crecimiento (Parton *et al.*, 1992).

Las pérdidas de N por lixiviación se encuentran relacionadas con la textura y con la dinámica del agua dentro del perfil (c.f. balance hídrico, Sección 2.2). Tales pérdidas son acumuladas en la capa inferior al último horizonte de suelo considerado o se pierden por percolación profunda. Pérdidas de N orgánico solo ocurren en forma asociada a la lixiviación de materia orgánica. El modelo calcula, asimismo, las pérdidas de compuestos gaseosos nitrogenados generados en los procesos de mineralización, nitrificación, denitrificación y volatilización (pastizales maduros, senescentes). Por último, las pérdidas de N debidas al fuego, a la transferencia en las heces animales y a los procesos erosivos son igualmente consideradas.

### 3. La región de trabajo

El área bajo estudio comprende una amplia región del centro de Argentina, donde es posible identificar amplios gradientes ambientales y socioeconómico - culturales. Sumado a las variaciones en atributos climáticos, geológicos y geomorfológicos, que definen el patrón de distribución de suelos y vegetación, existe en grado consecuente una amplia gama de actividades agropecuarias. Esto permite identificar zonas con historias de uso y manejo contrastantes, que resultan en variaciones de importancia en las características de los agroecosistemas actuales. La coexistencia de zonas de colonia agrícola sometidas a elevada presión de uso durante los últimos 100 años, otras de reciente incorporación mediante desmonte, zonas típicamente – por razones físicas pero también culturales – ganaderas extensivas, así como las situaciones intermedias y las particularidades de la actividad antrópica en cada sub-región, conforma un mosaico de situaciones de gran utilidad para la validación del modelo. Este capítulo presenta los criterios para la selección de las situaciones a estudiar, y brinda una zonificación y caracterización biofísica y socioeconómica de la región bajo estudio.

#### 3.1 Selección de las situaciones a estudiar

El desarrollo de determinadas actividades en una cierta zona o sub-región responde a múltiples variables socioeconómicas, culturales y, por supuesto, ambientales. Sin embargo, es la definición de resistencia y resiliencia de los ecosistemas transformados la que permite ligar los aspectos utilitarios y ecológicos, debido a su interrelación causal. Bajo esta conceptualización, es posible acotar la variabilidad de combinaciones entre atributos ambientales y esquemas de uso de la tierra observadas, y seleccionar un número de situaciones representativas que caractericen a cada sub-región identificada. De esta forma, dos criterios centrales fueron utilizados para la adopción de un sistema de subdivisión geográfica de entre los varios existentes, así como para la selección de las situaciones a estudiar, respetando la representatividad trans-escalar (Figura 3.1).

En primer lugar se empleó el criterio de gradientes ambientales (biofísicos) a diferentes niveles jerárquicos. A escala regional se jerarquizaron los gradientes geológicos - fundamentalmente granulometría y estratigrafía de los sedimentos -, geomorfológicos y climáticos. A nivel sub-regional, las variaciones en los tipos fisonómicos de la vegetación y en la distribución de suelos fueron jerarquizadas. A escala local se empleó como criterio central el uso de la tierra actual e histórico, aunque en estrecha relación con diferenciaciones más detalladas de los aspectos geomorfológicos, edáficos (toposecuencia) y florísticos. Es necesario destacar que la jerarquización de los factores relevantes para el análisis de la génesis y evolución de la materia orgánica edáfica al nivel de (agro) ecosistema, responde a su vez a los requerimientos en calidad y cantidad de información necesaria para ‘alimentar’ al modelo. Las características del material

originario del suelo, de los regímenes hídricos y térmicos, y de la vegetación natural, son los factores de mayor peso en el contexto conceptual del modelo CENTURY, es decir, aquellos para los cuales el modelo presenta mayor sensibilidad (Parton *et al.*, 1992). No obstante, entre los gradientes ambientales seleccionados existe una clara continuidad estructural y funcional en la región.

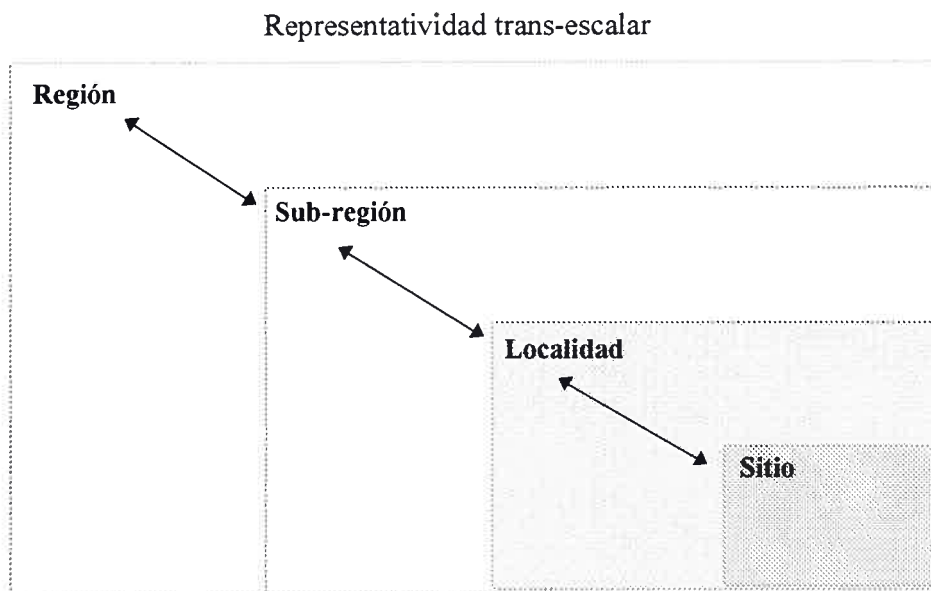


Figura 3.1: Esquema ilustrando el criterio de representatividad de las observaciones a través de diferentes escalas. La selección de situaciones a estudiar se realizó de modo que lo observado en un determinado sitio sea representativo para la localidad o área, y que ésta a su vez represente a las situaciones modales dentro de la sub-región. Las sub-regiones representan las grandes unidades geomorfológicas en que puede dividirse a la región central de Argentina.

En segundo lugar, un factor de índole práctica fue de la mayor relevancia a la hora de seleccionar las situaciones a estudiar: la existencia de una condición ecológica poco o no alterada, es decir, lo más 'cercana' posible al estado estacionario (*situación de equilibrio*) del ecosistema, que garantice representatividad en las características cuali-cuantitativas de la fracción orgánica como consecuencia de los factores formadores confluentes, sin incluir al factor antrópico en forma directa. Este tipo de condiciones, como es de esperar, fue hallado con mayor frecuencia en zonas predominantemente ganaderas. Por el contrario, en diversas situaciones de predominio agrícola, como en las zonas de 'colonia' (de elevada fragmentación espacial) e incluso en zonas mixtas, la identificación de tales condiciones 'naturales' fue prácticamente imposible y se recurrió a situaciones de baja alteración o en recuperación prolongada con leve intervención. Diferentes soluciones de compromiso fueron consideradas y supuestos asumidos para resolver la ausencia de información, y se harán debidamente explícitos en cada caso. No obstante, para cada situación, se identificaron amplias variantes en el patrón de uso y manejo histórico y actual de la tierra, a fin de corroborar la sensibilidad del modelo frente a éstas.



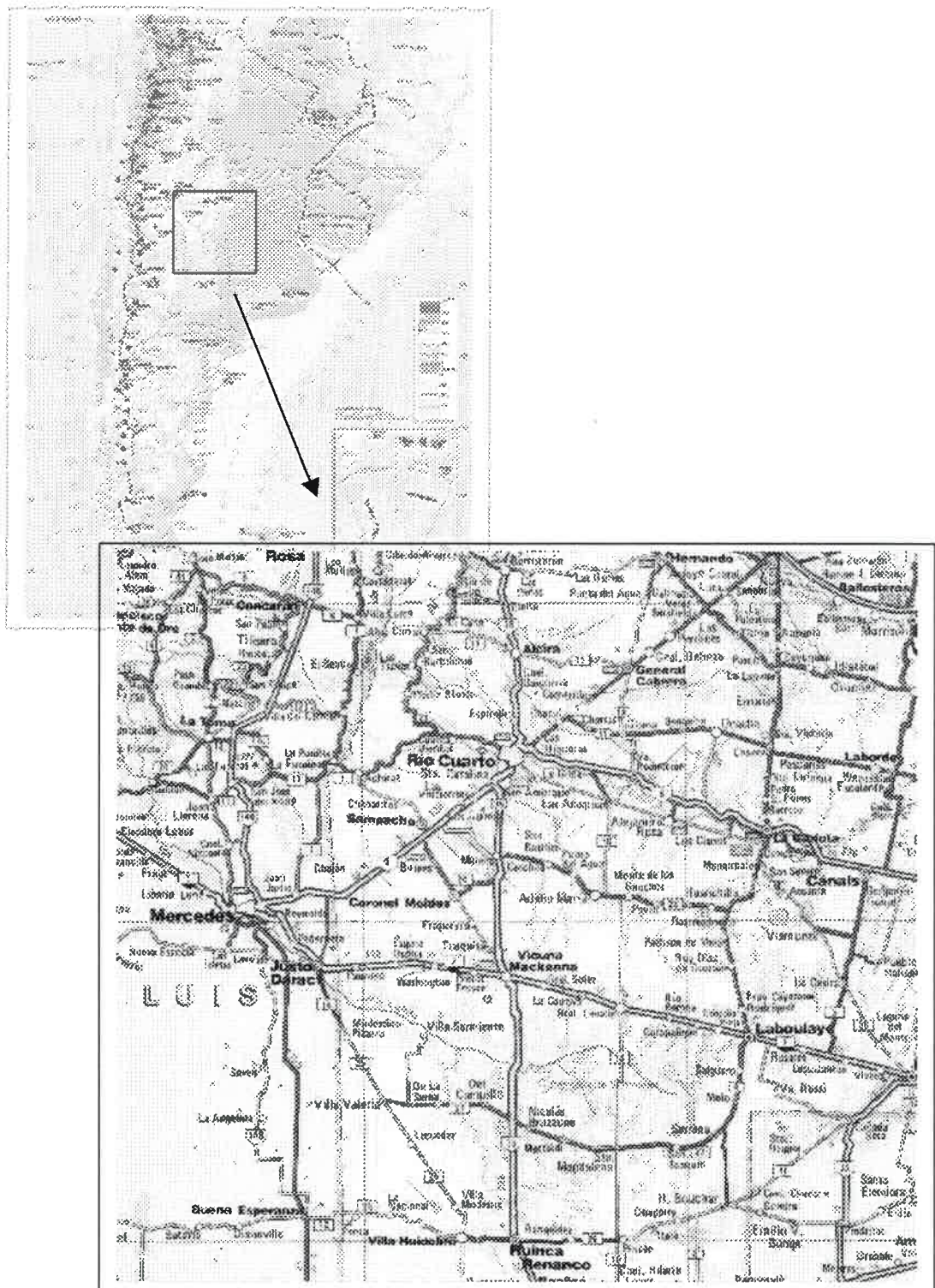


Figura 3.2: Ubicación geográfica del área de trabajo. Mapa altimétrico de la República Argentina (escala aproximada. 1:100000000) ilustrando el gradiente de situaciones presentes en la región, y mapa geopolítico de la misma, indicando la red vial y las principales poblaciones.



### 3.2 Ubicación y estratificación sub-regional

El área sobre la cual se realizó el relevamiento de los niveles de C edáfico corresponde a las porciones Sur de la Provincia de Córdoba y Centro-Este de la Provincia de San Luis, Argentina, entre los 32°30' y 35°00' grados de latitud Sur y entre 63°00' y 66°00' de longitud Oeste (Figura 3.2). Sin embargo, el alcance regional de los resultados de esta validación incluye a las regiones periféricas contiguas de las provincias de La Pampa, Buenos Aires y Santa Fe, hasta donde se extienden las mismas condiciones agroecológicas representadas en el área relevada. La región de trabajo propiamente dicha abarca la zona comprendida entre el extremo sur del sistema serrano de Comechingones (desde la localidad de Alpa Corral hacia el sur) y su pedemonte oriental, al oeste, atravesando todo el gradiente de factores ambientales y de uso de la tierra sobre las llanuras eólicas loésicas y arenosas bien drenadas, con relieves normales y subnormales, hasta el extremo sudeste de la Provincia de Córdoba (zona de influencia de las localidades de La Carlota y Labouaye). Esta última es una zona representativa de las condiciones de humedal salino que abarcan buena parte del centro de Argentina.

El límite norte del área bajo estudio lo constituye aproximadamente la porción sur de la cuenca del arroyo Tegua, abarcando las zonas agrícolas aledañas a las localidades de General Deheza (en especial hacia el oeste de la misma) y General Cabrera, y una línea convencional que sigue en dirección sudeste hacia las localidades de Uchacha y Santa Eufemia. El límite sur lo constituye aproximadamente el cauce del río Quinto, incluyendo a las zonas mixtas y ganaderas sobre suelos arenosos de Vicuña Mackenna, Villa Valeria y Villa Mercedes en la provincia de San Luis, y hacia el sudoeste se incluye una zona medanosa de drenaje arreico-endorreico, principalmente ganadera extensiva, que se extiende hacia el sudeste de esta provincia, hasta la localidad de Buena Esperanza.

De esta forma, el área bajo estudio incluye cuatro sub-regiones con paisajes claramente diferenciados por sus atributos y funcionalidad, así como por su vocación cultural y uso histórico y actual de la tierra. Los mismos fueron agrupados de la siguiente forma: (i) *Llanuras bien drenadas*, (ii) *Llanuras mal drenadas*, (iii) *Llanuras medanosas* y (iv) *Area serrana y pedemonte*. Las primeras dos sub-regiones se encuentran definidas en el extremo sur de la provincia de Córdoba, mientras que las últimas incluyen además la porción centro-este de la Provincia de San Luis. Estas áreas fueron subdivididas de acuerdo a los criterios biofísicos *de mayor importancia en cada caso* (i.e. geológicos, geomorfológicos, florísticos) para una mejor diferenciación de los factores relevantes en la determinación de los niveles de materia orgánica edáfica. A un nivel de mayor detalle, se seleccionaron paisajes 'tipo' de acuerdo a la división por regiones y asociaciones geomorfológicas, y/o por comunidad vegetal en ciertos casos, siguiendo los criterios desarrollados por una serie de autores en diversos estudios previos para la región (Cantú y Degiovanni, 1984 – ver Imagen 1, en pág. 183; Cantú y Cantero, 1981; Cantero *et al.*, 1981, 1984; Anderson *et al.*, 1970; Bianco *et al.*, 1987; Peña Zubiarte *et al.*, 1980).

Para caracterizar a las sub-regiones se hizo hincapié en aquellos factores de mayor importancia en el control de los niveles de materia orgánica edáfica – aquellos para los cuales el modelo debería mostrar mayor sensibilidad. Son, en definitiva, los que definen el carácter de esta validación y su posterior utilidad. Sin embargo, el criterio de selección de

situaciones a estudiar varió entre sub-regiones de acuerdo a sus particularidades (por ejemplo, el efecto del drenaje resulta más importante para la sub-región llanuras mal drenadas, mientras que el efecto de la vegetación adquiere mayor peso en paisajes donde conviven formaciones vegetales herbáceas y arbóreas, etc.).

*(i) Llanuras bien drenadas*

Esta sub-región ocupa el sector noreste del área bajo estudio, abarca una superficie mayor a 1.500.000 ha, y comprende la mayor parte de los departamentos de Río Cuarto y Juárez Celman, así como una porción del sector sur de los departamentos de Tercero Arriba y San Martín, en la provincia de Córdoba. Es la zona productiva de mayor importancia agrícola en el sur de esta provincia - y de la región en general - y es por ello que presenta el mayor grado de intervención antrópica, resultando dificultoso el hallazgo de situaciones naturales o de baja alteración (Imagen 2). Limita al oeste con la estrecha faja pedemontana de las sierras de Comechingones, hacia el sudoeste y normalmente a través de suaves gradientes con las llanuras medanosas (ruta nacional N° 7, en forma aproximada), y hacia el sudeste con las llanuras mal drenadas, presentando intrusiones recíprocas de ambos tipos de paisaje a lo largo de sus límites. El límite norte fue establecido siguiendo aproximadamente el curso del arroyo Tegua, desde la localidad de Gigena hasta su confluencia con el arroyo Carerillo, y de allí hacia el sur-sudeste (ruta provincial N° 4) en dirección de Uchaca, Santa Eufemia y La Carlota. El río Cuarto atraviesa a la sub-región por su parte central, transportando los caudales recolectados por los ríos que nacen en la pendiente oriental de las sierras.

*(ii) Llanuras mal drenadas*

La sub-región se ubica en el cuadrante sudeste de la provincia de Córdoba, entre los 33° 20' y 34° 20' Sur y los 63° 10' y 64° 00' Oeste, un área que corresponde a los departamentos de Juárez Celman y Roque Saenz Peña, y que se encuentra aproximadamente delimitada al norte y al sur por las rutas nacionales N° 8 y 7, respectivamente. Las localidades de La Carlota y Laboulaye son las de mayor importancia en la sub-región, las cuales se encuentran unidas por la ruta provincial N° 4, de dirección sur-norte (Imagen 3).

*(iii) Llanuras medanosas*

Bajo el nombre de sub-región Llanuras Medanosas se incluye a una vasta región internamente heterogénea, con límites establecidos arbitrariamente de acuerdo a la disponibilidad de sitios de muestreo que satisfagan el diseño de los gradientes biofísicos, que representen al patrón de uso de la tierra zonal, y que conserven situaciones de nula o baja alteración del ecosistema (Imágenes 4 y 5). Comprende al cuadrante sudoeste de la provincia de Córdoba y al sector centro-este de la provincia de San Luis. Se desarrolla latitudinalmente entre los 33° 30' y 35° S, y longitudinalmente entre 64° y 66° O, aproximadamente. En la provincia de Córdoba abarca a los Departamentos de Río Cuarto (su extremo sur) y de General Roca. En la provincia de San Luis abarca los Departamentos de General Pedernera y el extremo norte de Gobernador Vicente Dupuy. La ruta nacional N° 35 constituye aproximadamente el límite este de la sub-región

mientras que la ruta nacional N° 7 entre Vicuna Mackenna y Villa Mercedes estaría limitando al norte, aunque los alrededores de esta última ciudad hacia el norte (Coronel Alsogaray) y la zona al sur de la localidad de Chaján, fueron igualmente incluidos. El límite sur lo constituyen arbitrariamente las rutas provinciales N° 12 en San Luis (Buena Esperanza) y N° 26 en Córdoba (Villa Huidobro), aunque estas condiciones agroecológicas se prolongan hacia el sector norte de la provincia de La Pampa. Hacia el oeste el límite está representado en forma bastante aproximada por la isohieta de los 500 mm, con lo que se incluye a una franja de unos 20 a 30 km de ancho hacia el oeste de la ruta nacional N° 148.

#### *(iv) Area serrana y pedemonte*

Esta sub-región pertenece a la provincia geomorfológica ‘Sierras Pampeanas’ e incluye el sector sur del sistema serrano de Comechingones y los sistemas de Los Cóndores y Las Peñas (Cantú y Degiovanni, 1984). Abarca un a superficie cercana a las 300.000 ha y una altitud aproximada de 2000 msnm, al norte de la sub-región considerada (Localidad Río de los Sauces), y de 950 msnm al sur (entre las localidades de Achiras y La Punilla). Su desarrollo este-oeste se reduce consecuentemente hacia el sur, siendo de 40 y 10 km de ancho en las situaciones mencionadas, respectivamente (Imagen 6). El área pedemontana, con una superficie aproximada de 84.000 ha, constituye una estrecha faja de 3 a 5 km de ancho que bordea al cordón serrano hacia el este.

### **3.3 Gradientes geológicos y geomorfológicos**

#### *(i) Llanuras bien drenadas*

Esta sub-región presenta una elevada heterogeneidad interna que permite su subdivisión mediante criterios geológicos y geomorfológicos. Pertenece a lo que Cantú y Degiovanni (1984) denominaron ‘Región eólica-loéssica subhúmeda’ (Imagen 1), caracterizada por la dominancia de rasgos geomorfológicos que responden a una dinámica eólica, mientras que los fenómenos hídricos aparecen subordinados (formas más antiguas, aisladas, parcialmente cubiertas). Estos autores describen cinco asociaciones geomorfológicas diferentes dentro de la sub-región bajo estudio. La subdivisión propuesta aquí distingue a las ‘*llanuras bien drenadas fuertemente onduladas*’, que corresponden a la asociación geomorfológica ‘Faja eólica ondulada periserrana’, de acuerdo a Cantú y Degiovanni (1984). Las ‘*llanuras bien drenadas moderado a suavemente onduladas*’ (Bricchi, 1996) corresponden a la asociación ‘Planicie loéssica antigua de Malena’, e incluye a las ‘Depresiones tectónicas nacientes de arroyos’ que se presentan como áreas mal drenadas dentro de la sub-región y que no serán incluidas en este estudio. Las asociaciones que estos autores denominaron ‘Planicie de acumulación-deflación de General Cabrera’ y parte de la ‘Planicie de acumulación-deflación, con lagunas, de Uacha’ son consideradas en este estudio dentro de las ‘*llanuras bien drenadas con relieve subnormal*’ que corresponden a áreas planas, con la freática profunda, y que presentan sectores de paisaje eólico sobrepuesto. Una descripción mas detallada de estas asociaciones se presenta en el Apéndice II - 1.

(ii) *Llanuras mal drenadas*

Esta extensa llanura de aproximadamente 6500 km<sup>2</sup> pertenece a la región geomorfológica definida por Cantú y Degiovanni (1984) como fluvial subhúmeda, dentro de la llanura Chacopampeana, específicamente a la asociación geomorfológica 'Derrames de los ríos Cuarto y Quinto' (Imagen 1), ya que su génesis corresponde a la acción conjunta de estos cursos de agua, evidenciado a través de una intensa paleoactividad fluvial. Sedimentaciones eólicas posteriores cubrieron parcialmente a estas geoformas iniciales, imprimiéndole sus rasgos actuales. Según estos autores existen rasgos que indican que las cuencas de ambos ríos confluían en algún punto dentro de la llanura aluvial, probablemente al norte de la localidad de Curapaligüe, aunque actualmente ambos cauces desembocan en forma independiente, el río Cuarto en los bajos del Saladillo y el río Quinto en los bañados de La Amarga. La existencia de dos bloques de magnitud geomorfológica condiciona el drenaje general de la sub-región, causando acumulaciones superficiales y ascenso del nivel freático: el bloque Viamonte- Canals, hacia el este, y el bloque Levalle-Adelia María, hacia el oeste (Cantú y Cantero, 1981). En el Apéndice II – 2 se profundiza sobre las consecuencias que estas geoformas imprimen sobre la hidrología de la sub-región.

En la sub-región se reconocen diferentes superficies geomorfológicas: catenas de longitud y pendientes variables, células cóncavas, convexas, planas y sus diferentes combinaciones, las que se vinculan hidrológicamente (Cisneros, 1994). Lunetas de arcilla asociadas a las lagunas en diversas posiciones indican las antiguas líneas de costa en diferentes períodos de evolución. Elementos tales como médanos longitudinales, áreas de acumulación-deflación y médanos dispersos recientes parcialmente activos señalan los efectos de la geodinámica eólica sobre el paisaje actual (Cantú y Degiovanni, 1984). Existe, por lo tanto, una elevada heterogeneidad en las características de los materiales originarios en toda la llanura fluvial, de acuerdo a la diferente intensidad de los factores formadores del paisaje. En los sectores del paisaje netamente fluviales el rango granulométrico oscila entre texturas francas a franco arcillosas, mientras que para los elementos con rasgos eólicos predominan los materiales franco arenoso a arena francos. Los perfiles de suelo son mucho más evolucionados en los primeros casos, y es posible además encontrar perfiles poligenéticos que indican procesos complejos de formación de suelos, alternando ciclos fluviales y eólicos (Cisneros, 1994).

(iii) *Llanuras medanosas*

El paisaje se presenta como una extensa planicie medanosa, con relieves normales suavemente ondulados, muy suavemente ondulados, e incluso planos tendidos en ciertas áreas, o fuertemente ondulados en otras. Se observan pendientes cortas de hasta 12%, así como pendientes muy largas con gradientes de entre 0,3 y 3%. La presencia de médanos de diferentes edades y magnitudes, vivos o fijados, naturales o antrópicos, definen a los diferentes sectores característicos de esta sub-región. La superficie ocupada por médanos es muy variable, pudiéndose estimar para el total del área entre un 10 a un 15%, aunque no uniformemente distribuidos. Se reconocen dos generaciones de médanos: los más antiguos son longitudinales y constituyen la base medanosa, y los posteriores - de un



amplio rango de edades - presentan formas parabólicas o pseudoparabólicas. En el Apéndice II - 3 se describen las diferentes formaciones medanosas que se observan en la sub-región. La procedencia de los materiales arenosos que dieron origen a estos paisajes es tema de discusión, aunque existen elementos probatorios de que podrían provenir de las llanuras aluviales desérticas del sudoeste (sistema Desaguadero-Salado) y parcialmente de los depósitos aluviales del río Quinto (Cantú y Degiovanni, 1984). Hacia el sur de la sub-región, aunque principalmente fuera de sus límites, se desarrollan planicies loésicas muy calcáreas con sedimentos francos a franco-limosos pardo-oscuros del terciario. Este sedimento, redepositado y entremezclado con otros actuales de textura arenosa, constituye el material originario de los suelos desarrollados sobre áreas planas a ligeramente deprimidas hacia el extremo sudoeste de la sub-región (INTA, 1998).

Consecuentemente, en la sub-región se reconocen diferentes paisajes. En la provincia de Córdoba, en la asociación geomorfológica 'Llanura medanosa del río Quinto' (Cantú y Degiovanni, 1984 - Imagen 1), se distinguen las *Llanuras bien drenadas medanosas*, que se prolongan hacia el oeste a la provincia de San Luis, y las *Llanuras bien drenadas con afloramientos de tosca*, asociadas al cauce del río Quinto y a los sedimentos loessoides del extremo sur (Llanura loésica de Arizona - INTA, 1998). En la provincia de San Luis, desde la margen izquierda del río Quinto hacia el norte, se reconoce a la *Llanura arenosa en parte loésica* (de Justo Daract - INTA, 1998), hacia el oeste de Villa Mercedes a la *Llanura arenosa ligeramente ondulada*, y hacia el sur y oeste de los límites de la sub-región a la *Llanura medanosa con lagunas permanentes* (Peña Zubiarte, comunicación personal). Cada una de estas unidades será incluida en la validación del modelo.

#### (iv) Area serrana y pedemonte

El estilo tectónico de este sector de las sierras pampeanas está caracterizado por la presencia de mega-estructuras de rumbo aproximadamente meridional que delimitan bloques basculados con escarpa abrupta hacia el oeste y pendiente suave tendida al este, cuyo desarrollo inicial corresponde a los periodos Precámbrico y Paleozoico (Gordillo y Lencinas, 1979). Asociadas a estas grandes fallas se observan estructuras de menor magnitud que controlan rasgos menores tales como la disposición de la red de drenaje (Cantú y Degiovanni, 1984). La litología ejerce un control importante en la evolución de los rasgos geomorfológicos. Se reconoce en la sub-región un basamento integrado por rocas metamórficas (anfíbolitas, mármoles, etc.) y por rocas ígneas preferentemente de composición granítica. También se reconocen algunos cuerpos ultrabásicos muy localizados (Cantú y Degiovanni, 1984).

El sistema presenta una asimetría geomorfológica bien marcada entre las laderas este y oeste, y una estructura en bloques con diferente desplazamiento en sentido vertical e inclinación. Como consecuencia del ascenso y estructuración de las sierras actuales, sólo se observan vestigios de una antigua superficie de erosión (peniplanicie) cuyos relictos constituyen actualmente las denominadas pampas de altura (Cantú y Degiovanni, 1984). Este patrón de paisaje caracterizado por una antigua peniplanicie cristalina (gneiss) con intrusiones graníticas es bastante uniforme en toda la sub-región (Gordillo y Lencinas, 1979). En general, el área presenta un relieve abrupto y complejo, con pendientes de longitud variable y gradientes de hasta el 45%. El paisaje se compone de quebradas, valles



interconectados y pampas de altura, que son planicies suavemente onduladas con pendientes entre 1 y 2%. Generalmente, éstas superficies conservan una espesa cobertura loésica producto de la intensa meteorización de las rocas ígneas y metamórficas. En los valles o en áreas con leves procesos de erosión hídrica se pueden observar suelos de gran desarrollo, algunos con características vérticas, que no corresponderían a los climas actuales (Cantú, 1998). El pedemonte está representado por depósitos aluviales y coluviales que afloran en una estrecha faja debido a que están cubiertos por mantos loésicos del Pleistoceno superior y Holoceno. Se trata de conos aluviales coalescentes con distinta cobertura eólica, pendientes cortas y medias de 3 a más de 15% (Cantú y Degiovanni, 1984).

### 3.4 Gradientes climáticos

#### *(i) Llanuras bien drenadas*

La sub-región presenta un clima templado subhúmedo con estación seca, mesotermal, con variaciones asociadas a la evolución de los gradientes hidro-térmicos regionales y también sub-regionales, debido al control que ejercen las sierras hacia el oeste. Las estaciones meteorológicas en la zona han proliferado en los últimos años, razón por la cual en muchos casos las series de datos no son prolongadas. Muchos de ellos – especialmente pluviométricos – han sido obtenidos por cesión de los productores locales y publicados en trabajos previos (Tabla 3.1). La temperatura media anual oscila con mayor amplitud hacia el sur de la sub-región (cf. Gral. Deheza y Río Cuarto), aunque con una media anual similar de 16,5 °C. Las lluvias se producen en la zona principalmente por el choque frontal de masas de aire cálido y húmedo del N-NE contra masas de aire frío y seco del S-SO, aunque la influencia de fenómenos convectivos locales aumenta con la proximidad a las sierras. Entre Octubre y Febrero llueve en promedio el 66,7% del total anual (43 - 82%). El promedio de precipitaciones anuales sub-regional es de 757 mm, con un valor de 1106 mm para los tres años mas lluviosos y de 561 mm para los tres mas secos (en el período 1951 -1994), aunque existe un aumento considerable de la cantidad, intensidad y variabilidad de las precipitaciones hacia el oeste (e.g. Los Chañares: 912 mm, La Aguada: 822 mm, Las Lajas: 866 mm, ver Apéndices III y V - 3).

#### *(ii) Llanuras mal drenadas*

La sub-región se ubica en el dominio semiseco con tendencia al semihúmedo, con gran uniformidad térmica, mesotermal, y sin exceso de agua (Cisneros, 1994). De acuerdo a la clasificación de Thornwaite presenta un tipo climático subhúmedo-seco (índice hídrico entre 0 y -20). El régimen de precipitaciones es de tipo monzónico, concentrándose el 75% de las mismas entre Octubre y Marzo. La variabilidad de las precipitaciones se advierte en los coeficientes de variación (Tabla 3.1). La temperatura media en la sub-región es de 16 °C, mientras que las máximas fluctúan por encima de 20 °C y las mínimas por debajo de 10 °C. La máxima absoluta fue de 46,3 °C (Enero) y la mínima absoluta de -10,8 °C (Julio). Los vientos predominantes son del norte y del sur, aunque la frecuencia de vientos del este aumenta durante el verano, de los del oeste-sudoeste en invierno. El

balance hídrico resultante presenta excesos (Apéndice III – Fig. C) durante tres meses (Febrero a Abril), déficits en dos épocas del año (Mayo a mediados de Junio y mediados de Noviembre hasta Enero, inclusive) que totalizan aproximadamente cuatro meses, y situaciones de equilibrio durante el resto (mediados de Junio hasta fines de Octubre). La sub-región se encuentra en la zona de transición (de este a oeste) entre los regímenes de humedad del suelo údico y ústico, estimado a partir de valores climáticos (Van Wambeke y Scoppa, 1976). Las geoformas existentes y la dinámica hidrológica local y regional determinan la existencia frecuente de regímenes ácuicos. El régimen de temperatura del suelo corresponde al caracterizado como térmico, media anual entre 15 °C y 22 °C, y diferencias entre verano e invierno mayores a 5 °C, a los 0,5 m de profundidad.

Tabla 3.1: Temperaturas medias y precipitación anual medidas en algunas localidades dentro de las cuatro sub-regiones

Localidad	Temperatura media (°C)			Precipitación anual (mm)			Fuente
	Media	Mínima	Máxima	Media	Desvío	Período	
<i>(i) L. bien drenadas</i>							
Gral. Deheza	16,5	9,6	22,8	763	44	1951-91	[1]
Río Cuarto	16,5	8,8	23,5	790	35	1974-93	[2]
La Aguada	16,6	9,8	23,3	822	48	1994-99	[2;3]
<i>(ii) L. mal drenadas</i>							
Laboulaye	16,6	10,1	24,7	754	162	1903-73	[4]
P. de Melo	16,2	9,8	23,4	725	171	1917-90	[4]
<i>(iii) L. medanosas</i>							
B. Esperanza	15,4	6,7	24,0	489	29	1921-50	[1]
V. Mercedes	16,3	7,9	24,7	664	151	1961-90	[5]
V. Mackenna	17,3	8,8	25,8	815	198	1994-99	[2]
<i>(iv) Sa. y pedemonte</i>							
700 msnm	14,9	4,6	25,1	860	142	1994-99	[6]
1400 msnm	12,7	-0,4	25,9	1100	370	1994-97	[6]

Fuentes: [1] De Prada *et al.*, 1994; [2] Cátedra de Climatología UNRC; [3] Cantu, 1998; [4] Cisneros, 1994; [5] Cátedra de Climatología UNSL; [6] Gonzalez, 1999.

### *(iii) Llanuras medanosas*

El clima de la sub-región se halla dentro de los templados con características de continentalidad marcada, ya que posee amplitudes térmicas medias superiores a 16 °C y extremas – diferencia entre máxima y mínima absoluta anuales – que pueden superar los 50 °C. La media varía a través de la sub-región aunque puede considerarse bastante homogénea, en torno a los 16 °C, con un gradiente ligeramente negativo de norte a sur. Las heladas son de regular intensidad, desde principios de Mayo hasta fines de Septiembre. La humedad relativa es de 62% en promedio; el valor anual de nubosidad es de 50 días, siendo una de las zonas del país con mayor número de días con cielo claro. Las precipitaciones disminuyen de este a oeste, y se concentran principalmente en verano (40%), con inviernos secos (7%). La precipitación anual para e.g. Villa Mercedes fue de 664 mm durante el período 1961 – 1990, aunque registros medidos entre 1901 y 1920 arrojaron un promedio de 531 mm. El balance hídrico en prácticamente toda la sub-región

(suelos de baja capacidad de retención hídrica) muestra deficiencias de agua de diferente magnitud durante todo el año (Apéndice III – Fig. D). Debido a la ausencia generalizada de estaciones meteorológicas en esta sub-región se recurrió en muchos casos a interpolaciones lineales.

*(iv) Area serrana y pedemonte*

El clima de la sub-región varía ampliamente con la altitud, aunque en general es húmedo con veranos cortos y frescos e inviernos secos, vientos frecuentes y gran amplitud térmica. El régimen de precipitaciones es de tipo monzónico, con un período lluvioso de seis meses (primavera - verano) que concentra alrededor del 80% de las lluvias. Durante el invierno ocurren algunas precipitaciones en forma de nieve. Las precipitaciones aumentan con la altitud (Tabla 3.1). La temperatura media anual es de 12,7 °C a 1400 msnm, aunque durante los meses más cálidos (diciembre - enero) la máxima absoluta alcanza los 31 °C, mientras que durante los más fríos (junio-julio) la mínima absoluta es de -10 °C. Las heladas comienzan en mayo-junio y terminan en agosto-septiembre (Gonzalez, 1999). El balance hidrológico (Apéndice III – Figs. E y F) muestra seis meses con déficit hídrico aunque no en forma continua (entre mayo y julio, entre septiembre y octubre y levemente en diciembre) y, de acuerdo a la clasificación climática de Thornwaite (1943), el clima de la sub-región es de tipo sub-húmedo.

### 3.5 Formaciones vegetales originales y actuales

*(i) Llanuras bien drenadas*

La mayoría de los autores (Cabrera, 1976; Lutti *et al.*, 1979; León y Anderson, 1983; Bianco *et al.*, 1987) describen para esta sub-región dos provincias fitogeográficas: ‘El espinal’ (Distrito del Algarrobo) hacia el oeste y el centro, y la ‘Pampeana’ (Distrito Occidental) hacia el este, solo en un pequeño sector. Sin embargo, la desaparición de los bosques de Algarrobo y de otras leñosas que predominaban en la sub-región, provocó el avance de la estepa pampeana hacia el oeste, dificultando su delimitación. Las formaciones boscosas se reducen actualmente sólo a los márgenes de los cursos de agua. De acuerdo con Bianco *et al.* (1987), por su fisonomía y composición florística actual se puede dividir a la sub-región en tres unidades de vegetación, que son descritas en Apéndice IV - 1: la ‘Estepa gramínea con isletas de quebracho blanco’, la ‘Estepa gramínea’ y los ‘Bosques marginales’.

*(ii) Llanuras mal drenadas*

De acuerdo a sus formaciones vegetales la sub-región fue incluida inicialmente en lo que la mayoría de los autores denominan ‘Estepa Pampeana’ (Parodi, 1964; Ragonese, 1967; Cabrera, 1971). Con posterioridad, Cabrera (1976) la incluyó en el distrito Pampeano Occidental de la provincia fitogeográfica Pampeana, Lutti *et al.* (1979) la consideró dentro de la ‘Vegetación de Bañados y lagunas’ y León *et al.* (1984) como sub-región ‘Pampa interior’ dentro de la provincia fitogeográfica Pampeana. Luego Bianco *et al.* (1987) identificaron y describieron tipos fisonómicos principales: Monte, Arbustal halófito,

Estepa halófito y Pradera halófito, diferenciando al último de acuerdo a la dominancia de gramíneas o suculentas, tomando como base trabajos previos (Cantero y Bianco, 1986) en los que la vegetación fue estudiada hasta el nivel de especie. En estas publicaciones se destaca la gran riqueza florística de la sub-región y el ingreso de elementos de las provincias fitogeográficas vecinas (Chaqueña, Espinal y Pampeana).

Trabajos más recientes que consideran a la estructura del hábitat, las relaciones ambientales y los aspectos fitosociológicos en la distribución de las especies, e incorporan el empleo de técnicas numéricas más poderosas, han permitido determinar con exactitud los nodos o tipos de vegetación (Apéndice IV – 2) presentes en la sub-región (Cantero, 1993; Cantero y León, 1996, 1999; Cantero *et al.*, 1998 a y b; Cantero y Petryna, 1998). Los autores utilizan en forma alternativa el término Comunidad como un nivel de abstracción jerárquica en la organización de la vegetación, y será adoptado aquí con el mismo propósito. Los diferentes tipos de vegetación fueron agrupados en seis ecogrupos de acuerdo a su distribución según los gradientes ambientales (Cantero y León, 1999), y su relación con la estructura del hábitat fue determinada para la mayoría de los nodos descriptos (Cantero *et al.*, 1998a).

#### (iii) Llanuras medanosas

La sub-región pertenece en su mayor parte a lo que diversos autores denominan ‘Distrito Psamofítico’ de la provincia fitogeográfica del Espinal (Luti *et al.*, 1979; Cabrera, 1976), mientras que para otros pertenecería a la provincia fitogeográfica Pampeana (Ragonese, 1967; Parodi, 1964; León y Anderson, 1983). La vegetación natural predominante en la sub-región presenta el aspecto de una estepa gramínea con isletas de chañar (*Geoffroea decorticans*), ocupando generalmente estas últimas los casquetes de los médanos (Bianco *et al.*, 1987). En las cubetas intermédanos la vegetación varía sensiblemente respecto a la de los sitios adyacentes (Apéndice IV – 3). Otras formaciones vegetales encontradas en la sub-región, aunque en forma menos extendida, son el ‘Bosque de caldén’ (provincia fitogeográfica del Espinal, ‘distrito del caldén’, Cabrera, 1976) y el ecotono entre el ‘Bosque de quebracho blanco y algarrobo’ y el ‘Bosque de caldén’ (Anderson, *et al.*, 1970).

#### (iv) Sierra y pedemonte

Desde el punto de vista florístico el área se incluye dentro del ‘Parque Chaqueño’ (Parodi, 1964) o del ‘Parque Chaqueño Serrano’ (Ragonese, 1967), aunque en su máximo empobrecimiento, ya que muchas de las especies típicas del mismo no se encuentran a esta latitud, o son muy escasas (Bianco *et al.*, 1987), como el horcoquebracho (*Schinopsis haenkeana*), el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*), la tusca (*Acacia aroma*) y la manzana de campo (*Ruprechtia apetala*). La vegetación responde a cuatro tipos fisonómicos definidos por un gradiente de altitud, exposición, humedad disponible y características del sustrato. Se diferencian la ‘Estepa gramínea de altura’, el ‘Arbustal’, el ‘Bosque serrano’ y el ‘Monte’ (Bianco *et al.*, 1987) (Apéndice IV – 4). En el área pedemontana la vegetación natural se ha reducido notablemente debido al desmonte y laboreo, pero responde fundamentalmente al tipo fisonómico descripto para el sector basal de las sierras: un monte con predominio de espinillo y la presencia en mayor o menor



grado de isletas de chañar (*Geoffroea decorticans*), tala, moradillo, coco y algunos pocos ejemplares de algarrobo negro y blanco (*Prosopis nigra* y *alba*). Desde el punto de vista florístico constituye un ecotono entre los distritos 'Chaqueño serrano' y 'Chaqueño occidental' (Ragonese, 1967), con un empobrecimiento florístico notable debido al manejo y la latitud (Bianco *et al.*, 1987).

### 3.6 Tipos de suelo<sup>4</sup> desarrollados en la región

#### (i) Llanuras bien drenadas

La amplia variabilidad interna de la sub-región, particularmente en lo relativo a los aspectos geológicos y geomorfológicos determina una variabilidad consecuente en los tipos de suelo presentes. A esto se suma la variabilidad local (toposecuencia) estrechamente relacionada con la clase natural de drenaje, y que es mayor en las situaciones de relieves heterogéneos. En líneas generales puede destacarse el predominio de materiales originarios más finos en los sectores centro y norte, con texturas entre franco limosas y franco arenosas muy finas, donde los perfiles adquieren mayor desarrollo, observándose horizontes subsuperficiales iluviales con distinto grado de expresión (secuencias Ap-A2-Bw-BC-C). En los sectores con materiales más arenosos, y en general hacia el sur y el este se observan perfiles de menor desarrollo (secuencias Ap-AC-C) y situaciones intermedias respecto de la anterior. Hacia el sudoeste de la sub-región este último tipo de suelos constituye la condición de mayor evolución, siendo posible observar perfiles con un menor desarrollo aún (secuencias AC-C, con un epipedón ócrico mínimo). Los subgrupos de suelo más representativos en toda la sub-región son: hacia el oeste *Ustortentes típicos* y *líticos*, en el centro y norte *Hapludoles típicos* y *énticos*, y hacia el este *Haplustoles típicos*, *énticos* y *sálicos* (Cantero *et al.*, 1984). No obstante, es posible encontrar otros subgrupos que se encuentran más ligados a condiciones de intrazonalidad.

#### (ii) Llanuras mal drenadas

La génesis de suelos en los ecosistemas de esta sub-región es en extremo compleja e involucra variaciones en el material originario, en el relieve y en las condiciones de drenaje. El origen fluvial en varios ciclos de sedimentación, y los posteriores ciclos eólicos con discontinuidad superficial de los materiales originarios, dio como resultado la formación de suelos poligenéticos, presentando con frecuencia discontinuidad litológica en su perfil (Cisneros *et al.*, 1999). Las condiciones de hidrohalomorfismo prevalecen en el área, aunque su expresión varía a lo largo de la toposecuencia. En cada sector definido del paisaje, el balance entre la intensidad de los procesos de ascenso capilar, infiltración-percolación y escurrimiento superficial definen su grado de hidrohalomorfismo (Koslovski, 1972).

En las posiciones de loma los suelos se desarrollaron sobre materiales eólicos francos o franco-arenosos, dando origen a *Hapludoles típicos* o *énticos*, con perfiles escasamente diferenciados y drenaje interno algo excesivo. En estas situaciones la oscilación del nivel

<sup>4</sup> Se adopta el sistema de clasificación de suelos *Soil Taxonomy* (USDA) de 1999.



freático se encuentra por debajo del crítico (Wosten and Van Genuchten, 1988), aunque no así hacia las posiciones intermedias más bajas, donde comienza a evidenciarse la discontinuidad entre materiales eólicos y fluviales sobre los que se desarrollan *Haplustoles énticos thapto nátricos*, los cuales presentan rasgos de halomorfismo (horizontes Bna) en profundidad y frecuentemente agravados por el uso pastoril (Cisneros, 1994). Los suelos asociados a las posiciones de pie de ladera muestran claras evidencias de hidrohalomorfismo (Horizontes Bna, duripanes y/o fragipanes) y taxonómicamente se clasifican como *Natracuales típicos*, *Natracualfes típicos* y *Duracualfes típicos*. El nivel de oscilación freático es siempre superior al crítico y su concentración salina define el grado de halomorfismo. En los sectores deprimidos del paisaje la génesis de suelo ocurre bajo condiciones en extremo reductoras debido a las características del drenaje interno y externo - aunque con niveles de salinidad variables - y pueden hallarse *Natracualfes típicos* y *Duracualfes típicos*.

#### (iii) Llanuras medanosas

Los gradientes climáticos y granulométricos de los materiales originarios de suelo presentan una dirección aproximadamente noreste - sudoeste dentro de la sub-región, de allí que la intensidad de los factores formadores así como la capacidad de los sedimentos determinan un gradiente en igual sentido para el grado de desarrollo de los perfiles de suelo, con las lógicas excepciones encontradas en ambientes tales como las márgenes de cauces de agua, las zonas perilacunares, los médanos activos, etc. Hacia el oeste de la sub-región, casi sobre su límite, se ubica la línea divisoria entre los regímenes hídricos del suelo ústico y árido (Van Wambeke y Scoppa, 1976). En general, en toda la sub-región se desarrollan suelos poco evolucionados. Hacia el norte y el este, es posible encontrar *Haplustoles énticos* y en algunos casos *típicos* (Cantero *et al.*, 1984), mientras que hacia el oeste y sur comienzan a predominar los *Ustipsamientos típicos*, los cuales aparecen asociados a *Ustortentes típicos* e incluso *Torripsamientos típicos* y *ústicos* hacia el oeste (Peña Zubiarte *et al.*, 1980; INTA, 1998). Los suelos asociados al cauce del río Quinto son *Haplustoles énticos* con afloramientos de tosca (Cantero *et al.*, 1984). La formación vegetal 'Estepa gramínea con isletas de chañar' aparece asociada a suelos arenosos, con predominancia de arenas finas, pH ligeramente ácido y bajos niveles de materia orgánica (0,7 - 0,9%). La formación 'Bosque de caldén' aparece asociada a suelos arenosos a franco arenosos con buen contenido de materia orgánica debajo de los caldenes (hasta 4%) y menor en las abras (0,7 a 1,3%), y en la zona de influencia del río Quinto algo de calcáreo pulverulento en el perfil y planchas de tosca endurecidas en el horizonte C. Los suelos de toda la sub-región presentan baja capacidad de retención hídrica, drenaje interno excesivo y riesgo de erosión eólica.

#### (iv) Sierra y pedemonte

El sector norte de la sub-región es cubierto por la hoja Alpa Corral de la Carta de suelos de la república Argentina (INTA, 1994) que define, a una escala 1:100.000, tres complejos de suelos. En el primer complejo los suelos dominantes son *Hapludoles énticos* de textura franca gruesa de espesor variable, siendo más profundos en paisajes suavemente colinados y someros con afloramientos rocosos en los sectores mas altos y escarpados. En el

segundo complejo los suelos dominantes son *Udorthents líticos* de textura esquelética franca, de escaso desarrollo, someros o muy someros apoyados sobre rocas alteradas o firmes. En los valles y bajos con pendientes entre 10 a 25% el horizonte superficial presenta un contenido moderadamente alto de materia orgánica. El complejo de pampas de altura (tercero) está ubicado por encima de los 1500 msnm con pendientes no superiores al 10%. Son suelos *loessicos* de variada profundidad y susceptibles a la erosión hídrica. Otros estudios realizados en la sub-región describen como principales sub-grupos de suelo *Hapludoles típicos y líticos*, *Argiudoles típicos y líticos* y *Fluventes* en los valles (Cantu y Cantero, 1981; Cantero *et al.*, 1981, 1986; Gonzalez *et al.*, 1996).

Los suelos en el área pedemontana son poco desarrollados en crestas de lomas y afloramientos, con gravas y gravillas en su perfil. Existen acumulaciones eólicas localizadas de materiales franco arenosos en áreas sujetas a aportes de cursos y bajos concentradores y conductores de agua de escorrentía (Bianco *et al.*, 1987). Es común la superposición de capas de sedimentos discontinuos, en general con materiales finos y alto contenido de materia orgánica. Los principales subgrupos de suelos presentes en el área son *Haplustoles líticos, típicos y énticos*, *Argiudoles* y *Udifluventes típicos* (Cantú y Cantero, 1981; Cantero *et al.*, 1984).

### 3.7 El patrón de uso de las tierras

#### (i) *Llanuras bien drenadas*

La colonización de la sub-región tuvo lugar a fines del siglo XIX, provocando el desmonte de los parches leñosos originales, la roturación de los pastizales naturales y un elevado grado de fragmentación de la superficie. El trazado de la red ferroviaria y las localidades vinculadas a ella afectaron la distribución de la actividad agrícola inicial, basada en los cultivos de trigo, alfalfa y lino, y posteriormente maíz. Entre las décadas de 1940 y 1960 la producción ganadera se vio incrementada, y al mismo tiempo surgió el cultivo de maní como reemplazo de los anteriores, aparejado a los inicios de la mecanización agrícola. Este hecho marcó el comienzo de una etapa caracterizada por una mayor agresividad en el patrón de uso de las tierras, acelerando los procesos de deterioro de los suelos (Bricchi, 1996). Hacia la década del '60 un 50% de las tierras eran usadas para cultivos anuales de cosecha. El desarrollo de la mecanización en la totalidad de las labores propendió a la intensificación de los modos de producción, y con ello una mayor magnitud en el grado de deterioro de las tierras, particularmente por los procesos de erosión hídrica y eólica aceleradas (De Prada, *et al.* 1994). En la actualidad existe un predominio de cultivos oleaginosos respecto de los cereales, con tendencia al incremento de la superficie con soja, a una simplificación de las actividades agrícolas (monocultivo) y un constante receso de las tierras destinadas a la ganadería (Alessandria *et al.*, 2001).

#### (ii) *Llanuras mal drenadas*

El uso de la tierra en esta sub-región ha sido claramente definido y condicionado por los aspectos biofísicos anteriormente descriptos, en estrecha interacción con aquellos socioeconómicos que la caracterizan. Entre estos últimos, cabe destacar el grado extremo

de heterogeneidad en la distribución de las tierras (desde unidades de producción inferiores a 100 ha hasta otras aún superiores a 20.000 ha). Explotaciones de entre 1000 y 5000 ha son frecuentes en las zonas de grandes lagunas, y normalmente presentan esquemas de producción mixtos con tendencia a la ganadería, predominando las actividades de cría y recría de bovinos sobre la de invernada (INTA, 1986). El principal recurso forrajero sobre el cual se asentó la producción animal es la vegetación natural, aunque también se han implantado praderas permanentes (mono- o multi-específicas) en las áreas con mejor drenaje. El nivel tecnológico de la producción ganadera es en general bajo, siendo frecuente el pastoreo continuo. La actividad agrícola en la sub-región se ha desarrollado en las posiciones más elevadas del paisaje, donde la probabilidad de inundación es muy baja y el nivel de oscilación de la freática se encuentra por debajo del mínimo considerado crítico (Wosten and Van Genuchten, 1988). La compactación del suelo por pisoteo en periodos de anegamiento, la pérdida de diversidad del pastizal por sobrepastoreo y el mal manejo del fuego han afectado la cobertura superficial; estos disturbios se manifiestan mediante la ocurrencia de parches sin vegetación (peladares) que exhiben habitualmente costras salinas superficiales. Desajustes tecnológicos y la 'tercerización' de actividades agrícolas por contratistas o arrendatarios han contribuido también a aumentar los riesgos de deterioro de las tierras por salinización (Cisneros, 1994).

#### (iii) Llanuras medanosas

La principal actividad de la sub-región ha sido la ganadería bovina extensiva, aunque el incremento de las precipitaciones durante los últimos años ha provocado el avance de la frontera agrícola hacia el oeste (cultivos estivales). Grandes extensiones del bosque de caldén han sido (y son) taladas con este fin. Históricamente el suelo ha sido cultivado en forma esporádica durante ciclos hídricos favorables, para luego ser abandonado frente a las épocas de sequía. La principal actividad ganadera ha sido la cría bovina con tendencia a la recría y casos aislados de invernada, hacia el sudoeste, mientras que esta última ha sido más frecuente hacia el noreste. La actividad ganadera en general ha llevado en muchos casos a la sobreexplotación del recurso natural forrajero, encontrándose con frecuencia potreros totalmente invadidos por la paja de las vizcacheras (*Stipa eriostachya*). Superficies que fueron inicialmente implantadas con alfalfa fueron abandonadas y repobladas por especies nativas; en algunos casos invadió el chañar y en otros se convirtieron en médanos vivos (Orquín *et al.*, 1985). El pasto llorón ha sido frecuentemente utilizado, sembrado en franjas o en cultivos puros, con el doble propósito de fijar médanos y controlar la erosión eólica, así como por su aporte a la dieta del ganado. En la actualidad, es notable el incremento de la superficie dedicada al cultivo del maní en el noreste de la sub-región, debido a la necesidad de nuevas tierras que afronta este sector productivo, luego de que las enfermedades de suelo han proliferado en la zona tradicional de cultivo (Sub-región Llanuras bien drenadas).

#### (iv) Sierra y pedemonte

En la sub-región ha predominado la ganadería de cría, especialmente de caprinos y ovinos sobre pastizales naturales, con reducidas áreas bajo cultivo, principalmente de maíz. Una

actividad forestal de mediana importancia basada principalmente en el cultivo de *Pinus eliottii*, *P. radiata* y *P. taeda* ha sido también desarrollada. La producción del pastizal natural se estima entre 3 y 6 ha por equivalente vaca (Menghi *et al.*, 1978; Anderson *et al.*, 1980, 1981). Quemadas periódicas del pastizal han sido utilizadas a fin de mejorar su calidad, las cuales aumentan la exposición del suelo a la erosión por escurrimiento (Herrera *et al.*, 1978). De acuerdo a observaciones a campo (Cantero *et al.*, 1996) el ganado vacuno pasa en promedio el 36% del tiempo pastoreando en las comunidades de pastizal alto, 47% en pastizal bajo, y 17% en comunidades de los denominados 'céspedes'. Previa a la introducción del ganado en la sub-región estos pastizales evolucionaron bajo una leve presión de pastoreo generada por los herbívoros nativos (guanaco: *Lama guanicoe*). Sala *et al.* (1986) indicaron que la diversidad florística se ha visto incrementada por efecto de la introducción del ganado durante los últimos 100 años. El pedemonte es un área agrícola-ganadera, con pastizales naturales, praderas anuales o perennes y cultivos estivales. Bianco *et al.* (1987) estimaron la receptividad ganadera entre 3 y 4 ha por equivalente vaca. Han sido frecuentes allí los problemas con plantas tóxicas para el ganado tales como *Baccharis cordifolia*, *B. artemisioides* y *Cestrum parqui* (Cantero y Bianco, 1986).



## 4. Origen de la información y metodología

El presente capítulo ofrece detalles de la metodología empleada durante el desarrollo de esta tesis, sobre las fuentes de información secundaria utilizadas y sobre la generación original de resultados. Los sitios seleccionados para la validación del modelo, de acuerdo a los criterios descritos en el capítulo precedente, son caracterizados aquí en mayor detalle. Con la información recopilada en tales sitios junto con información secundaria se realizó un análisis de los factores que controlan los niveles de carbono orgánico a escala regional, así como de las implicancias de los mismos sobre ciertas propiedades de los suelos. Los métodos utilizados así como los supuestos asumidos son descritos aquí del mismo modo. Para el diseño de las simulaciones, a fin de representar lo más adecuadamente posible al amplio rango de situaciones observadas e históricas, ciertos supuestos fueron asumidos – y ciertas generalizaciones necesariamente incluidas – con el objeto de obtener resultados comparables. Una definición de ‘Situaciones de uso de la tierra’ fue adoptada con el fin de acotar la diversidad encontrada en la región, y la misma es descripta en este capítulo. Por último se describe la metodología empleada para la validación del modelo, para evaluar su sensibilidad a las variables ambientales y de manejo, y su utilidad en diferentes aplicaciones.

### 4.1 Fuentes de información

#### 4.1.1 Información climática

Las variables climáticas requeridas por el modelo consisten en valores mensuales de precipitaciones y temperatura. En el primer caso la precipitación media mensual y el desvío estándar de la misma. En el segundo, las temperaturas máxima y mínima media mensual. Tales datos fueron obtenidos a partir de la Carta de Suelos de la República Argentina (INTA, 1986, 1990, 1994, 1998), a partir de los datos generados por la Cátedra de Climatología de la Universidad Nacional de Río Cuarto, y a través de datos presentados en publicaciones previas (e.g. Cantú, 1998; González, 1999; Cisneros, 1994). Interpolaciones lineales y/o triangulaciones entre estaciones meteorológicas fueron empleadas para la generación de datos en aquellos sitios distantes o carentes de información. La Figura G del Apéndice III muestra una representación esquemática de la distribución geográfica de los sitios estudiados y de la ubicación de las estaciones meteorológicas, en un plano de coordenadas. La mayor variabilidad y, por lo tanto, la mayor densidad de puntos de observación ocurre en las proximidades del cordón serrano y en su zona de influencia oriental (pedemonte y llanuras bien drenadas onduladas). En sectores geomorfológicamente más homogéneos, como la zona de influencia de la localidad de Gral. Cabrera, la representatividad de las observaciones meteorológicas comprende mayores extensiones.



La simplicidad que ofrece el modelo en el requerimiento de información climática fue, sin embargo, difícil de afrontar en muchas de las situaciones estudiadas. Una importante variabilidad surgió del empleo de series climáticas provenientes de diversas fuentes, discontinuas, o generadas durante períodos cortos en los que, en ocasiones, sólo un ciclo climático anormal es registrado.

#### 4.1.2 Variables edáficas

La textura, profundidad y densidad aparente del horizonte superficial son las principales variables requeridas por el modelo para las simulaciones de largo plazo (i.e. más de 10 – 20 años) o para la estimación de los niveles de carbono en condiciones de equilibrio. El contenido de carbono orgánico en el horizonte superficial es el principal resultado sobre el que se evaluó la representatividad de las simulaciones. Esta serie de datos mínimos fue obtenida a partir de publicaciones o trabajos previos y/o generados a partir de muestreos en los sitios seleccionados. Información disponible sobre propiedades edáficas (i.e. constantes hídricas, capacidad de intercambio catiónico) y sobre aspectos cuali-cuantitativos de las fracciones orgánicas fue utilizada para el análisis de los factores que controlan los niveles de carbono en el suelo y de su influencia sobre la dinámica edáfica.

##### 4.1.2.1 Información disponible

Una extensa cantidad de información sobre los datos mencionados fue obtenida a partir de los trabajos de zonificación, relevamiento de suelos e investigación agropecuaria realizados en la Universidad Nacional de Río Cuarto (e.g. Becerra *et al.* 1981, 1983; Bonadeo y Bricchi 1983, 1991; Bricchi, 1995, 1996; Bricchi *et al.* 1991, 1999, 2004; Cantero *et al.* 1981, 1983, 1984, 1987 a y b, 1998, 1999; Cantero y Cantú, 1985; Cantú y Cantero, 1981; Cisneros, 1994; Cisneros *et al.* 1999, 2000; Gil *et al.* 1983 a, b; Gonzalez *et al.* 1983, 1996; Hampp *et al.* 1983; Uberto *et al.*, 2001; Valero *et al.* 1984, etc.). Información sobre textura del horizonte superficial en buena parte de los sitios seleccionados fue obtenida a partir de la Carta de suelos de la República Argentina (*op. cit.*). Del mismo modo, publicaciones de otros diversos autores que condujeron trabajos de relevamiento en la región (e.g. Anderson, 1981) fueron consultadas para la obtención de datos.

##### 4.1.2.2 Generación de información

El criterio para la selección de los sitios fue explicado en el capítulo precedente (Sección 3.1). En aquellos sitios para los cuales no se contaba con información suficiente o la misma resultaba poco representativa, se realizaron muestreos y mediciones a campo. En un sector representativo de cada ambiente en el polipédón seleccionado se cavó una calicata y se determinó la profundidad total del perfil del pedón y de cada uno de los horizontes diferenciados. Se identificaron las principales propiedades morfológicas en términos de color, estructura, textura, consistencia, profundidad de raíces y presencia de elementos diagnóstico relevantes (i.e. panes, tosca, sales, etc.). Diferentes puntos de muestreo fueron seleccionados incluyendo a las situaciones de uso y manejo

implementadas, dentro del área de distribución de cada tipo de suelo caracterizado. Un ejemplo de tal procedimiento es presentado en la Tabla 4.1, donde figuran los datos obtenidos en un establecimiento ubicado en las proximidades de Gral. Cabrera. El mismo elemento suelo fue identificado bajo una vegetación de monte natural, bajo pastizal natural (abra de monte) y bajo rotación agrícola en un lote sistematizado y cultivado en franjas (Imagen 1). La coexistencia de distintas situaciones de uso para un mismo suelo y próximas entre sí representa un aporte de información muy valiosa.

La densidad aparente y el contenido hídrico fueron medidos en los primeros 0,25 m del perfil a intervalos de 0,05 m, mediante el empleo de una sonda de rayos gamma (Humboldt Scientific Inc. 1986). Se caracterizó la evolución vertical de la densidad aparente y se obtuvo un promedio ponderado para los primeros 0,2 m del horizonte superficial, con el cual se corrió el modelo. Estas mediciones se realizaron en cada una de las situaciones identificadas. Se tomó una muestra de suelo, de aproximadamente 1 kg, a partir de cada uno de los horizontes identificados en la calicata. De ésta, así como de todas las situaciones identificadas para el mismo elemento suelo, se tomó una muestra compuesta de suelo de cada uno de los horizontes. En el caso de situaciones bajo monte o pastizal natural, se diferenciaron las capas superficiales del resto del epipedón, debido a la acumulación de residuos vegetales en vías de descomposición en los primeros centímetros del perfil.

Tabla 4.1: Datos correspondientes a un establecimiento ubicado 30 km al NW de la localidad de Gral. Cabrera, sub-región llanuras bien drenadas con relieve subnormal. Los valores corresponden a un Haplustol típico (arcilla 11,3%; limo 33,3%; arena 55,5%) bajo tres situaciones de uso y manejo.

Situación de uso y manejo	Código de Sitio*	Profundidad		Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	Materia orgánica (%)
		<i>Solum</i> (m)	<i>Epipedón</i> (m)		
Ambiente úmbrico bajo monte de Chañar y Espinillo, en pastoreo	<i>Fam</i>	0,46	0,21	1,10	2,45
Pastizal natural en los claros y abras del monte, en pastoreo	<i>Fbm</i>	0,54	0,21	1,03	3,21
Lote agrícola sistematizado y cultivado en franjas (rastrero de soja)	<i>Fal</i>	0,50	0,22	1,29	1,98

\*Ver Apéndice V – Caracterización de los sitios de simulación

Las muestras fueron manualmente desagregadas y ubicadas en bandejas a fin de facilitar el secado. Las muestras secas al aire fueron molidas y tamizadas con tamiz de malla 500 µm. En estas muestras se determinó el contenido de carbono orgánico mediante la oxidación con una mezcla de dicromato de potasio y ácido sulfúrico, y posterior valoración del exceso del primero con sulfato ferroso amónico (Nelson y Sommers, 1982). Los resultados se expresaron como g de C kg<sup>-1</sup> de suelo. El valor obtenido a partir del

análisis fue expresado también en porcentaje de materia orgánica (1,725 x g C en 100 g de suelo), a fin de lograr una mayor inteligibilidad en la práctica. Sin embargo, para la comparación de los valores observados y los simulados por el modelo, el valor obtenido mediante el análisis de laboratorio fue expresado en g de C por m<sup>2</sup> de suelo, para los 0,2 m iniciales del perfil, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de C [g m}^{-2}\text{]} = \text{g C en 100 g suelo} * 0,2 \text{ m}^3/\text{Dap [kg m}^{-3}\text{]} * \text{FC [g kg}^{-1}\text{]}$$

Donde,

*Dap*: densidad aparente expresada en kg m<sup>-3</sup>, ponderada para los primeros 0,2 m del perfil,  
*FC*: factor de corrección de unidades: 10 g kg<sup>-1</sup>, que surge de convertir el contenido de C de gramos por 100 g de suelo en gramos por kilogramo de suelo.

Debido a que el criterio inicial para la selección de los sitios fue la identificación de unidades suelo-paisaje a partir de material cartográfico, los sub-grupos taxonómicos de suelo identificados a campo fueron correlacionados con la información disponible sobre la distribución de las series de suelo en cada sub-región de acuerdo a relevamientos previos (e.g. Cantero *et al.*, 1984). Esto permitió asignar la textura previamente determinada, correspondiente a los suelos de cada sitio relevado. La sensibilidad del modelo a variaciones en la clase textural de los suelos de la región fue, no obstante, evaluada en el presente estudio (Sección 4.4.3) a fin de poder estimar el error relativo que podría esperarse de tal metodología.

#### 4.1.3 Tipos de vegetación

El tipo de vegetación interviene en la definición de cantidad y calidad de residuos orgánicos que son mensualmente adicionados al suelo (Capítulo 2, Sub-modelo producción de biomasa). El modelo presenta una serie de sub-rutinas que contienen un importante número de parámetros para cada tipo de vegetación. El Apéndice I – Tabla C presenta ejemplos de un número de parámetros correspondientes a un pastizal templado, con predominio de gramíneas C3. Tales parámetros, 70 en total para pastizales, son definidos en la etapa de *parametrización* del modelo. La generación de parámetros de vegetación es una tarea que escapa a los objetivos de esta tesis. La modificación de tales archivos debe ser realizada en coordinación con los autores del modelo, bajo su autorización y supervisión (Parton *et al.*, 1992). No obstante, diferentes conjuntos de parámetros se encuentran disponibles para los principales tipos de vegetación existentes, desde pastizales templados, tropicales, semi-desérticos, sabanas húmedas o semi-áridas, bosques de latifoliadas, coníferas y hasta vegetación de tipo tundra. Las unidades de vegetación dominantes en cada una de las sub-regiones fue descrita en el capítulo anterior de acuerdo a los relevamientos realizados por diversos autores (e.g. Bianco *et al.*, 1987). En cada uno de los sitios seleccionados se determinó el tipo de vegetación dominante (presente actualmente o bajo condiciones iniciales) y, de acuerdo a ello, se

seleccionó el conjunto de parámetros disponible para el diseño de las simulaciones (Sección 4.3).

#### 4.1.4 Historia de uso de la tierra

La historia de uso de las tierras permite generar esquemas que son utilizados por el modelo para la estimación de los flujos de carbono dentro y a través del sistema. Ligados al carbono, los flujos de nitrógeno, fósforo y azufre son igualmente simulados. Estos flujos son ampliamente determinados por la magnitud de las adiciones y remociones de materia resultantes de las actividades agrícola-ganaderas. En tal sentido, su correcta definición resulta clave en el diseño de las simulaciones. Una reseña de las principales actividades productivas imperantes en cada sub-región fue presentada en el capítulo precedente. Esta información, conjuntamente con la aportada por los productores durante el relevamiento a campo y con la publicada por diversos autores (e.g de Prada, *et al.* 1994) fue utilizada para definir las 'Situaciones de uso de la tierra' (Sección 4.3.2). Las mismas representan situaciones promedio, que intentan acotar la gran variabilidad existente. En este trabajo se considera sólo el efecto de largo plazo de la historia de uso de las tierras; diferentes planteos de uso y manejo son evaluados en un trabajo complementario (De Grazia, inédito).

## 4.2 Caracterización de los sitios

### 4.2.1 Atributos del paisaje

Debido a la disponibilidad de información, a su representatividad e importancia productiva, y a la necesidad de acotar el número de variables en juego, la mayoría de los sitios seleccionados corresponde a situaciones zonales. No obstante, y especialmente en los casos en que la información fue generada a partir del relevamiento a campo durante el desarrollo de este estudio, diferentes puntos de observación a lo largo de una toposecuencia representativa fueron incluidos, intentando representar a los diferentes elementos del paisaje. La identificación de toposecuencias para la selección de los puntos de observación fue, sin embargo, adoptada en todos los sitios para la definición de condiciones de zonalidad. En aquellos ambientes en los que la relación suelo-paisaje se manifiesta con mayor integridad, y en los que la amplia heterogeneidad geomorfológica determina variaciones micro-ambientales que afectan definitivamente a los factores que controlan los niveles de carbono en el suelo, las condiciones de intrazonalidad fueron también incluidas. Este enfoque metodológico fue adoptado con mayor frecuencia en las sub-regiones llanuras mal drenadas, llanuras medanosas y en los ambientes serranos. El esquema de la Figura 4.1 ilustra la definición de un perfil topográfico modal realizado a campo para las condiciones del sitio Las Taguas, en la Provincia de San Luis, perteneciente a la *Llanura medanosa con lagunas permanentes*. Los sitios de muestreo fueron seleccionados a fin de incluir a los elementos del paisaje más representativos.



Una sinopsis de la posición en el paisaje de los sitios seleccionados para las sub-regiones Llanuras bien drenadas, mal drenadas y medanosas es presentada en las Tablas A, B y C del Apéndice V - 1, sólo para las situaciones de baja alteración antrópica (las situaciones antropizadas son variantes de éstas, presentando la misma ubicación en el paisaje). En las mismas se define el tipo de vegetación original correspondiente, así como el uso actual predominante, la clase natural de drenaje y la ubicación geográfica de los mismos. Los ambientes serranos (Apéndice V - 3, Tabla G) fueron discriminados sobre la base de su ubicación en el paisaje, de manera que este tipo de información resultaría redundante. Los códigos de sitio fueron asignados para facilitar su identificación en la presentación de los resultados de las simulaciones y son mantenidos en las secciones subsecuentes. Tales códigos se componen generalmente de las iniciales correspondientes a la denominación del sitio o de la localidad de importancia más cercana, seguidos de las letras minúsculas *m* [monte], *p* [pastizal] o *a* [agrícola], u otros, y/o un número que permite diferenciar dos o más situaciones que presentan características similares. De esta forma, el primer código en la Tabla A (Apéndice V - 3), *L5m*, hace referencia a una situación bajo monte natural perteneciente al establecimiento 'Las Selvas', mientras que aquellas situaciones en las que se observa actualmente agricultura se denominan *LSa*. Tal diferenciación no fue adoptada de manera estricta, sin embargo, ya que no fue necesaria en aquellas sub-regiones en las que sólo se observan pastizales, como en las llanuras mal drenadas.

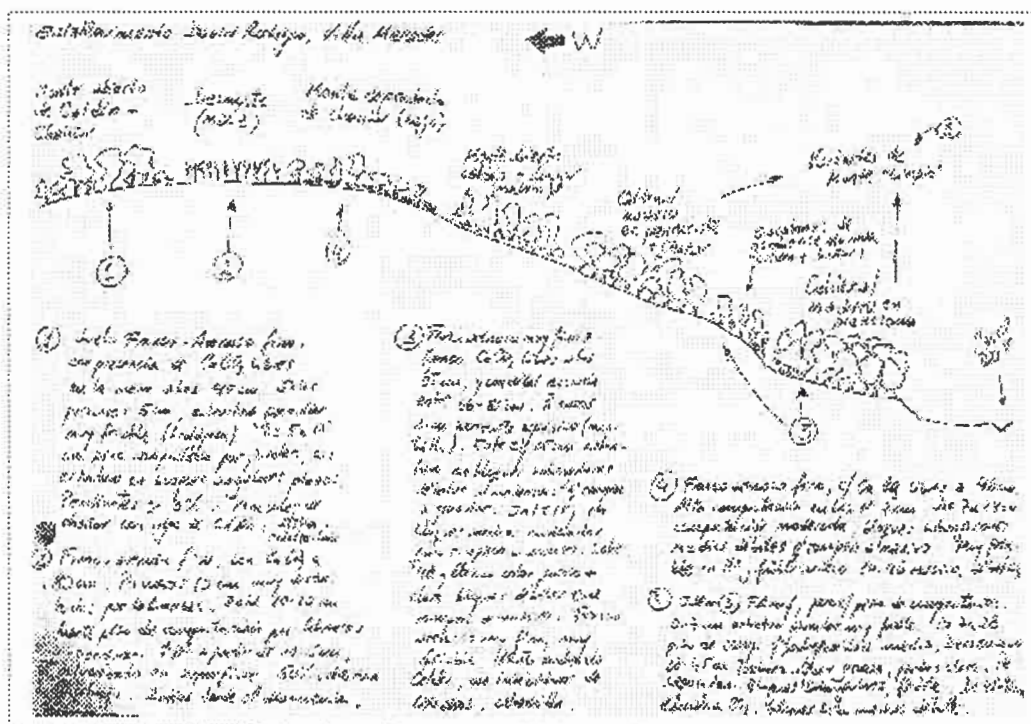


Figura 4.1: Ilustración de un perfil topográfico modal levantado a mano alzada en un establecimiento ubicado 20 km al oeste de la ciudad de Villa Mercedes, Provincia de San Luis (Llanuras medanosas). Cada uno de los sectores del paisaje fue identificado con un número, y se recordó en cada caso una somera leyenda fisiográfica, incluyendo información sobre suelos, vegetación y uso de la tierra.

#### 4.2.2 Clima y suelos

Los gradientes climáticos incluidos en el diseño de las simulaciones son presentados en forma gráfica en el Apéndice III, mientras que en el Apéndice V - 2, Figuras A-D se ilustran la distribución de las precipitaciones y de la temperatura media en estaciones representativas de las diferentes sub-regiones, tal como fueron introducidas en el modelo. En tales histogramas resulta claramente evidente la distribución estival de las precipitaciones en todas las sub-regiones bajo estudio.

La adquisición de datos de suelo fue desarrollada en la Sección 4.1. En el Apéndice V - 3, Tablas A - G se presentan los datos que finalmente fueron utilizados para el diseño de las simulaciones. En todas ellas aparece la clasificación taxonómica de suelos y, en el caso de las llanuras medanosas (Tablas E y F), la unidad geomorfológica a la que pertenece cada sitio dentro de la sub-región. Los datos empleados para el diseño de las simulaciones corresponden sólo al horizonte superficial. El modelo, en su última versión, permite generar simulaciones que involucran a la totalidad de los horizontes y toma en cuenta los flujos sub-superficiales, en especial para los sub-modelos N, P y S. Para la simulación de la dinámica del C, el efecto de la inclusión de horizontes inferiores no fue evaluado debido a la carencia de un volumen crítico de datos.

#### 4.3 Diseño de las simulaciones

##### 4.3.1 Definición de los agroecosistemas

Las simulaciones se realizaron bajo el supuesto de coexistencia de dos tipos de agroecosistemas: Pastizales templados y Sabanas sub-húmedas. Esto permitió uniformar las condiciones iniciales de las simulaciones en las diferentes sub-regiones. En el presente estudio no se consideraron sistemas agrícolas específicos, los cuales son abordados ampliamente en el trabajo de De Grazia, J. (inédito), para las mismas situaciones bajo estudio. Sólo se simuló parcialmente el efecto de las labranzas en los casos en que la vegetación natural ha sido reemplazada por pasturas implantadas y verdeos anuales. Los periodos bajo simulación fueron adoptados lo suficientemente prolongados a fin de alcanzar condiciones de equilibrio, evitando toda influencia de las condiciones iniciales de sitio sobre los resultados del modelo. Simulaciones durante 2000 a 5000 años en ambos tipos de ecosistemas fueron comparadas a fin de definir el período de simulación mínimo necesario para lograr condiciones de equilibrio.

Los pastizales naturales recibieron las condiciones iniciales que aparecen en la Tabla 4.2, y que corresponden a los valores por defecto que ofrecen los archivos de sitio del modelo para pastizales templados con predominio de gramíneas C3 (Parton, 1992). Se asume un período de receso anual de la vegetación durante los meses de invierno, y una evolución en la producción de biomasa que responde a las temperaturas y precipitaciones (Capítulo 2, Sub-modelo producción de biomasa). Los montes naturales fueron simulados mediante la adopción de los parámetros iniciales correspondientes a una vegetación de tipo sabana templada (Tabla 4.2), ofrecidos por defecto en los archivos de sitio del modelo. La

distribución espacial y la competencia entre ambos estratos en una sabana es corrientemente simulada a partir de estos parámetros de sitio, y es potencialmente capaz de emular las interacciones que ocurren en montes abiertos bajo pastoreo.

La evolución natural de los pastizales y de las sabanas es simulada considerando una leve remoción por pastoreo (ca. 10 % de la biomasa aérea) que intenta representar la existencia de herbívoros nativos (guanaco) en baja densidad de población. Resulta conveniente enfatizar que CENTURY es un modelo desarrollado para simular la evolución a largo plazo de los niveles de carbono en el suelo, y que la producción primaria es simulada a fin de estimar los aportes de residuos vegetales, y no necesariamente con valor predictivo.

Tabla 4.2: Condiciones iniciales para la simulación de la evolución del C edáfico hasta condiciones de equilibrio, en ecosistemas de pastizal y de monte. Los contenidos de N, P y S en las diferentes fracciones han sido expresados con relación al C.

Variable de estado	Contenido de carbono (g C m <sup>-2</sup> )	Relación		
		C:N	C:P	C:S
<b>1. Pastizales</b>				
<i>Fracción orgánica</i>				
Microbiana superficial	20	16	50	50
Activa	60	12	50	50
Estable	1250	17	117	117
Pasiva	740	8	62	62
<i>Residuos vegetales</i>				
Superficiales	100	66	300	300
Semi-incorporados	100	66	300	300
Biomasa radicular	150	50	375	375
Biomasa muerta en pié	50	62	250	250
<b>2. Montes</b>				
<i>Fracción orgánica</i>				
Microbiana superficial	30	13	50	50
Activa	190	10	50	50
Estable	2100	18	117	117
Pasiva	2800	7	62	62
<i>Residuos vegetales</i>				
Superficiales	100	88	300	300
Semi-incorporados	100	66	300	300
Biomasa radicular	200	133	444	444
Biomasa muerta en pié	50	62	250	250

#### 4.3.2 Definición de situaciones de uso de la tierra (ecológicas/productivas)<sup>5</sup>

La variabilidad resultante de intentar representar las múltiples opciones de uso y manejo de los agroecosistemas, así como las particularidades de la historia de cada establecimiento se tornó demasiado compleja para la aplicación de una herramienta de

<sup>5</sup> Los supuestos asumidos en relación con la evolución en el patrón de uso de las tierras durante los periodos coloniales se basaron en la reconstrucción de Brailovsky y Foguelman (1991).



decisión a escala sub-regional. A fin de acotar dicha variabilidad y obtener resultados comparables, se adoptó el marco conceptual de la definición de situaciones de producción potencial, alcanzable y actual, propuesta por De Wit (1992). Sin embargo, por tratarse aquí básicamente del estudio de las condiciones de equilibrio y de la respuesta de los diferentes ecosistemas a la intervención antrópica en el *largo* plazo, se ha introducido una definición alternativa que responde a los objetivos propuestos:

#### *4.3.2.1 Situación Potencial*

La situación potencial representa aquí a una condición artificial que permite simular las propiedades de un determinado ecosistema en que la intervención antrópica se encuentra completamente ausente. La producción primaria y los flujos de materia y energía dentro del ecosistema responden exclusivamente a la oferta ambiental y a la capacidad de respuesta de la comunidad vegetal a dicha oferta. A fin de simular la evolución a un nivel de máxima tanto en pastizales como en sabanas, no se incluyó disturbio alguno en la simulación (ni siquiera el efecto de los herbívoros naturales).

#### *4.3.2.2 Situación Natural*

Bajo esta definición se intentó representar la condición natural en que se encuentran los pastizales y montes poco o no alterados por intervención antrópica (condición leve o/a moderadamente alterada en la sección anterior). Para ello se involucró la presencia de herbívoros naturales en baja densidad de población durante la evolución de los ecosistemas, y la inclusión del ganado vacuno en forma paulatina desde la colonización de las sub-regiones. Resulta difícil establecer el momento exacto en que comenzó la actividad pecuaria – y más aún su intensidad – en los diferentes sitios. La solución de compromiso propuesta en este estudio es la asignación de una intensidad de pastoreo en aumento durante los últimos 300 años en las zonas de mayor concentración de habitantes (Llanuras bien drenadas) y de 200, 150 o 100 años en zonas más despobladas (Llanuras mal drenadas, medianosas, ambientes serranos). La intensidad de pastoreo simulada aumenta desde 10 a 25 % de remoción de la biomasa aérea desde la inclusión del ganado. Una remoción del 25 % no resulta lo suficientemente elevada como para afectar a la producción del pastizal (de acuerdo a los parámetros del modelo) e incluso puede favorecer la ventaja competitiva de la vegetación arbórea.

#### *4.3.2.3 Situación Actual*

Bajo esta definición se intentó representar a las diferentes situaciones de uso de la tierra que es posible identificar en las sub-regiones. Una serie de esquemas básicos (teóricos) de ‘manejo’<sup>6</sup> fueron arbitrariamente definidos para la simulación de la evolución de los niveles de carbono en el suelo durante el siglo XX, a fin representar la heterogeneidad encontrada en las situaciones reales (Tabla 4.3). Estos esquemas fueron simulados partiendo de los resultados obtenidos en los diferentes sitios bajo condiciones naturales a inicios del siglo XX.

---

<sup>6</sup> En las rutinas de Century, la denominación ‘manejo’ incluye también al ‘uso’ de las tierras



Estas variantes de uso de la tierra no intentan representar a todas las combinaciones posibles, pero permiten generar una base de comparación en común para evaluar la utilidad del modelo como herramienta de monitoreo y predicción de la respuesta de los ecosistemas a la intervención antrópica.

Tabla 4.3: Esquemas teóricos de uso y manejo de las tierras adoptados en las simulaciones con CENTURY

Situación "actual" de uso de la tierra	Descripción
<i>Pastoreo 1</i>	Situación de uso pastoril de baja intensidad durante 100 años, en la que la remoción del pastoreo afecta a la productividad del pastizal en forma lineal (parámetros GL en Century). El pastoreo remueve sólo parte de la biomasa anualmente producida con una intensidad del 30%. No incluye desmonte ni labranzas.
<i>Pastoreo 2</i>	Situación de uso pastoril de intensidad media durante 100 años, en la que la remoción del pastoreo afecta a la productividad del pastizal en forma cuadrática, así como a la relación raíz:vástago de la vegetación herbácea (parámetros GM en Century). El pastoreo remueve la biomasa anualmente producida y parte de la vegetación muerta en pie, con una intensidad del 60%. No incluye desmonte ni labranzas.
<i>Desmonte 1</i>	Situación de uso pastoril de intensidad media durante los últimos 100 años sobre un pastizal proveniente del desmonte de la vegetación natural en el año 1900, a fin de representar el efecto de la colonización de la región. No incluye labranzas.
<i>Desmonte 2</i>	Situación de uso pastoril de intensidad media durante los últimos 100 años sobre un pastizal proveniente del desmonte de la vegetación natural en el año 1960, a fin de representar el efecto de la intensificación agropecuaria durante los últimos 40 años en la región. No incluye labranzas.
<i>Labranza 1</i>	Situación de uso pastoril de intensidad media durante los últimos 100 años sobre un lote proveniente del desmonte de la vegetación natural en el año 1900, y en el cual se implantan periódica y alternativamente pasturas semi-permanentes y verdes anuales, sin fertilización.
<i>Labranza 2</i>	Situación de uso pastoril de intensidad media durante los últimos 100 años sobre un lote proveniente del desmonte de la vegetación natural en el año 1960, y en el cual se implantan periódica y alternativamente pasturas semi-permanentes y verdes anuales, sin fertilización.

### 4.3.3 Formulación de escenarios

En aquellas situaciones en las que la capacidad de predicción del modelo demostró un nivel de ajuste aceptable con los datos medidos, fue posible plantear escenarios de uso y manejo de las tierras a futuro. Esto permite acercar una idea sobre la capacidad de reacción de los agroecosistemas frente a ciertas variables de uso de la tierra tendientes a su recuperación, o frente a cambios operados en los componentes socioeconómico (e.g. intensificación de ciertas actividades, variaciones de mercado, etc.) y/o ambiental (e.g. cambio climático). Las condiciones iniciales para tales simulaciones resultan de los

resultados de las simulaciones de largo plazo o bien de una combinación de estos con valores medidos para tales situaciones (i.e. densidad aparente, nivel inicial de carbono en el suelo, etc.). La formulación y el análisis de escenarios específicos es el tema central de un trabajo complementario (De Grazia, inédito), de modo que aquí se considera sólo un ejemplo de aplicación con fines ilustrativos.

#### 4.4 Análisis y procesamiento de información y resultados

##### 4.4.1 Factores de control sobre los niveles de carbono y propiedades derivadas

La información obtenida mediante el relevamiento a campo fue relacionada con los gradientes ambientales de diversa índole identificados en las sub-regiones. El contenido de carbono orgánico en el horizonte superficial de los suelos bajo situaciones de baja alteración antrópica (asumidas aquí como situaciones de equilibrio) fue relacionado con las variaciones en altitud (temperatura), precipitaciones, textura y tipo de vegetación. Para ello se identificaron gradientes de cada una de las variables mencionadas que pudieran diferenciarse a través de condiciones comparables. Una misma clase textural, con un régimen térmico relativamente invariable, medida a través de un gradiente de precipitaciones, permite estimar el efecto de estas últimas sobre los niveles de carbono (asumiendo que otras condiciones se mantienen dentro de cierto rango, e.g. vegetación). Los modelos estadísticos obtenidos por diversos métodos de regresión han sido denominados en su conjunto como "modelos empíricos", para diferenciarlos claramente de los modelos mecanísticos que conforman la estructura de CENTURY.

Se estudió la variación de las propiedades edáficas en estrecha relación con el contenido de carbono orgánico del horizonte superficial, capacidad de retención hídrica y capacidad de intercambio catiónico. Para ello se recurrió al uso de modelos existentes y largamente probados (e.g. Boekel, 1986; Bennema, 1966) y de información disponible sobre las propiedades a estimar. Se intentó determinar los parámetros de tales modelos bajo condiciones locales a través de procedimientos de ajuste de los datos a las funciones descriptas por ellos en forma iterativa (ver abajo). Se seleccionaron estudios de caso regionales para los cuales se contaba con mayor información, a fin de estudiar e ilustrar aspectos relacionados con la variabilidad en el contenido de materia orgánica a escala de unidad de paisaje simple, dentro del solum, y con variaciones en su calidad (fraccionamiento físico). El procesamiento estadístico de los resultados se realizó mediante el apoyo del programa Genstat 5 (*release 3.22, 1995*).

##### *Materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico*

Es posible estimar la capacidad de la materia orgánica para retener cationes [CIC, mmol<sub>(c)</sub> per g de materia orgánica] a partir de modelos de regresión múltiple que involucran a las diferentes fuentes de cargas negativas en el suelo. Este concepto fue utilizado para el desarrollo de un método gráfico (Bennema, 1966) que permite estimar en forma simplificada la CIC aportada por gramo de materia orgánica presente en el suelo. Las

siguientes expresiones son empleadas para la regresión múltiple (el término de interacción no es considerado):

$$(100 * CIC_{suelo}) / \%MO = [(100 * \%Arc * CIC_{arc}) / \%MO] + 100 * CIC_{mo}$$

$$(100 * CIC_{suelo}) / \%Arc = [(100 * \%MO * CIC_{mo}) / \%Arc] + 100 * CIC_{arc}$$

Donde,

$CIC_{suelo}$ : capacidad de intercambio catiónico del horizonte superficial en su conjunto [ $mmol_{(c)} g^{-1}$  suelo],

$\%MO$ : contenido porcentual de materia orgánica,

$\%Arc$ : contenido porcentual de arcilla,

$CIC_{arc}$ : capacidad de intercambio catiónico aportada por gramo de arcilla, variable según el tipo de ésta y,

$CIC_{mo}$ : capacidad de intercambio catiónico aportado por gramo de materia orgánica, variable según su grado de humificación.

Al no considerar el término de interacción se asume que la CIC depende de  $\%MO$  y de  $\%Arc$  exclusivamente, y no de la interacción entre ellos ni de otras fuentes de cargas negativas. Estas ecuaciones fueron aplicadas a los datos disponibles (Apéndice VI), intentando ajustar los parámetros del modelo.

#### *Materia orgánica y relaciones hídricas*

En suelos arenosos, o cuando los niveles de materia orgánica superan cierto valor umbral característico de cada tipo ecológico de humus, es posible expresar el valor de las constantes hídricas en función del contenido de materia orgánica del horizonte superficial. Para ello es necesario definir el equivalente gravimétrico de la materia orgánica en el suelo en cuestión (Boekel, 1986), y expresarlo en términos de contenido volumétrico de agua en el suelo a capacidad de campo. En este estudio se procedió en forma inversa (en aquellos casos en que la información se encontró a disponibilidad), ajustando un modelo estadístico a la relación materia orgánica vs. contenido hídrico a capacidad de campo (o humedad equivalente, en su defecto) mediante la asignación de diferentes valores para el equivalente gravimétrico. Los datos de las constantes hídricas fueron obtenidos a partir de publicaciones previas citadas en la Sección 4.1.2.

#### *Materia orgánica y densidad aparente*

Mediante diversas técnicas de regresión se intentó explicar la variabilidad en los valores de densidad aparente y porosidad total medidos en suelos de clase textural variable y bajo diferentes historias de uso de la tierra dentro de la región, considerando además a las variaciones en profundidad. Los modelos obtenidos fueron validados con datos independientes (Apéndice VI).

#### *Validación*

Los modelos empíricos derivados para las propiedades de calidad y salud del suelo fueron aplicados a datos provenientes de fuentes independientes, que no fueron previamente

utilizados para la calibración de los mismos. Tales casos son presentados en Apéndice VI – Tabla A. Se estudió entonces el grado de ajuste entre las mediciones independientes y las estimaciones mediante modelos empíricos con el apoyo del programa Genstat 5 (*release 3.22, 1995*).

#### 4.4.2 Evaluación de los resultados de las simulaciones

El grado de ajuste de los resultados de las simulaciones respecto de los valores observados fue caracterizado a través de un modelo lineal y se analizó su varianza respecto de las observaciones. Este procedimiento fue conducido para la totalidad de los resultados (ajuste regional) así como para conjuntos parciales correspondientes a una determinada sub-región o sitio. El procesamiento estadístico de los resultados se realizó mediante el apoyo del programa Genstat 5 (*release 3.22, 1995*).

#### 4.4.3 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad de un modelo implica, de manera estricta, el estudio de la variación de sus resultados en función de variaciones graduales en el valor de sus parámetros. En el presente estudio, en el cual se pone especial énfasis en la validación regional del modelo para su posterior aplicación al análisis de escenarios, se realizó un análisis de la sensibilidad del valor predictivo de las simulaciones frente a variaciones en la historia de uso de la tierra (que involucran cambios en más de una variable a la vez), siguiendo los esquemas detallados en Tabla 4.3. De esta forma, aunque el término *sensibilidad* no resulta absolutamente correcto dentro de la terminología de modelización, se adoptó aquí con el significado descripto.

La sensibilidad parcial relativa del modelo fue calculada mediante la siguiente expresión:

$$Spr = (dR / R) / (dX / X)$$

Donde,

*Spr* : Sensibilidad parcial relativa del modelo frente a cambios relativos en el valor de una variable *X*,

*dR / R*: variación relativa de los resultados del modelo y,

*dX / X*: variación relativa de la variable *X* (cuando la variable es precipitación, *X = P*, etc.).

Los resultados sobre los que se estudió la sensibilidad del modelo corresponden a la evolución de los diferentes compartimentos de C en el agroecosistema (suelo, biomasa y residuos vegetales). Sitios representativos, arbitrariamente seleccionados (un suelo *Hapludol típico* y un *Ustipsament típico*), fueron empleados para generar simulaciones con series climáticas correspondientes a las diferentes sub-regiones, bajo condiciones de pastizal y sabana. Se introdujeron variaciones artificiales en la presión de pastoreo, y en el número de años desde el desmonte y/o desde el inicio de las actividades que involucran labranzas, para diferentes sitios representativos dentro de la región. Se corrieron



simulaciones para un mismo sitio (Tabla 4.4) utilizando series climáticas publicadas para diferentes periodos durante el siglo XX, y se evaluó la influencia de la exactitud o confiabilidad en la fuente de información climática sobre los resultados de las simulaciones.

Tabla 4.4: Sitios hipotéticos seleccionados para las simulaciones correspondientes al análisis de sensibilidad.

Código	Clasificación taxonómica	Profundidad (m)		Textura			Densidad aparente (Mg m <sup>-3</sup> )
		Sólum (m)	Epipedón (m)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	
<i>Sitio A</i>	Hapludol típico	0,80	0,28	52,3	34,2	13,5	1,15
<i>Sitio B</i>	Ustipsament típico	0,48	0,24	82,5	12,4	5,1	1,30

Se estudiaron los cambios (relativos) operados en diferentes etapas clave (aspectos mecanísticos) del modelo al utilizar diferentes variables de sitio de mayor o menor similitud entre sí, intentado representar diferentes grados de variabilidad regional. De esta forma, se analizaron las etapas de fijación del C en el sistema (Producción de biomasa), su redistribución (Compartimentos de C en el agroecosistema) y su liberación (Balances de carbono). Los efectos provocados por el uso de las tierras bajo los diferentes esquemas adoptados para las simulaciones fueron estudiados a través de cambios operados sobre las variables de estado del modelo para las componentes suelo, biomasa y residuos vegetales. Se realizaron balances de carbono considerando a los diferentes compartimentos, bajo las situaciones de uso y manejo adoptadas. Estos balances abarcan periodos de simulación de entre 50 y 100 años, y acercan una estimación de las pérdidas de carbono de los agroecosistemas que puede traducirse indirectamente en volúmenes de emisión de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera.

## 5. Factores que controlan los niveles de materia orgánica en los suelos de la región

Los niveles de materia orgánica en el suelo al estado natural se encuentran determinados por un equilibrio entre los grupos de factores granulometría de la fracción inorgánica, clima y vegetación (o más ampliamente, bioma). Como en la mayoría de los casos la intervención del hombre en el ecosistema se ha hecho presente en grado variable, es necesario considerar además al factor uso de la tierra. Sin embargo, es importante diferenciar entre el corto (tecnología de manejo) y el largo (patrón de uso) plazo, por cuanto la materia orgánica puede ser considerada tanto una variable ecológica de rápida (e.g. sus fracciones) como de lenta (cantidad y tipo) reacción. Este capítulo presenta los resultados del relevamiento de los niveles de materia orgánica y carbono de los suelos de la región central de Argentina, siguiendo la zonificación propuesta en Capítulo 3. El efecto de los diferentes factores que controlan los niveles de materia orgánica en el suelo es analizado siguiendo la siguiente jerarquía: textura, clima (precipitaciones, régimen térmico) y tipo de vegetación - una desagregación similar a la del modelo CENTURY (Capítulo 2). El factor uso de la tierra aparecerá inevitablemente de manera transversal en el análisis de los anteriores, aunque su efecto es analizado con profundidad en un trabajo complementario (De Grazia, inédito). El estudio del efecto de los niveles de C en el suelo sobre sus propiedades físicas y químicas, que es presentado en Capítulo 6, complementa la información mencionada en la identificación de rangos de referencia para indicadores de calidad de suelos y sustentabilidad del sistema. Los resultados de éste capítulo, así como aquellos de los Capítulos 6 y 7, son discutidos integralmente en el Capítulo 8.

### 5.1 Variabilidad regional de la fracción orgánica edáfica

Más allá de los gradientes biofísicos y socioeconómicos (productivos) existentes entre las diversas sub-regiones descritas como 'llanuras', no se han verificado diferencias de demasiado contraste en los niveles de materia orgánica edáfica promedio para cada una de ellas (Tabla 5.1). Los suelos loésicos de las llanuras bien drenadas onduladas presentaron los mayores valores, mientras que el conjunto de los suelos de las llanuras medanosas presentó el menor promedio. Un caso de notable contraste lo constituyen los sectores serranos y pedemontanos, con niveles de materia orgánica promedio en los horizontes superficiales de los suelos cuatro a cinco veces mayores que en las diferentes llanuras. Las llanuras onduladas y medanosas presentaron elevados valores para el coeficiente de variación debido a su diversidad espacial (sub-regional) y a su heterogeneidad en el paisaje; de allí que el número de observaciones haya sido mayor en estos casos. Sin embargo, los rangos de textura de los suelos (rangos de contenidos de arcilla) medidos han sido relativamente estrechos para todas las sub-regiones. Las llanuras planas y las llanuras mal drenadas presentaron valores notablemente similares para el promedio de materia

orgánica así como para su variabilidad, aunque los rangos de textura de los suelos medidos fueron diferentes (el rango de texturas de las llanuras mal drenadas es más parecido al de las áreas serranas). En las sierras y el pedemonte, variaciones de 2,6 puntos porcentuales en el contenido de materia orgánica promedio para la sub-región se tradujeron en un coeficiente de variación relativamente pequeño (23%), a pesar de las importantes variaciones en altitud, exposición, pendiente y vegetación observadas.

Tabla 5.1: Estadísticos descriptivos para el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial y rango de contenido de arcilla ( $p < 0,05$ ) para los suelos incluidos en el conjunto de observaciones de cada sub-región

Sub-región	n	Materia orgánica (%)			Coeficiente de variación (%)	Rango arcilla (P<0,05) (%)
		Media	Desvío	IC 5%		
Llanuras b. d. planas	20	2,3	1,2	+/- 0,5	51	10,7 – 12,7
Llanuras b. d. onduladas	35	2,5	1,8	+/- 0,6	71	8,0 – 12,2
Llanuras mal drenadas	18	2,2	0,9	+/- 0,4	40	15,0 – 18,5
Llanuras medianosas	31	1,9	1,4	+/- 0,5	72	5,2 – 6,4
Áreas serranas*	20	11,3	2,6	+/- 1,1	23	16,5 – 22,7

\*Incluyendo sectores pedemontanos

IC 5%: Intervalo de confianza para la media con  $\alpha = 0,05$

La acentuada variabilidad sub-regional, particularmente en las llanuras onduladas y medianosas (ca. 70%), respondería no sólo a los rangos observados en los factores textura, vegetación y uso de la tierra, sino además a variaciones en los diferentes factores de control sobre los niveles de C orgánico a escala de unidad de paisaje simple o toposecuencia. De allí que fue necesario discriminar de los análisis a escalas regional y sub-regional a las condiciones de intrazonalidad; las mismas fueron estudiadas por separado (Sección 5.2), para luego integrarlas en el contexto de la relación paisaje-suelo (Sección 5.3). Los ambientes serranos constituyen situaciones notablemente diferentes dentro de la región, extremadamente variables internamente, y que requirieron del mismo modo un análisis particular (Sección 5.2). En los siguientes apartados se analiza la influencia de los factores textura, clima y vegetación, considerando especialmente a las llanuras y dentro de ellas sólo a las situaciones zonales.

### 5.1.1 Textura

El contenido de materia orgánica de los suelos de la región en condiciones (cuasi-) naturales o de equilibrio con los factores formadores aumentó, así como su rango de variación, en forma conjunta con el aumento en la suma de las fracciones arcilla y limo (0 a 50 $\mu$ m) en el horizonte superficial (Figura 5.1). Prácticamente no se observaron valores de materia orgánica menores al 2% en suelos que presentaron valores mayores al 30% para la fracción arcilla+limo. A partir de esta distribución, sería posible definir un potencial de saturación de carbono para los suelos de la región análogo al de Hassink

(1997), que para aquellos con una fracción arcilla+limo menor al 40% (el 60% de los suelos relevados en la región) no superaría los 25 a 30 g C kg<sup>-1</sup> suelo (4 a 5 % de materia orgánica, respectivamente). Sin embargo, la relación lineal entre la textura y la materia orgánica resultó relativamente débil ( $r^2 = 0,4$ ;  $P < 0,01$ ), debido a la variabilidad de esta última al considerar diferentes condiciones ecológicas. Buena parte de esta variabilidad (ca. 80% de las observaciones) pudo ser contenida al establecer un intervalo de confianza para el contenido de materia orgánica de +/- un desvío estándar. La mayoría de las observaciones que cayeron por fuera de este intervalo lo hicieron por exceso, es decir, más allá de su límite superior.

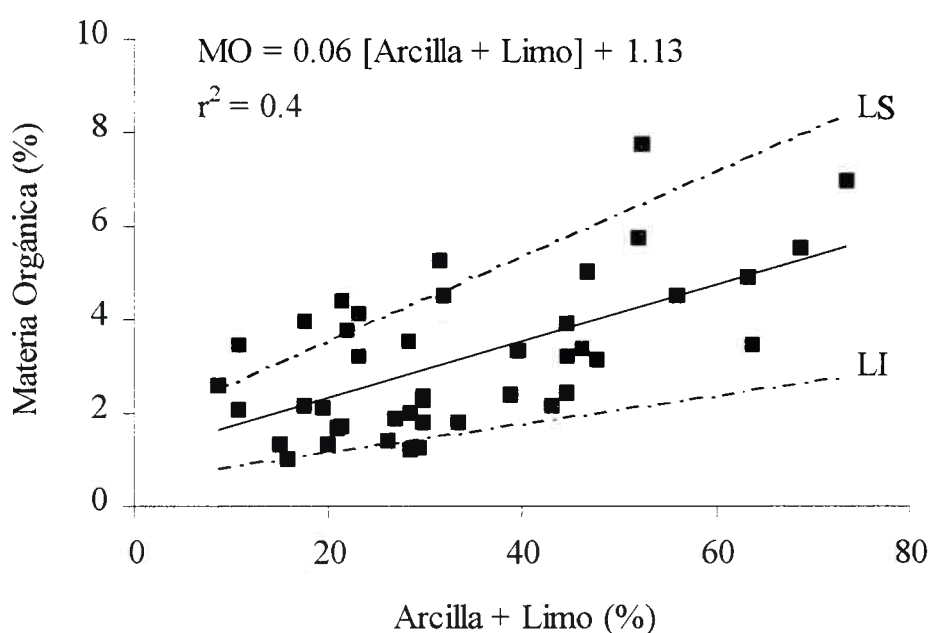


Figura 5.1: Relación entre la fracción arcilla+limo (%) y el contenido de materia orgánica (%) en el horizonte superficial de los suelos del centro de Argentina bajo condición natural y en situaciones zonales dentro de las sub-regiones de llanura ( $r^2 = 0,4$ ,  $P < 0,01$ ). Rango de referencia definido por el intervalo de confianza ( $P < 0,05$ ) para situaciones naturales.

La variabilidad 'vertical' en Fig. 5.1 respondería principalmente a diferencias en los factores clima y vegetación (ver siguientes apartados); algunos de estos suelos aún en condiciones naturales presentaron niveles de C de equilibrio muy bajos, cercanos al 1% de materia orgánica. El intervalo de confianza definido por una amplitud de +/- un desvío estándar constituiría una primera aproximación hacia la definición de rangos de referencia necesarios para el uso del contenido de materia orgánica como indicador de calidad de suelo y sustentabilidad. Sin embargo, la definición de indicadores sobre la base de condiciones de equilibrio naturales resultaría en valores de referencia demasiado elevados para evaluar la situación presente en la mayoría de los agrosistemas. Así, cuando el componente antrópico fue considerado en el análisis se obtuvo una distribución de puntos para la relación entre la textura y la materia orgánica como la que puede observarse en la Figura 5.2. La relación entre estas variables para las situaciones alteradas por el uso



resultó aún más débil ( $r^2 = 0,3$ ;  $P < 0,01$ ); las diferencias en el contenido de materia orgánica promedio entre las situaciones naturales y alteradas fueron mayores a medida que aumentó el contenido de arcilla+limo en el horizonte superficial.

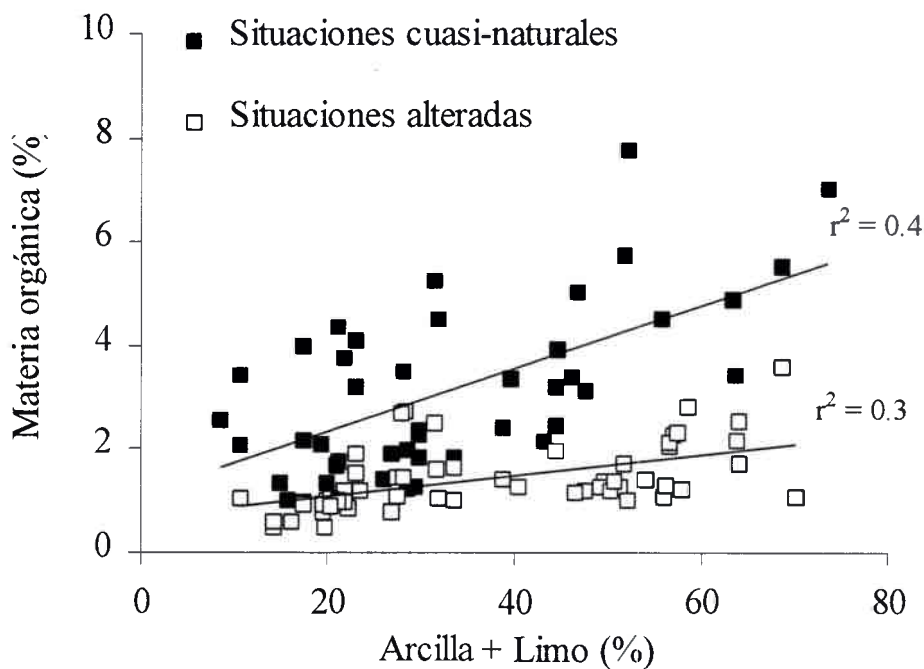


Figura 5.2: Relación entre la fracción arcilla+limo (%) y el contenido de materia orgánica (%) en el horizonte superficial de los suelos del centro de Argentina bajo condición natural y bajo condiciones con diferente grado de alteración antrópica, en situaciones zonales dentro de las sub-regiones de llanura.

Al considerar al conjunto de situaciones alteradas antrópicamente, no se ha discriminado en el grado de dicha alteración ni en el patrón de uso de la tierra, ni aún en el tipo de sistema de manejo imperante. Tal discriminación es analizada en un trabajo complementario (De Grazia, inédito). Sin embargo, al analizar la distribución de las observaciones para las situaciones alteradas resulta evidente la existencia de dos conjuntos de puntos, aproximadamente por encima y por debajo del 40% de arcilla+limo (Figura 5.2). Cada uno de estos conjuntos parecería guardar una relación creciente (pero en ambos casos con pendientes diferentes) entre las variables textura y materia orgánica, que reflejaría diferentes respuestas a las condiciones de uso y manejo particulares sobre los suelos de textura gruesa (predominio ganadero) y aquellos de origen loésico (predominio agrícola). En principio, y nuevamente para la totalidad de las observaciones, la distribución de puntos en Fig. 5.2 muestra una mayor diferencia en el contenido de materia orgánica entre situaciones naturales y alteradas a medida que aumenta el contenido de arcilla+limo. Esto puede ser ilustrado si se acepta la validez de las rectas de ajuste para ambas distribuciones (i.e. naturales y alteradas) y se utilizan sus ecuaciones para estimar el contenido de materia orgánica para suelos de diferente textura (Tabla 5.2);

la diferencia relativa o porcentual entre ambas situaciones se mantiene constante (ca. 60%), debido a la relación entre ambas pendientes.

Tabla 5.2: Estimación de contenidos de materia orgánica edáfica (MO, %) para suelos con diferentes valores para la fracción arcilla + limo (AL, %), utilizando las ecuaciones derivadas de los muestreos\* a campo para situaciones naturales y alteradas antrópicamente

Situación	Ecuaciones	Estimaciones			
		Rango AL (%)	20	40	60
Natural	$MO = 0,06*AL + 1,42$	MO (%)	2,6	3,8	4,9
Alterada	$MO = 0,02*AL + 0,68$	MO (%)	1,1	1,5	1,9

\*Las ecuaciones corresponden a las rectas de ajuste en Fig. 5.2 ( $P < 0,05$ )

La textura (i.e. fracción arcilla+limo) aparece como uno de los factores de mayor determinación en el control de los niveles de materia orgánica en los suelos de la región, por múltiples razones relacionadas con los mecanismos de protección del carbono (cf. Capítulo 8) y con las condiciones ambientales edáficas (agua, aire, calor, nutrientes) que afectan tanto al desarrollo vegetal como a los procesos de transformación de las fracciones orgánicas. Por tal motivo, ha sido necesario considerar al factor textura de manera transversal en el análisis de los efectos del clima y del bioma sobre los niveles de materia orgánica en el suelo, que son presentados a continuación.

### 5.1.2 Clima

Una primera aproximación al análisis de la influencia del factor clima sobre la fracción orgánica edáfica es ilustrada en la Figura 5.3, donde se han agrupado las observaciones correspondientes a las llanuras bien drenadas y medanosas de acuerdo a los puntos de registro climático de influencia más cercanos a cada sitio relevado. Sin embargo, y tal como lo indican los coeficientes de variación, existe una elevada variabilidad dentro de cada uno de estos grupos, debida a las variaciones en los factores granulometría del material originario y tipo de vegetación dominante. En las llanuras bien drenadas dicha variabilidad estuvo entre el 50 y 60% y los mayores valores promedio para el contenido de materia orgánica fueron medidos en las llanuras fuertemente onduladas, donde se registran precipitaciones que superan aproximadamente en 100 mm por año a las de la pampa plana. Los suelos del sector fuertemente ondulado presentan al mismo tiempo texturas más finas (sedimentos loésicos). En las llanuras medanosas la variabilidad dentro de cada grupo fue mayor aún (70 a 90%), y el contenido de materia orgánica del suelo siguió en forma aproximada al gradiente pluviométrico negativo existente de este a oeste (Capítulo 3), desde Vicuña Mackena a Villa Mercedes al norte y desde Villa Valeria a Buena Esperanza al sur de la sub-región.

Las llanuras mal drenadas presentaron una elevada variabilidad en el contenido de materia orgánica de los suelos, debido a las condiciones de intrazonalidad relacionadas con

drenajes impedidos y acumulación de sales (Capítulo 3). Por ejemplo, las observaciones correspondientes a la estación meteorológica Laboulaye presentaron un promedio de 1,3%, con un coeficiente de variación del 95%. Por tal motivo, en el análisis de los párrafos siguientes sólo han sido consideradas aquellas observaciones realizadas en posiciones de loma (zonales). Las observaciones realizadas en las sierras fueron agrupadas en torno a dos puntos de registro meteorológico: Rodeo de Yeguas (1200 msnm) y Comechingones (1420 msnm), con promedios para el contenido de materia orgánica de 8,1 y 10,5 %, respectivamente, y mucho menos variables que en las llanuras (CV: 23 y 18%, respectivamente). En el análisis que se desarrolla a continuación, sobre el efecto de diferentes variables climáticas sobre el contenido de materia orgánica en los suelos, las observaciones correspondientes a las sierras serán incluidas a fin de contar con amplios gradientes ambientales. Nótese que, a pesar de las diferencias encontradas para las llanuras, los gradientes climáticos (rangos de variación) no han sido lo suficientemente amplios, y que los mismos aparecen co-variando con gradientes de suelo y vegetación.

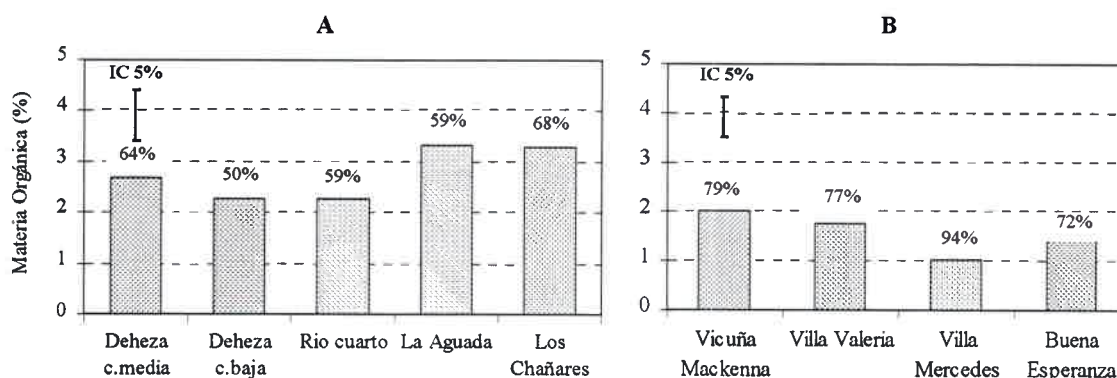


Figura 5.3: Contenido de materia orgánica promedio para el horizonte superficial de los suelos bajo condiciones naturales agrupados de acuerdo a las estaciones o puntos de registro meteorológico de influencia más cercanos a los sitios de muestreo. A: llanuras bien drenadas; B: llanuras medanosas. IC 5%: intervalo de confianza ( $P < 0.05$ ) para la distribución de observaciones dentro de cada sub-región, indicado por las barras verticales. Los valores sobre las barras indican los coeficientes de variación (%).

#### *Variación de la fracción orgánica con la altitud*

El contenido de materia orgánica en el horizonte superficial de los suelos relevados aumentó 0,007% ( $r^2 = 0,7$ ;  $P < 0.01$ ) por cada metro de incremento en su altitud con respecto al nivel del mar, en el rango comprendido aproximadamente entre los 120 y los 1600 m (Figura 5.4, Tabla 5.3). La distribución de puntos para esta relación indica la existencia de tres grupos de observaciones: un grupo correspondiente altitudes menores a los 500 msnm, otro en torno a los 900 msnm y un tercer grupo correspondiente a altitudes mayores a ca. 1200 msnm. Para el primer grupo, que contiene a la mayoría de las observaciones y que corresponden a las llanuras mal drenadas, medanosas y casi la totalidad de las llanuras bien drenadas, no se observó con claridad ningún patrón de

variación con respecto a la altitud – probablemente debido a la estrechez del gradiente. Las observaciones correspondientes a altitudes intermedias mostraron un amplio rango de contenidos de materia orgánica, mientras que aquellas situadas a altitudes mayores a los 1200 msnm mostraron valores superiores al 5%. Esta distribución implica que la altitud no puede ser considerada para la estimación de rangos de referencia para el contenido de materia orgánica como tal, sino sólo como una herramienta integradora de otras variables asociadas en un análisis de carácter descriptivo.

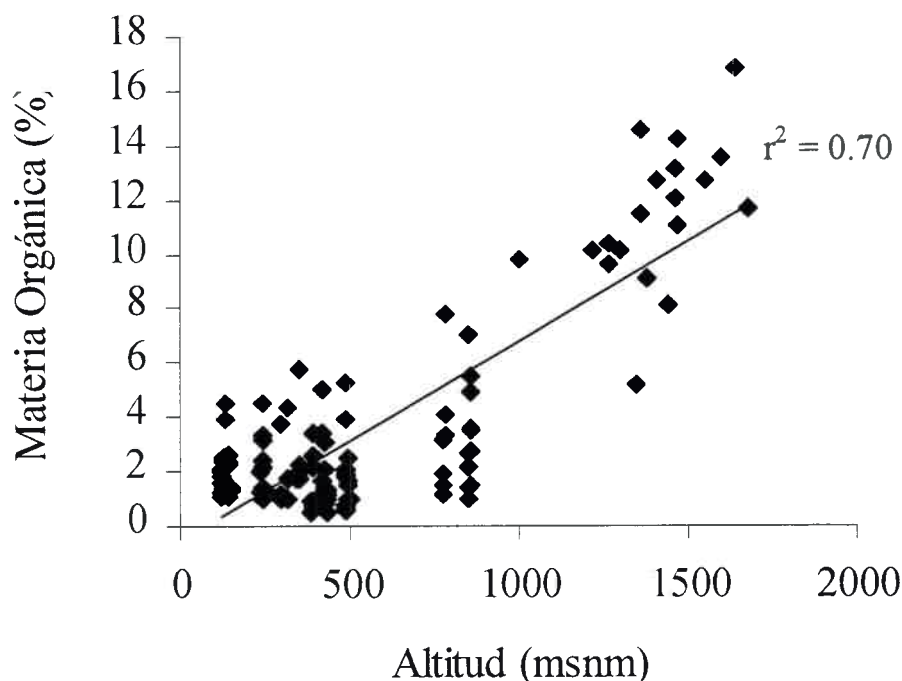


Figura 5.4: Relación entre la altitud (metros sobre el nivel del mar) y el contenido de materia orgánica (%) en el horizonte superficial de los suelos del centro de Argentina.

El incremento de materia orgánica a mayor altitud se debió a variaciones en distintas variables climáticas provocadas por la altitud, fundamentalmente en los regímenes hídrico y térmico (Figura 5.5 A – D). Así, la precipitación anual promedio [PP] aumentó 0,25 mm ( $r^2 = 0,4$ ;  $P < 0,05$ ) por metro de incremento en la altitud mientras que la evapotranspiración potencial [ETP] disminuyó 0,20 mm ( $r^2=0,7$ ;  $P < 0,05$ ) para el mismo rango, con lo que el déficit hídrico anual [PP – ETP] tendió a disminuir con la altitud a razón de 0,45 mm  $m^{-1}$  ( $r^2 = 0,7$ ;  $P < 0,05$ ). La temperatura media del aire, por su parte, tendió a disminuir a razón de 0,003 °C  $m^{-1}$  ( $r^2 = 0,4$ ;  $P < 0,05$ ) arrastrada por la mínima media, que disminuyó 0,006 °C ( $r^2 = 0,5$ ;  $P < 0,05$ ) por metro de incremento en la altitud. La temperatura máxima media, en cambio, se mantuvo relativamente constante en el rango de altitudes consideradas [ca. 120 a 1600 m], con lo que la amplitud térmica media anual tendió aumentar con la altitud a una tasa cuyo valor absoluto fue similar al de la mínima media.



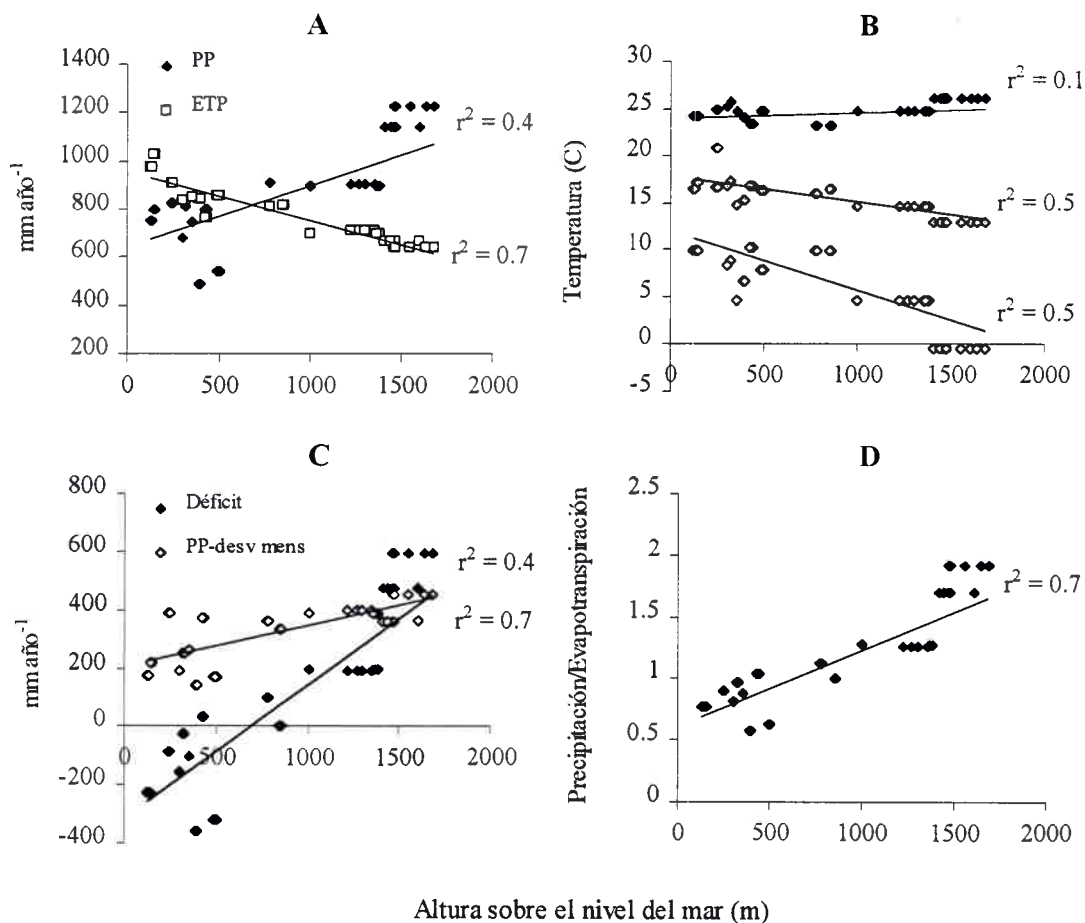


Figura 5.5: Relación entre la altitud (msnm) y diferentes variables climáticas (A – D) utilizadas para explicar la variabilidad en el contenido de materia orgánica de los suelos en la región central de Argentina: (A) Precipitación [PP] y evapotranspiración potencial [ETP] anuales (mm); (B) Temperaturas máxima [blanco], media [gris] y mínima [negro] medias del aire anuales (°C); (C) Déficit hídrico [PP – ETP] y diferencias en entre la precipitación y la suma de los desvíos mensuales promedio; (D) Cociente PP / ETP.

Diferentes variables fueron derivadas de los datos climáticos a fin de encontrar aquellas que mejor expliquen su variación con la altitud y, consecuentemente, con el contenido de materia orgánica en los suelos relevados. Las desviaciones mensuales en las precipitaciones, que tendieron a aumentar con la altitud ( $r^2 = 0,4$ ), fueron agregadas y sustraídas del promedio anual (Fig. 5.5 C), a fin de contar con una medida que ilustre la variabilidad hídrica en cada sitio; la relación entre esta variable y la altitud no resultó del todo satisfactoria ( $r^2 = 0,4$ ). El cociente entre la desviación mensual y el promedio anual fue asimismo calculado y relacionado con la altitud (datos no mostrados), aunque su variación no dependió de ésta ( $r^2 = 0,1$ ). El cociente entre la precipitación y la evapotranspiración potencial anuales (Fig. 5.5 D), en cambio, mostró un incremento de  $6 \cdot 10^{-4}$  unidades por cada metro de aumento en la altitud, y una relación que ajustó aceptablemente con esta última ( $r^2 = 0,7$ ;  $P < 0,05$ ). Estas variables (y otras derivadas) fueron posteriormente relacionadas con el contenido de materia orgánica en los suelos relevados por medio de regresiones (Tabla 5.3); todos los modelos de regresión fueron significativos ( $P \ll 0,05$ ) y en todos los casos los mejores ajustes fueron obtenidos mediante regresión lineal. Las relaciones más relevantes son ilustradas en Figura 5.6.

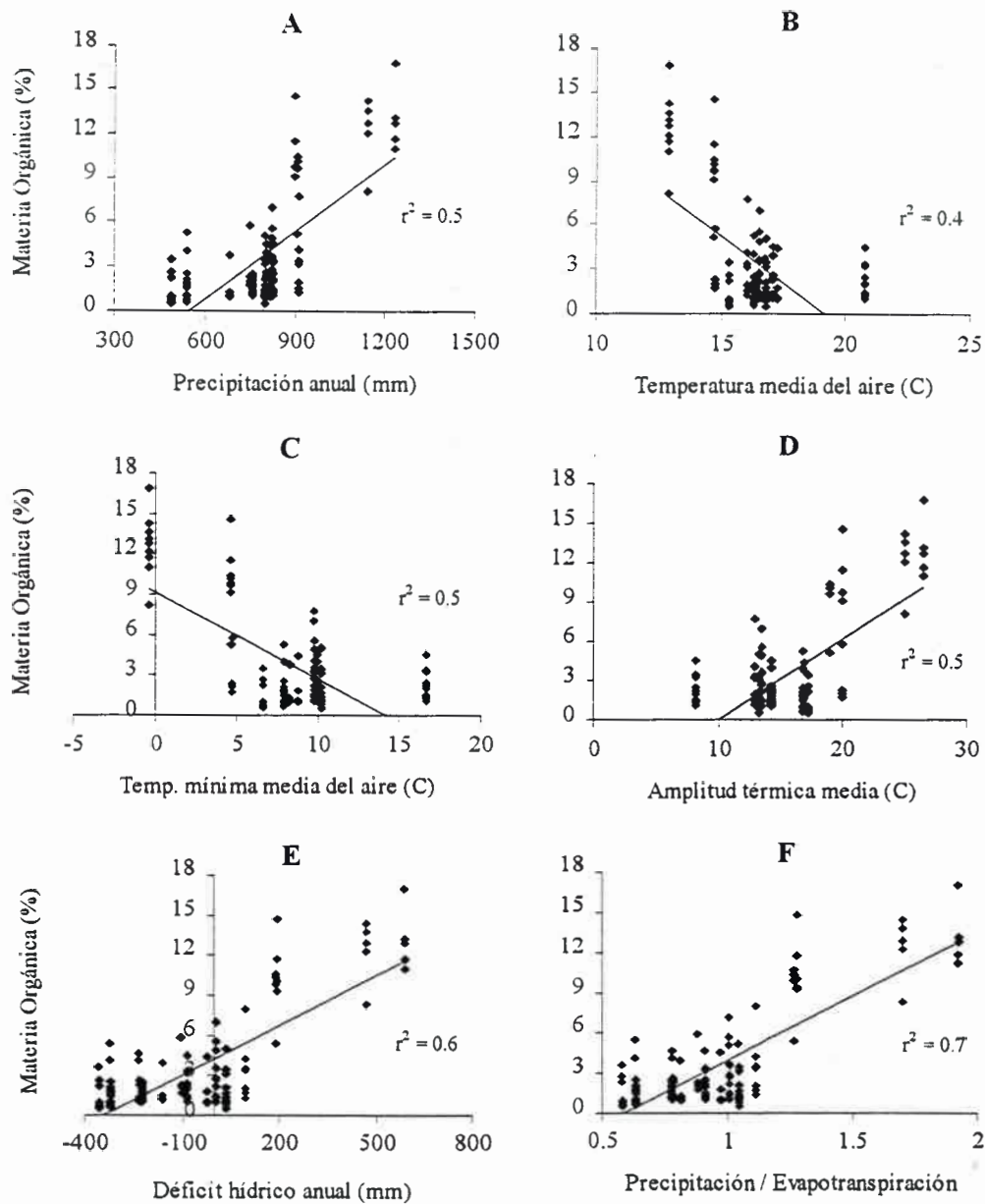


Figura 5.6: Variabilidad en el contenido de materia orgánica (%) en el horizonte superficial de los suelos de la región central de Argentina frente a variaciones en (A) la precipitación anual [mm], (B, C) las temperaturas media y mínima del aire [°C], (D) la amplitud térmica media anual, (E) el déficit hídrico [PP - ETP, mm] y (F) el cociente PP/ETP.

El déficit hídrico anual y el cociente entre precipitación [PP] y evapotranspiración potencial [ETP] presentaron las relaciones más satisfactorias en términos de definir rangos de referencia para el contenido de materia orgánica en los suelos (Tabla 5.3; Fig. 5.6). Cuando no se cuenta con el dato de evapotranspiración potencial, es posible utilizar la temperatura media del aire [TMA] como denominador; este cociente explicó del mismo modo cerca de un 70% de la variación en la fracción orgánica de los suelos de la región (Tabla 5.3). La relación entre el contenido de materia orgánica y el cociente PP/TMA fue positiva, y atravesó al eje de las abscisas en el valor 32 [mm °C<sup>-1</sup>]. Esto implica que para un régimen de precipitaciones determinado, a medida que aumenta la temperatura media el valor de este cociente se reduce (i.e. aumenta la ETP y por lo tanto el déficit hídrico; los

suelos varían desde regímenes e.g. údicos a ústicos), y el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial es menor. Por otra parte, este modelo empírico indicaría que en un sitio donde la temperatura media anual es de 15 °C, el valor de la fracción orgánica se aproximaría a cero si la precipitación anual se encuentra alrededor de los [15 x 32 =] 480 mm (o viceversa, en zonas de 500 mm temperaturas medias superiores a 15,6 °C llevarían los niveles de materia orgánica casi a cero). Desde luego que no es posible explicar el comportamiento frecuentemente asintótico que estas relaciones tienen en la naturaleza mediante relaciones lineales empíricas como éstas. Por ejemplo, estas relaciones no consideran diferencias regionales en el tipo de vegetación (adaptabilidad) ni aún en la textura de los suelos (amortiguación). Sin embargo, los cocientes PP/ETP y PP/TMA aparecen como variables útiles para aproximar rangos de referencia del control climático sobre la fracción orgánica dentro de la región.

Tabla 5.3: Modelos de regresión simple para la variación en el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial del suelo (%), considerando como variable explicativa a la altitud y a diferentes variables climáticas. Todos los modelos fueron significativos ( $P < 0,05$ ).

Variable explicativa	Unidad	Modelo		$r^2$
		Pendiente <sup>o</sup>	Ordenada al origen	
Altura sobre el nivel del mar	m	0,007	-0,56	0,70
Precipitación anual	mm	0,015	-8,39	0,49
Evapotranspiración potencial	mm	-0,024	23,43	0,42
Déficit hídrico anual	mm	0,012	4,31	0,62
Promedio desvío mensual	mm	0,246	-6,60	0,37
Temperatura media del aire	°C	-1,26	24,17	0,36
Temperatura mínima media	°C	-0,65	9,13	0,45
Amplitud térmica media	°C	0,61	-6,06	0,46
Precipitación/Evapotranspiración	-	9,54	-5,57	0,66
Precipitación/Temperatura media	-	0,20	-6,36	0,67

<sup>o</sup>Ciertos valores fueron redondeados a fin de mostrar al menos un dígito significativo

#### *Interacción con la textura*

La distribución de observaciones fue estratificada de acuerdo al contenido de la fracción arcilla+limo en el horizonte superficial de los suelos relevados, a fin de analizar el efecto de las variables climáticas en suelos de diferente textura. El criterio inicial fue utilizar un valor de 40% de arcilla+limo, que fuera sindicado como valor de referencia en la distribución textura vs. materia orgánica (cf. Figura 5.2), lo que dividió a la distribución en una proporción 60:40 (por encima y por debajo del 40% de arcilla+limo, respectivamente). La relación entre el contenido de materia orgánica del suelo y la altitud y/o los regímenes hídrico y térmico fue diferente para suelos con contenidos de arcilla+limo mayores o menores al 40% (Figura 5.7 A - C). Los suelos relativamente más finos mostraron una relación mucho más estrecha con la altitud y la precipitación anual, y

en menor medida con la amplitud térmica. Los suelos más gruesos (i.e. arcilla+limo < 40%) sólo mostraron cierto ajuste con respecto a la altitud (Fig. 5.7 A), debido a la existencia de un grupo de observaciones a altitudes mayores a los 1200 m, lo que no se tradujo en relaciones aceptables con respecto a la precipitación anual (Fig. 5.7 B) ni a la amplitud térmica (Fig. 5.7 B).

Sin embargo, la distribución de puntos en Fig. 5.7 mostró aún un amplio rango de oscilación en los niveles de materia orgánica, o variabilidad vertical, que no fueron discriminadas por esta estratificación. Por tal motivo, las observaciones fueron nuevamente estratificadas en tres y en cuatro intervalos de clase de acuerdo al contenido de arcilla+limo (Tabla 5.4, sólo se muestran las variables de mayor significación). En el primer caso se adoptaron las clases mayor a 50%, entre 25 y 50% y menor a 25%, lo que estratificó a la distribución aproximadamente en una proporción 25:40:35, respectivamente. La clase más fina (i.e. arcilla+limo > 50%) mostró los mejores grados de ajuste para las relaciones lineales entre la altitud, la precipitación anual o la amplitud térmica media y el contenido de materia orgánica. La mayor diferencia entre los intervalos de clase >50% y 25-50% con respecto al grado de ajuste de los modelos lineales fue observada al utilizar precipitación anual como variable explicativa. Para estos dos intervalos, la altitud explicó respectivamente el 80 y 70% de la variabilidad en la fracción orgánica edáfica.

Una nueva estratificación, considerando cuatro intervalos de clase para la fracción arcilla+limo [mayor a 60%, entre 40 y 60%, entre 20 y 40% y menor a 20%] dividió a la distribución en la proporción aproximada 10:30:45:15 (Tabla 5.4). Para los dos intervalos de clase correspondientes a texturas más finas, la altitud explicó el 80% de la variabilidad en el contenido de materia orgánica de los suelos, y el 60% de la misma para el intervalo de clase 20 - 40%. Evidentemente, la adopción de cuatro clases mejoró la capacidad para estimar el contenido de materia orgánica a través de la altitud mediante modelos empíricos lineales. Para los modelos que consideran a la precipitación anual y a la amplitud térmica como variables explicativas, la estratificación en cuatro clases mejoró levemente el grado de ajuste para la clase 40-60% arcilla+limo.

La relación entre el cociente precipitación anual / evapotranspiración potencial [PP/ETP] y el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial de los suelos relevados fue del mismo modo afectada por la estratificación por textura y por el número de intervalos de clase adoptados (Tabla 5.4; Figura 5.8 A - C). En los dos primeros casos las clases más finas mostraron los mejores grados de ajuste lineal, mientras que al adoptar cuatro intervalos de clase se obtuvo un mejor resultado para el rango 40-60%. La clase > 60% no contó con suficientes observaciones para un análisis confiable. En principio, estos resultados indicarían que, con un nivel de error del 5% (ANOVA de la regresión,  $P < 0,05$ ), es posible estimar el contenido de materia orgánica en suelos con contenidos de arcilla+limo > 40% con un modelo lineal que utilice el indicador PP/ETP como variable independiente, explicando hasta un 80% de su variabilidad. Por otra parte, las clases >50% y 25-50% (que comprenden en forma conjunta el 65% de las observaciones) presentan modelos con coeficientes semejantes, lo que representa una capacidad explicativa entre 70 y 80% de la variación para muestras con contenidos de arcilla+limo > 25%, al utilizar PP/ETP como variable independiente.



Tabla 5.4: Modelos de regresión lineal simple para el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial (%), utilizando cuatro variables explicativas, y estratificando a las observaciones en dos, tres y cuatro clases para la fracción arcilla+limo. Todos los modelos fueron estadísticamente significativos ( $P \ll 0.05$ )

Variable explicativa / arcilla+limo (clase)	n	Modelo		$r^2$
		Pendiente <sup>a</sup>	Ordenada	
<i>Altitud (msnm)</i>				
> 40%	38	0,008	0,123	0,78
< 40%	63	0,006	-0,516	0,60
> 50%	26	0,008	0,081	0,77
25 – 50%	39	0,007	0,023	0,73
< 25%	36	0,003	0,411	0,21
> 60%	10	0,008	0,045	0,79
40 – 60%	29	0,008	0,138	0,78
20 – 40%	45	0,006	-0,338	0,63
< 20%	17	0,004	-0,220	0,41
<i>Precipitación anual (mm)</i>				
> 40%	38	0,026	-17,32	0,72
< 40%	63	0,008	-3,14	0,22
> 50%	26	0,025	-16,33	0,71
25 – 50%	39	0,016	-9,28	0,46
< 25%	36	0,002	0,46	0,06
> 60%	10	0,020	-11,87	0,43
40 – 60%	29	0,027	-18,72	0,80
20 – 40%	45	0,011	-5,27	0,24
< 20%	17	0,002	0,24	0,07
<i>Amplitud térmica (°C)</i>				
> 40%	38	0,02	-11,87	0,43
< 40%	63	0,03	-18,72	0,80
> 50%	26	0,68	-6,28	0,56
25 – 50%	39	0,60	-5,13	0,52
< 25%	36	0,07	0,65	0,01
> 60%	10	0,51	-2,60	0,38
40 – 60%	29	0,66	-5,78	0,65
20 – 40%	45	0,57	-5,80	0,35
< 20%	17	0,25	-2,40	0,11
<i>Precipitación / Evapotranspiración</i>				
> 40%	38	10,85	-6,74	0,78
< 40%	63	6,67	-3,25	0,38
> 50%	26	10,71	-6,34	0,78
25 – 50%	39	10,37	-6,10	0,71
< 25%	36	1,31	0,62	0,06
> 60%	10	9,45	-4,59	0,56
40 – 60%	29	11,15	-7,26	0,83
20 – 40%	45	8,47	-4,94	0,45
< 20%	17	1,72	0,42	0,09

<sup>a</sup>Ciertos valores fueron redondeados a fin de mostrar al menos un dígito significativo

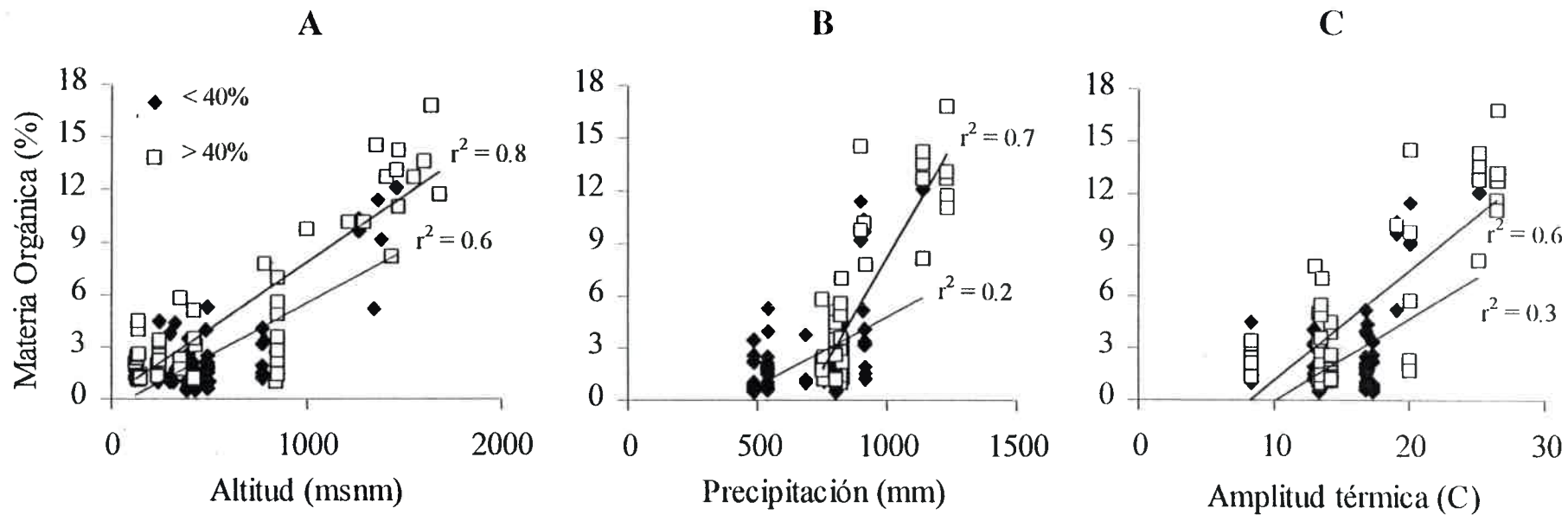


Figura 5.7: Relaciones entre (A) la altitud [msnm], (B) la precipitación anual [mm] y (C) la amplitud térmica media y el contenido de materia orgánica (%) en el horizonte superficial de los suelos de la región central de Argentina, agrupados de acuerdo al contenido de la fracción arcilla+limo [rombos negros: menor al 40%; cuadrados blancos: mayor al 40%].

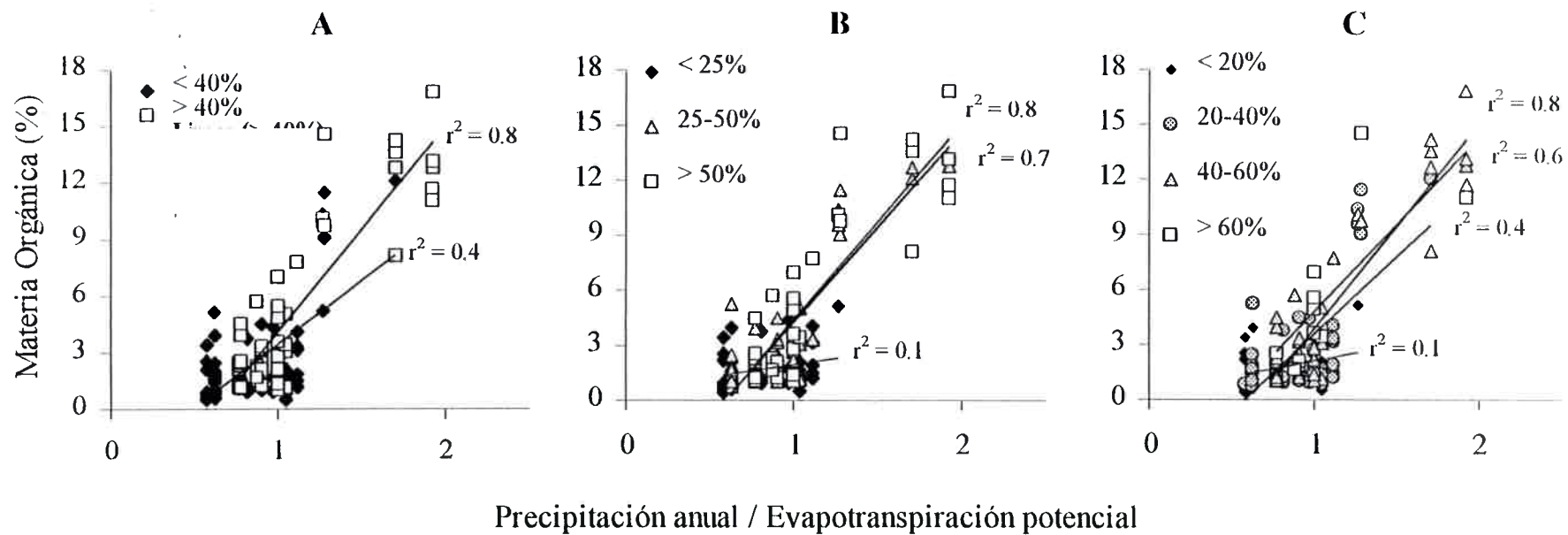


Figura 5.8: Relación entre el cociente precipitación anual y evapotranspiración potencial [PP/ETP] y el contenido de materia orgánica (%) en el horizonte superficial de los suelos de la región central de Argentina, estratificados en (A) dos, (B) tres o (C) cuatro intervalos de clase para la fracción arcilla+limo. (A) menor o mayor a 40%; (B) menor a 25%, entre 25 y 50% y mayor a 50%; (C) menor a 20%, entre 20 y 40%, entre 40 y 60% y mayor a 60%.

### 5.1.3 Vegetación

El contenido de materia orgánica promedio en el horizonte superficial de los suelos bajo condiciones de baja alteración antrópica (i.e. cuasi-naturales) fue mayor bajo las formaciones vegetales con un estrato dominante arbóreo que en aquellas dominadas por gramíneas en todas las sub-regiones (Tabla 5.5). Tales tipos de vegetación han sido categorizados aquí como 'Monte' y 'Pastizal', respectivamente; ciertos pastizales corresponden a situaciones naturales (abras del monte) mientras que otros provienen del desmonte. Los mayores contenidos de materia orgánica fueron medidos en los montes de los sectores serranos, seguidos por los de los relictos localizados en las llanuras bien drenadas y finalmente los de los bosques y montes del área arenosa. Una tendencia similar fue observada para los pastizales, aunque las diferencias entre ecosistemas dentro de las sub-regiones llanuras bien drenadas y llanuras mal drenadas fueron bastante pronunciadas. El contenido de materia orgánica no sólo varió para los diferentes ecosistemas sino además con la altitud en las sierras, con el tipo de vegetación en las llanuras bien drenadas y medanosas y con la textura dominante para las llanuras mal drenadas. Estas variaciones ilustran cuan dificultoso resulta aislar un factor de otro, entre aquellos que controlan los niveles de materia orgánica, por cuanto son justamente sus interacciones las que definen y caracterizan a los varios ecosistemas de la región.

Tabla 5.5: en página 84.

La textura (i.e. la fracción arcilla + limo), uno de los principales factores de control sobre la fracción orgánica (ver apartado 5.1.1), mostró también importantes variaciones entre ciertos ecosistemas así como dentro de algunos de ellos (cf. CV% en Tabla 5.5). Entre tipos de vegetación, en cambio, sólo se observaron diferencias para la fracción arcilla+limo en las llanuras bien drenadas y en los sectores serranos más bajos; en los pastizales relevados se midieron normalmente texturas algo más gruesas que en los montes. La ubicación en el paisaje (y en el agrosistema) de estos relictos de vegetación en zonas tan alteradas antrópicamente podría haber afectado estos resultados. Por otra parte, y especialmente en el caso de los pastizales, no se han podido localizar en todos los casos situaciones no alteradas. Pastizales hallados en las zonas de desmonte del antiguo Bosque de Algarrobo, que han sido utilizados con fines ganaderos, presentaron valores de materia orgánica cercanos al 2%, mientras que aquellos del sector fuertemente ondulado, cercano al pedemonte y sobre suelos de texturas más finas mostraron un nivel promedio del 4%. Claramente, este ejemplo ilustra la compleja interacción entre la variables textura, clima, vegetación y uso de la tierra en la determinación del contenido de materia orgánica. Las 'isletas de chañar' de la sub-región medanosa mostraron una variabilidad notablemente reducida en el contenido de materia orgánica, debido a que se encontraban asociados a situaciones dentro del paisaje (antiguos médanos y lomadas arenosas) de acotada variabilidad (cf. CV% para la textura en Tabla 5.5). Los bosques de Caldén que cubren una gran extensión territorial hacia el sudoeste de la sub-región llanuras medanosas presentaron una elevada variabilidad en las variables arcilla+limo y materia orgánica; estos bosques mostraron una condición más favorable en relación con los de otras sub-



regiones aunque en los casos de desmonte – ¡que está teniendo lugar a un ritmo creciente en la zona! – el contenido de materia orgánica se ve considerablemente reducido (ver pastizales en Tabla 5.5 – contrapágina). La interferencia del factor antrópico se verificó también en el caso del Ecotono entre el Bosque de Caldén y el Bosque de Quebracho blanco con Algarrobo, donde los escasos relictos de bosque hallados se encontraban notablemente degradados por extracción de maderas y uso ganadero, o se ubicaban en zonas no aprovechables para la producción de cultivos y pasturas.

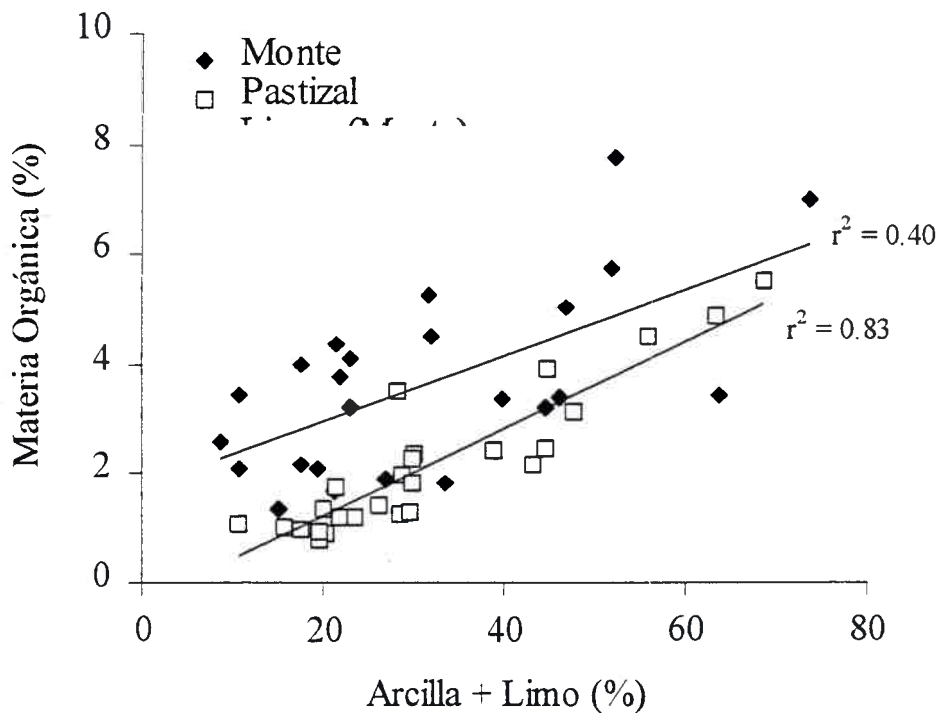


Figura 5.9: Relación entre la fracción arcilla+limo (%) y el contenido de materia orgánica (%) en el horizonte superficial de los suelos de la región central de Argentina en condición natural o de baja alteración antrópica, bajo diferente tipo de vegetación natural.

El tipo de vegetación dominante afectó también a la relación entre la textura y el contenido de materia orgánica del horizonte superficial en los suelos relevados bajo situaciones (cuasi-) naturales (Figura 5.9). Tal relación fue mucho más ajustada para el conjunto de suelos bajo vegetación de pastizal que para el caso de los montes ( $r^2$  0,83 y 0,40, respectivamente), mientras que los modelos lineales ( $P < 0.05$ ) presentaron diferencias tanto en su pendiente como en su ordenada al origen (Tabla 5.6). Los suelos de monte presentaron una elevada variabilidad en el contenido de materia orgánica en rangos de texturas gruesas, y mayores diferencias respecto a los suelos de pastizal (cf. Tabla 5.5). A medida que aumentó el valor de la fracción arcilla+limo la diferencia en el contenido de materia orgánica entre montes y pastizales fue menor; esta tendencia es también comparable con los valores promedio por tipo de vegetación para las diferentes sub-regiones en Tabla 5.5.

Estos resultados sugieren que en suelos arenosos el tipo de vegetación sería un determinante de mayor peso para el nivel de materia orgánica de equilibrio, y no tanto así en suelos más finos. Incrementos en la fracción arcilla+limo se traducen en mayores incrementos en el contenido de materia orgánica en los pastizales que en los montes, de acuerdo a las pendientes de los modelos lineales (Tabla 5.6). Por otra parte, el valor de la ordenada al origen del modelo lineal para suelos de pastizal indicaría un mínimo teórico de ca. 4,5% de arcilla+limo para el cual el valor de materia orgánica se hace cero; esto podría asemejarse a las condiciones de escasa a nula cobertura herbácea observadas en sectores de médanos, donde los niveles de materia orgánica son prácticamente nulos. El valor positivo de la ordenada al origen para suelos de monte es coherente con el hecho de que, más allá de la granulometría del suelo (o sedimento), cuando la vegetación leñosa se establece y prospera algún grado de cobertura siempre existen aportes de materia orgánica al suelo que, al mismo tiempo, generan condiciones para el establecimiento de un estrato herbáceo.

Tabla 5.6: Modelos de regresión lineal simple para explicar la variación en el contenido de materia orgánica (%) en el horizonte superficial de los suelos en condiciones naturales bajo diferente tipo de vegetación

Vegetación tipo	n	Modelo		
		Pendiente	Ordenada al origen	r <sup>2</sup>
Monte	23	0,06	1,74	0,40
Pastizal	26	0,08	-0,36	0,83

La influencia del tipo de vegetación sobre el contenido de materia orgánica aparece representada por un efecto de cobertura y modificación de las condiciones microclimáticas superficiales y por el aporte de residuos vegetales al suelo. La magnitud de tales aportes así como la calidad de los residuos y los procesos de incorporación (superficiales y/o sub-superficiales) varían para ambos tipos de vegetación al estado natural. Sin embargo, y especialmente en los casos relevados aquí, el patrón de uso de las tierras actual e histórico impone importantes modificaciones al tipo, cantidad y calidad de los aportes al suelo que no pueden ser soslayadas. Así, la relación entre la textura y el contenido de materia orgánica del horizonte superficial se ve nuevamente modificada bajo diferentes situaciones de uso de las tierras (Figura 5.10) debido a las remociones directas de biomasa y a las modificaciones del ambiente por degradación (e.g. erosión, compactación, exposición a fluctuaciones climáticas). Los procesos que llevan a estas diferencias son discutidos en profundidad en un trabajo complementario (De Grazia, inédito).

Tabla 5.5: Contenido de materia orgánica promedio en el horizonte superficial para suelos relevados bajo diferente tipo de vegetación, en situaciones lo más cercanas posibles a la condición natural o de equilibrio. Las sub-regiones fueron sub-estratificadas de acuerdo al ecosistema dominante en cada caso.

Tipo de vegetación Sub-región/ Ecosistema*	Monte					Pastizal				
	Materia orgánica (%)	Intervalo de confianza (P < 0.05)	CV (%)	Arcilla + limo (g 100 <sup>-1</sup> g)	CV (%)	Materia orgánica (%)	Intervalo de confianza (P < 0.05)	CV (%)	Arcilla + limo (g 100 <sup>-1</sup> g)	CV (%)
<i>(i) Llanuras bien drenadas</i>										
Bosque de Algarrobo (relictos del Espinal)	4,2	3,4 – 5,1	25	41,5	22	2,3	1,3 – 3,3	37	39,5	30
Bosque de Algarrobo con aportes del Chaco serrano	5,1	3,2 – 7,0	42	42,3	51	4,0	2,6 – 5,5	37	50,9	37
<i>(ii) Llanuras mal drenadas</i>										
Estepa Pampeana Occidental (sector textura FAF)	-	-	-	-	-	1,7	1,3 – 2,2	29	31,0	14
Estepa Pampeana Occidental (sector textura FAL)	-	-	-	-	-	3,3	2,2 – 4,4	35	40,1	32
<i>(iii) Llanuras medanosas</i>										
Estepa gramínea con isletas de Chañar (sector oriental)	4,1	3,7 – 4,4	8	20,1	12	1,3	0,9 – 1,8	30	20,2	11
Bosque de Caldén (distrito psamofítico del Espinal)	3,1	1,8 – 4,3	45	20,4	57	0,9	0,8 – 1,0	10	19,8	2
Ecotono Bosques de Caldén y de Quebracho blanco	1,8	1,5 – 2,1	18	18,6	33	1,1	1,0 – 1,3	12	16,1	35
<i>(iv) Sierras y pedemonte</i>										
Chaco serrano (altitud 1000 a 1400 msnm)	10,8	8,8 – 12,8	21	44,3	44	9,1	7,2 – 11,0	24	33,7	47
Chaco serrano (altitud 1400 a 1700 msnm)	13,1	11,1 – 15,1	17	54,0	9	12,2	10,1 – 14,3	20	49,1	17

\*Ver 'Formaciones vegetales' en Capítulo 3; FAF: franco arenosa fina; FAL: franco arenosa limosa

Tabla 5.7: Rangos de referencia para la profundidad, la fracción arcilla+limo y el contenido de materia orgánica del horizonte superficial de los suelos pertenecientes a los principales grandes grupos relevados en la región; promedio para el contenido de carbono orgánico en los primeros 0,2 m del perfil y valores medios de referencia para el contenido de materia orgánica en condiciones naturales

Sub-región/ Gran Grupo*	Profundidad del epipedón (m)			Arcilla + limo (g 100 <sup>-1</sup> g)			Materia orgánica (%)			C orgánico en 0,2 m (g m <sup>2</sup> )	Materia orgánica en la condición natural (%)	
	Media	+/- IC P<0.05	CV (%)	Media	+/- IC P<0.05	CV (%)	Media	+/- IC P<0.05	CV (%)		Monte	Pastizal
	<i>Llanuras bien drenadas</i>											
Hapludoles	0,23	0,02	24	42,6	7,1	41	3,1	0,8	60	4550	4,8	3,4
Haplustoles	0,21	0,01	15	43,0	5,6	35	2,2	0,5	57	2900	4,0	1,7
Ustortentes <sup>†</sup>	0,19	0,05	25	17,8	2,9	17	1,1	0,5	45	1100	1,5	1,4
<i>Llanuras mal drenadas</i>												
Haplustoles <sup>‡</sup>	0,25	0,03	15	29,4	1,5	12	1,8	0,4	27	2720	-	1,9
Haplacuales <sup>‡</sup>	0,22	0,04	21	42,3	5,7	14	1,6	0,5	33	3240	-	2,4
Natracualfes	0,21	0,04	15	53,0	5,2	24	2,2	1,7	68	4570	-	3,9
Duracualfes	0,17	0,03	17	55,1	2,9	6	1,9	1,3	79	4310	-	4,5
<i>Llanuras medianosas</i>												
Haplustoles	0,21	0,04	17	21,9	2,1	9	2,0	1,8	78	2680	3,8	1,2
Ustortentes	0,19	0,03	26	26,9	3,3	22	1,9	0,8	71	2720	3,3	-
Ustipsamientos	0,19	0,03	24	16,6	2,3	24	1,5	0,6	67	2100	2,8	1,0
Torrripsamientos	0,18	0,08	47	12,0	2,7	23	1,8	1,4	83	2580	3,0	-

\*De acuerdo a la *Soil Taxonomy* (USDA, 1999)

<sup>†</sup> Este gran grupo sólo fue relevado en las áreas aledañas a la localidad de Chaján

<sup>‡</sup> Se incluyeron los suelos sobrepuestos (e.g. *Haplustol thapto nátrico*)



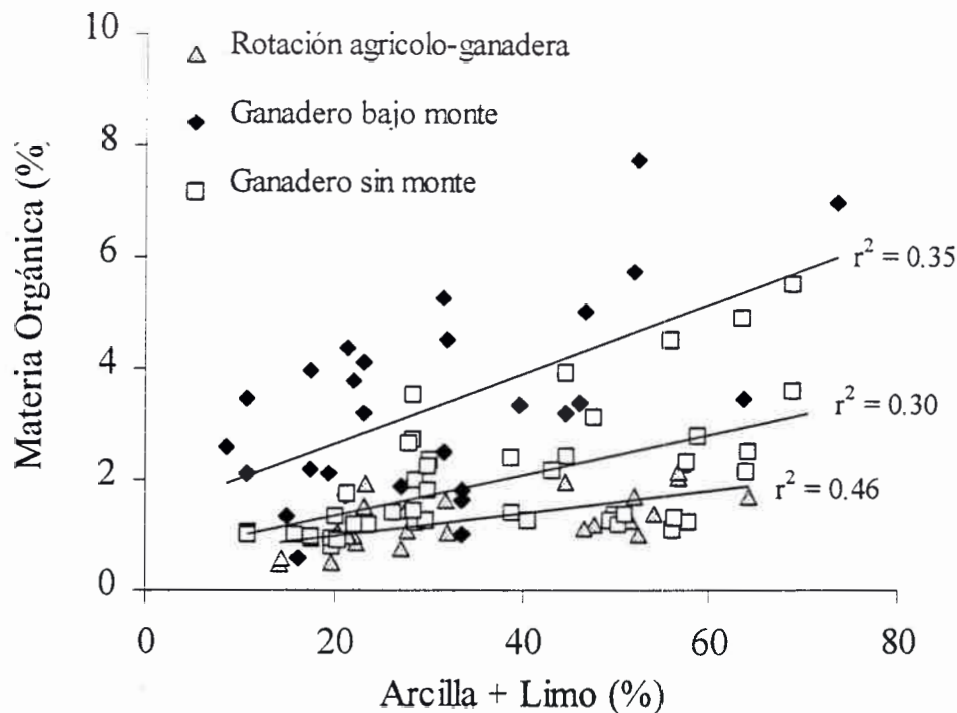


Figura 5.10: Relación entre la fracción arcilla+limo (%) y el contenido de materia orgánica (%) en el horizonte superficial de los suelos de la región central de Argentina bajo diferentes patrones históricos en el uso de las tierras y tipo de vegetación resultante.

#### 5.1.4 Desarrollo del perfil de suelo

Diferentes valores promedio, e importantes diferencias en su variabilidad, fueron observados para el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial entre los principales grandes grupos de suelo (USDA, 1999), dentro de las sub-regiones de tipo llanura (Tabla 5.7). Estas diferencias se condicen con las variaciones en la profundidad y en la textura del epipedón, y tienden a mantenerse bajo ambos tipos de vegetación en condiciones naturales. En las sub-regiones de las llanuras bien drenadas y medanosas los suelos del orden Molisol presentaron los mayores niveles de materia orgánica tanto en el promedio general (cercaos o superiores a 2%) como para las situaciones de baja alteración antrópica, mientras que en las llanuras mal drenadas fueron superados por los Alfisoles (2% en general y ca. 4% en condición 'natural'). Los suelos del orden Entisol presentaron valores promedio menores (1 a 2%), que se vieron incrementados bajo condiciones de monte. Notablemente, en todos los casos en que el contenido de materia orgánica fue elevado, también lo fue su variabilidad, lo que condujo a incrementar la amplitud de los intervalos de confianza ( $P < 0.05$ ) para el establecimiento de rangos de referencia. La mayoría de los suelos del sector serrano que fueron relevados no han sido aún determinados taxonómicamente.

Los Hapludoles (típico, éntico y thapto petrocálcico) de las llanuras bien drenadas presentaron niveles de materia orgánica promedio superiores a los Haplustoles, y una menor variación bajo diferentes tipos de vegetación que estos últimos (Tabla 5.7). Los Hapludoles fueron descritos mayormente en el sector de las llanuras fuertemente onduladas, donde además de haberse desarrollado sobre sedimentos mas finos (loésicos) reciben normalmente mayores precipitaciones. El gran grupo Ustortent aparece sólo en el sector de transición al sudoeste de esta sub-región (Chaján), en una zona climática y geomorfológicamente asimilable al sector de llanuras fuertemente onduladas pero con una mineralogía de los sedimentos originales que se asemeja a las condiciones de las llanuras medianosas (Capítulo 3). En esta última sub-región, resulta nuevamente evidente que el factor que ejerce el mayor control sobre el contenido de materia orgánica del horizonte superficial es el tipo de vegetación.

Los epipedones ótricos de los Alfisoles de las llanuras mal drenadas, desarrollados bajo un régimen ácuico, presentan una relativamente elevada fracción arcilla+limo y contienen alrededor de un 4% de materia orgánica en condiciones de baja alteración antrópica, que se reduce a la mitad en condiciones de uso pastoril (Tabla 5.7). Es de esperar también que la fracción orgánica de estos epipedones presente diferencias cualitativas con respecto a la de los epipedones mólicos desarrollados en la sub-región (Haplustoles). Por ejemplo, el relevamiento realizado por INTA en la sub-región (Carta de Suelos, Hoja 3363-33-2 Gral. Viamonte) indica diferencias entre ambos ordenes para la relación C/N de la materia orgánica (ca. 8 vs. 12, respectivamente) o para el color del horizonte superficial (e.g. pardo grisáceo vs. pardo oscuro, respectivamente), que ilustrarían estas variaciones. El efecto del anegamiento es ilustrado con posterioridad en este mismo capítulo (Sección 5.2).

La cantidad total de carbono orgánico en el epipedón ( $\text{g m}^{-2}$ ) fue ajustada mediante cálculo para los primeros 0,2 m del perfil utilizando mediciones de densidad aparente (Tabla 5.7), a fin de contar con una variable similar a la que entrega en sus salidas el modelo CENTURY (Capítulo 2). En general, esta variable sigue la tendencia indicada para la materia orgánica para los diferentes grandes grupos de suelo. Sin embargo, en el caso de los Alfisoles de las llanuras mal drenadas, los valores de carbono resultaron extremadamente elevados debido a que la densidad aparente medida en el horizonte superficial de estos suelos fue en general muy elevada (hasta  $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Estos suelos son notablemente afectados por compactación cuando son pastoreados en condiciones de anegamiento (Cisneros *et al.*, 1999), lo que afecta a su cobertura y a más largo plazo al contenido de materia orgánica. Por otra parte, existen gradientes verticales en el contenido de materia orgánica, que suelen ser muy pronunciados en ciertos suelos pertenecientes a esta sub-región (Sección 5.2).

### 5.1.5 Modelos empíricos para la variación regional de la fracción orgánica

Los factores de control sobre los niveles de materia orgánica en el horizonte superficial de los suelos analizados hasta aquí fueron incluidos en modelos de regresión múltiple desarrollados para explicar la variabilidad regional (Tabla 5.8). Como variable de

respuesta se utilizó el contenido de materia orgánica<sup>7</sup> en g kg<sup>-1</sup> de suelo a fin de obtener coeficientes lineales con menos cifras decimales. El conjunto de variables disponibles fue utilizado y se seleccionaron aquellos modelos que explicaron más del 80% de la variabilidad en el contenido de materia orgánica. Se procuró utilizar como variables explicativas datos ampliamente disponibles o fáciles de medir. Muchas de éstas variables estuvieron correlacionadas entre sí (Apéndice VI). Por ejemplo, la altitud (msnm) estuvo leve, pero positivamente correlacionada con la amplitud térmica ( $r = 0,4$ ) o con la suma de los desvíos mensuales de las precipitaciones ( $r = 0,4$ ), mientras que el cociente Precipitación/Evapotranspiración [PP/ETP] potencial lo estuvo con el contenido de arcilla+limo ( $r = 0,4$ ). Para los suelos de monte fue posible explicar el 85% de la variabilidad en el contenido de materia orgánica con un modelo que incluyó a la altitud y al porcentaje de arcilla, mientras que para los pastizales naturales se explicó un 83% al considerar al cociente PP/ETP y nuevamente a la fracción arcilla.

Tabla 5.8: Modelos de regresión múltiple para la estimación del contenido de materia orgánica (MO, g kg<sup>-1</sup>) en los suelos de la región. Todas las regresiones fueron altamente significativas ( $P < 0.001$ , ver ANOVAs en Apéndice VI)

Vegetación/ Historia de uso	Modelos	Variabilidad explicada (%)
Montes	$MO = 0.05 [Altitud] + 2.4 [Arc\%] - 10.1$	85
	$MO = 0.9 [PP/Tmed] + 2.8 [Arc\%] - 24.6$	80
	$MO = 0.05 [PP] + 2.4 [AT] + 2.6 [Arc\%] - 59.2$	82
	$MO = 0.05 [PP] - 5.1 [Tmed] + 2.8 [Arc\%] + 61.2$	81
	$MO = 0.75 [PP/Tmed] + 2.9 [Arc\%] - 144 PE - 7.7$	86
Pastizales	$MO = 103 [PP/ETP] + 1.1 [Arc\%] - 77.8$	83
	$MO = 2.4 [PP/Tmed] + 0.2 [Arc\%] - 85.5$	82
	$MO = 0.14 [PP] - 10.6 [Tmed] + 0.4 [Arc\%] - 85.3$	81
	$MO = 87.3 [PP/ETP] + 1.2 [Arc\%] - 145 PE - 35.8$	87
Agricultura/ Ganadería	$MO = 0.9 [Arc\%] + 0.16 [PP/Tmed] - 2.3$	50

*Altitud* en m; *Arc%*: porcentaje de arcilla; *PP*: precipitación anual en mm; *Tmed*: temperatura media del aire en °C; *AT*: amplitud térmica media; *PE*: profundidad del epipedón en m; *ETP*: evapotranspiración potencial en mm año<sup>-1</sup>

Estimaciones aceptables para el contenido de materia orgánica fueron obtenidas tanto para suelos de monte como para los de pastizal a partir de los datos de precipitación, temperatura del aire y porcentaje de arcilla (Tabla 5.8), datos éstos ampliamente disponibles para la región. La profundidad del epipedón apareció en los modelos con un coeficiente artificialmente negativo; esto se debió a que los mayores contenidos de materia orgánica fueron medidos en suelos del pedemonte o de las sierras, donde el desarrollo en profundidad del epipedón es generalmente menor que en los suelos de las llanuras. Para las situaciones alteradas, sin discriminar por historia de uso y manejo, sólo se pudo explicar un 50% de la variabilidad en el contenido de materia orgánica de los suelos. El

<sup>7</sup> No se utilizó el contenido de carbono debido a que la mayor parte de las publicaciones independientes utilizadas en la validación de estos modelos informa el dato de materia orgánica, como producto del porcentaje de carbono por el factor 1,725.



porcentaje de arcilla ingresó como factor de mayor peso relativo en el modelo. Evidentemente, es necesario analizar con mayor detalle el efecto antrópico a fin de acercarse a valores de referencia más confiables, discriminando por sub-región y/o por tipo e historia de uso; esto fue parte de los objetivos de un trabajo de tesis complementario que ha sido desarrollado simultáneamente (De Grazia, inédito).

### Validación

Utilizando datos independientes generados en la región y que no fueron incluidos en este trabajo (Apéndice VI), se procedió a validar algunos de estos modelos empíricos a fin de ilustrar sus posibles aplicaciones en la generación de rangos de valores de referencia. Tales datos (contenido de materia orgánica, textura, desarrollo del perfil, clima) correspondieron mayormente a series descritas en la Carta de Suelos de la República Argentina (INTA); en su selección se intentó asegurar una amplia cobertura territorial (longitud, latitud y altitud) e incluir series de diferente ubicación taxonómica (Grandes Grupos, USDA). Se utilizó un modelo para situaciones naturales y otro para situaciones alteradas antrópicamente, que incluyeron a las variables porcentaje de arcilla, precipitación anual, evapotranspiración potencial y temperatura media del aire (Tabla 5.8). La variabilidad en el contenido de materia orgánica (valores medidos) fue explicada en un 43% por el modelo para situaciones naturales y en un 79% por el correspondiente a situaciones alteradas antrópicamente ( $P < 0.01$ , en ambos casos).

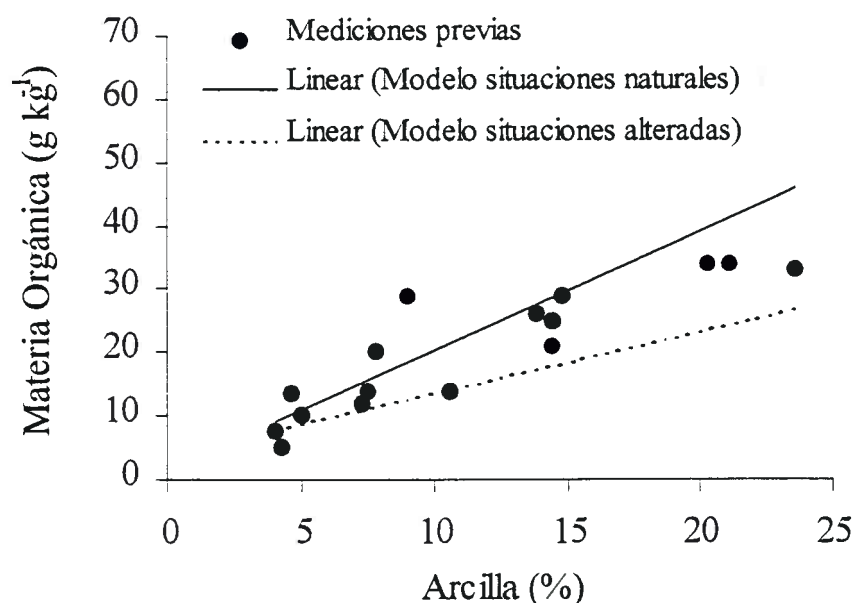


Figura 5.11: Validación de los modelos empíricos frente a datos independientes publicados en la carta de suelos de la república Argentina para suelos de la región que no fueron incluidos en la base de datos, utilizando al contenido de arcilla como eje de distribución. Los modelos fueron obtenidos por regresión lineal múltiple (Tabla 5.8) entre el contenido de materia orgánica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) y las variables independientes contenido arcilla (%) y el cociente PP/ETP.

Al graficar la relación entre el porcentaje de arcilla y el contenido de materia orgánica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) en el horizonte superficial, la mayor parte de las mediciones de materia orgánica



publicadas en las fuentes mencionadas estuvo dentro del rango de valores definido por las rectas de ajuste correspondientes a las estimaciones de ambos modelos utilizados (Figura 5.11). La metodología formal para la descripción de suelos implica que los mismos deben ser analizados en situaciones de baja o nula alteración, aunque con frecuencia esta condición no puede ser cumplida en su totalidad. La diferencia entre los valores estimados por ambos modelos aumentó con el contenido de arcilla, mientras que para los suelos de texturas gruesas el rango fue más estrecho; estos modelos fueron desarrollados a partir de datos que mostraron tal tendencia (cf. Fig. 5.2), de modo que la correspondencia resultó lógica. Sin embargo, la estrecha variabilidad para el rango de texturas gruesas se debió a que las situaciones de suelo bajo monte no fueron incluidas en este caso, ya que no se contó con mediciones independientes para su validación. Estos modelos aparecen como herramientas simples y útiles para una aproximación a valores materia orgánica de referencia, necesarios para la evaluación del uso sustentable de los suelos de la región.

#### *El modelo lineal de Feller*

Un modelo de referencia ampliamente utilizado para la estimación del contenido de carbono orgánico en el horizonte superficial a partir de los datos de arcilla y limo es el desarrollado por Feller (1995), cuya expresión es:

$$C \text{ (g kg}^{-1}\text{)} = 0,32 * [\text{arcilla+limo \%}] + 0,87$$

Este modelo fue desarrollado a partir de una extensa base de datos incluyendo suelos tropicales y subtropicales desde regímenes húmedos a áridos, bajo situaciones con y sin alteración antrópica. En la mayoría de estos casos, se contó con determinaciones de la fracción de limos finos (2 a 20  $\mu\text{m}$ ). Aplicando esta ecuación a la totalidad de las observaciones para situaciones zonales (exceptuando los ambientes serranos), para las cuales se contó con determinaciones de la fracción limos totales (2 a 50  $\mu\text{m}$ ) se obtuvo el resultado que ilustra la Figura 5.12 A. Valores de arcilla+limo (2 a 20  $\mu\text{m}$ ) han sido utilizados para alimentar al modelo lineal sólo para aquellas observaciones para las que se contó con el dato [i.e. el eje de las abscisas en Fig. 5.12 A no corresponde a los datos con que se alimentó al modelo lineal]; los mismos fueron artificialmente extrapolados hasta un valor correspondiente al 80% (2 a 50  $\mu\text{m}$ ) a fin de cubrir con el modelo teórico el rango de las observaciones. El modelo subestimó el valor de carbono orgánico medido, especialmente para las situaciones cuasi-naturales o de baja alteración antrópica. Sin embargo, para los suelos de pastizal se obtuvo un grado de ajuste entre observaciones y estimaciones más aceptable ( $r^2 = 0,83$ ) que para los suelos bajo monte ( $r^2 = 0,40$ ); la literatura no hace referencia a la inclusión de ecosistemas con un componente leñoso durante el desarrollo de este modelo.

Utilizando sólo aquellas observaciones para las cuales se contó con el dato de limos finos (2 a 20  $\mu\text{m}$ ), se calculó el contenido de arcilla+limo [0 a 20  $\mu\text{m}$ ] y se lo relacionó con el contenido de carbono orgánico en el horizonte superficial (Figura 5.12 B), comparándolo nuevamente con las estimaciones del modelo. En este caso, no se incluyeron observaciones correspondientes a suelos bajo montes ni se discriminó por historia de uso. El modelo nuevamente subestimó el contenido de carbono medido, y se obtuvo un grado

de ajuste menor entre los valores observados y estimados [ $y = 2.5x - 1.7$ ;  $r^2 = 0,58$ ]. Estas diferencias se deberían al hecho de que el rango de condiciones para las cuales el modelo fue desarrollado (cantidad y tipo de arcillas, régimen pluviométrico, amplitud térmica, uso de la tierra, etc.) han sido mucho más amplias que las correspondientes a la región central de Argentina. Por otra parte, la relación entre la fracción 0 a 20  $\mu\text{m}$  y el contenido de carbono para los suelos de la región (zonales) arrojó la siguiente expresión ( $r^2 = 0,6$ ;  $P < 0,05$ ;  $n = 42$ ):

$$C \text{ (g kg}^{-1}\text{)} = 0,79 [\text{arcilla+limo \%}] + 0,40$$

La pendiente de esta relación es muy superior a la del modelo de Feller (1995), mientras que la ordenada al origen se acerca más a cero. Esta relación explicó el 60% de la variabilidad en el contenido de carbono para suelos con contenidos de arcilla predominantemente bajos (i.e. menores al 20%, en el 95% de los casos). Las mayores desviaciones respecto de esta relación lineal se observaron para suelos con contenidos de arcilla alrededor del 25% (e.g. Serie Spermanzonni, llanuras fuertemente onduladas – ver Capítulos 3 y 4), que corresponden a los puntos extremos que aparecen en Fig. 5.12 B.

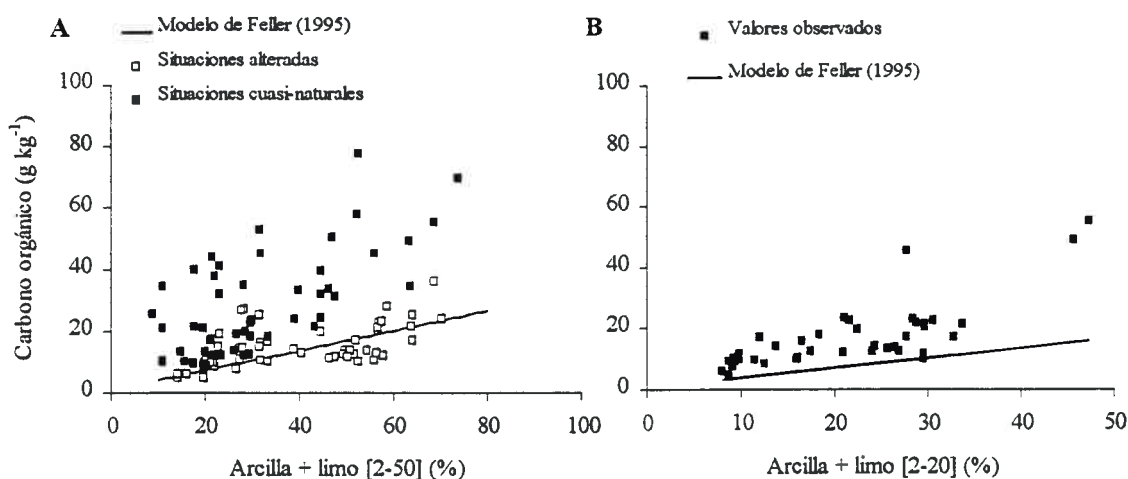


Figura 5.12: La relación entre la fracción arcilla+limo (%) y el contenido de carbono orgánico (g kg<sup>-1</sup>) en el horizonte superficial de los suelos de la región central de Argentina. (A) Comparación entre los valores medidos para situaciones ‘naturales’ y alteradas antrópicamente y los valores estimados por el modelo de Feller (1995), utilizando como eje descriptivo a la fracción 0 a 50  $\mu\text{m}$ . (B) Valores observados y valores estimados utilizando la fracción arcilla+limos finos [0 a 20  $\mu\text{m}$ ].

## 5.2 Casos particulares: Intrazonalidad y Ambientes serranos

### 5.2.1 La fracción orgánica en condiciones de anegamiento

La sub-región llanuras mal drenadas presenta una elevada variabilidad espacial en la distribución de sedimentos fluviales y eólicos que en conjunto con los procesos hidrológicos regionales y locales configura un patrón de elevada heterogeneidad en los tipos de suelos desarrollados y en su clase natural de drenaje, generando ambientes que

son colonizados por comunidades vegetales diversas en composición, ciclo y cobertura (Capítulo 3). Tal variabilidad espacial se transfiere a los procesos de formación y transformación de materia orgánica, a través de variaciones tanto en los aportes de residuos vegetales (cantidad y calidad) como en las condiciones ambientales edáficas (e.g. pH, potencial redox, concentración de sales, etc.). Así, al considerar la relación entre la textura y el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial de los suelos de esta sub-región se obtuvo un nivel de ajuste muy bajo ( $r^2 < 0,01$ ) debido a la gran dispersión de las observaciones, particularmente en las posiciones con drenaje pobre (cf. Tabla 5.7). Las observaciones agrupadas por ambiente o elemento del paisaje mostraron además mayores contenidos de materia orgánica para estas últimas, en concordancia con mayores valores promedio para la fracción arcilla+limo (Figura 5.13 A y B). El desarrollo en profundidad tanto del *solum* como del epipedón fue naturalmente menor en los suelos ubicados en los ambientes pobremente o mal drenados (Fig. 5.13 C y D).

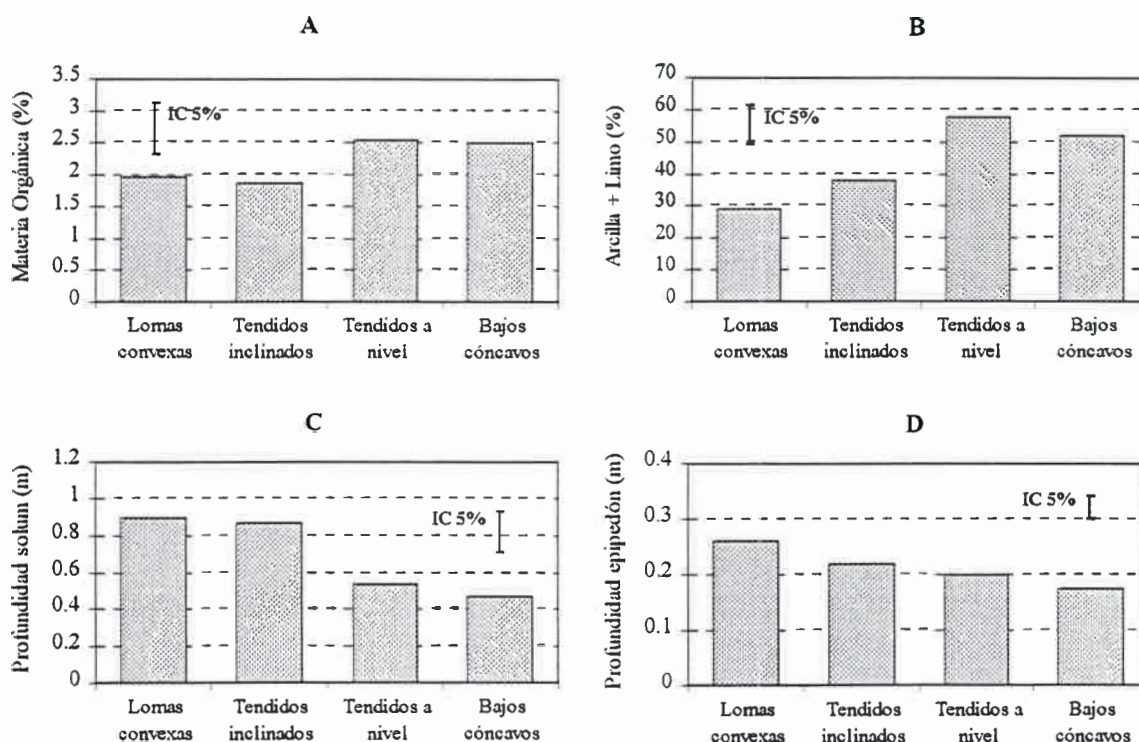


Figura 5.13: Valores promedio e intervalo de confianza ( $P < 0.05$ ) para (A) el contenido de materia orgánica [%], (B) la fracción arcilla+limo [%], y (C, D) las profundidades del solum y del epipedón [m] de los suelos correspondientes a cuatro ambientes [elementos del paisaje simple] característicos de la sub-región llanuras mal drenadas.

Varios son los factores que controlan simultáneamente los niveles de materia orgánica en los suelos de esta sub-región. Utilizando regresión lineal múltiple, fue posible explicar cerca del 60% de la variación en el contenido de materia orgánica mediante un modelo que involucró a la textura, a la concentración de sales, al desarrollo del epipedón y a su densidad aparente como variables explicativas ( $r^2 = 0,56$ ;  $P < 0,01$ ):

$$MO(\%) = 0,02 [A+L (\%)] - 0,07 [CE (dS m^{-1})] - 18,1 [PE (m)] - 4,9 [DAP (kg dm^{-3})] + 12,1$$



Donde,

MO: contenido de materia orgánica

A+L: proporción de arcilla+limo

CE: conductividad eléctrica en el extracto de saturación

PE: profundidad del epipedón

DAP: densidad aparente

Desde luego, la utilidad de este modelo es meramente descriptiva e ilustra el sentido de variación en el contenido de materia orgánica frente a cambios en el valor de estas variables. La fracción arcilla+limo presentó un coeficiente de correlación de 0,62 con la conductividad eléctrica y de 0,41 con la densidad aparente; cuando la textura no fue considerada se obtuvo prácticamente la misma capacidad descriptiva ( $r^2 = 0,55$ ;  $P < 0.01$ ). La inclusión de la densidad aparente en el modelo reflejó además las diferencias en el contenido de materia orgánica en suelos sujetos o no a compactación del horizonte superficial.

Tabla 5.9: Valores promedio e intervalos de confianza para la cantidad de carbono en el horizonte superficial de los suelos de la región llanuras mal drenadas, y valores de referencia<sup>o</sup> para la conductividad eléctrica (CE) y el pH

Ambiente	Carbono orgánico (g m <sup>-2</sup> )			CE (dS m <sup>-1</sup> )	pH
	Media	Intervalo de confianza*	CV %		
Lomas convexas	3720	3000 – 4440	19,7	< 0,5	6,9 +/-0,2
Tendidos inclinados	3150	2330 – 3980	26,5	9,3 +/-9,0	7,3 +/-0,1
Tendidos a nivel	3250	1750 – 4750	47,2	14,2 +/-8,9	8,1 +/-0,5
Bajos cóncavos	3200	1490 – 4920	54,7	15,0 +/-9,9	8,2 +/-0,5

<sup>o</sup> Fuente: Cisneros, 1994.

\* $P < 0.05$

Las variaciones en la profundidad del horizonte superficial y en la distribución vertical del contenido de materia orgánica (Figura 5.14) afectaron a la cantidad total de carbono (g m<sup>-2</sup>) en el epipedón (Tabla 5.9). En los suelos desarrollados en posiciones positivas del paisaje como las lomas convexas o los tendidos inclinados (Haplustoles típicos o énticos y Haplustoles thapto nátricos, respectivamente), donde las condiciones de drenaje son más favorables (y hasta excesivas) y no existen limitaciones para el desarrollo de la masa de raíces, el contenido de materia orgánica se mantiene relativamente más alto a mayores profundidades, reduciéndose aproximadamente sólo a la mitad a 0,2 m en el ejemplo de la Figura 5.14. A medida que las limitaciones al drenaje aumentan y tanto el sólum como el epipedón presentan un desarrollo más escaso (cf. Fig. 5.13 C y D), el contenido de materia orgánica se reduce más abruptamente con la profundidad; tal reducción fue del 80% a 0,2 m para el suelo correspondiente a los bajos cóncavos (Natracualf típico) en el ejemplo de la Figura 5.14. Por otra parte, es de esperar que existan diferencias cualitativas para este material orgánico acumulado superficialmente, bajo condiciones que favorecen a la formación de humus de tipo moder (Dumanski, 1978).



En consecuencia, las diferencias en la cantidad de carbono orgánico ( $\text{g m}^{-2}$ ) promedio para el horizonte superficial de los suelos de la sub-región no fueron de gran magnitud al comparar ambientes definidos por su clase natural de drenaje (Tabla 5.9). A pesar de tener un menor contenido porcentual de materia orgánica en promedio, los suelos de las lomas presentaron una cantidad de carbono algo mayor, con una variabilidad notablemente menor que para las situaciones pobremente drenadas. Estas diferencias se encuentran al mismo tiempo asociadas con variaciones en la conductividad eléctrica en el extracto de saturación y en el pH en agua medidas por Cisneros (1994) en el horizonte superficial de los suelos de estos ambientes representativos. La conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) explicó un 40% de la variabilidad en la cantidad de carbono orgánico ( $\text{g m}^{-2}$ ) mediante el modelo:  $y = -3,1x^2 + 68,4x + 3175,6$ , para la totalidad de las observaciones correspondientes a la sub-región (incluyendo áreas positivas).

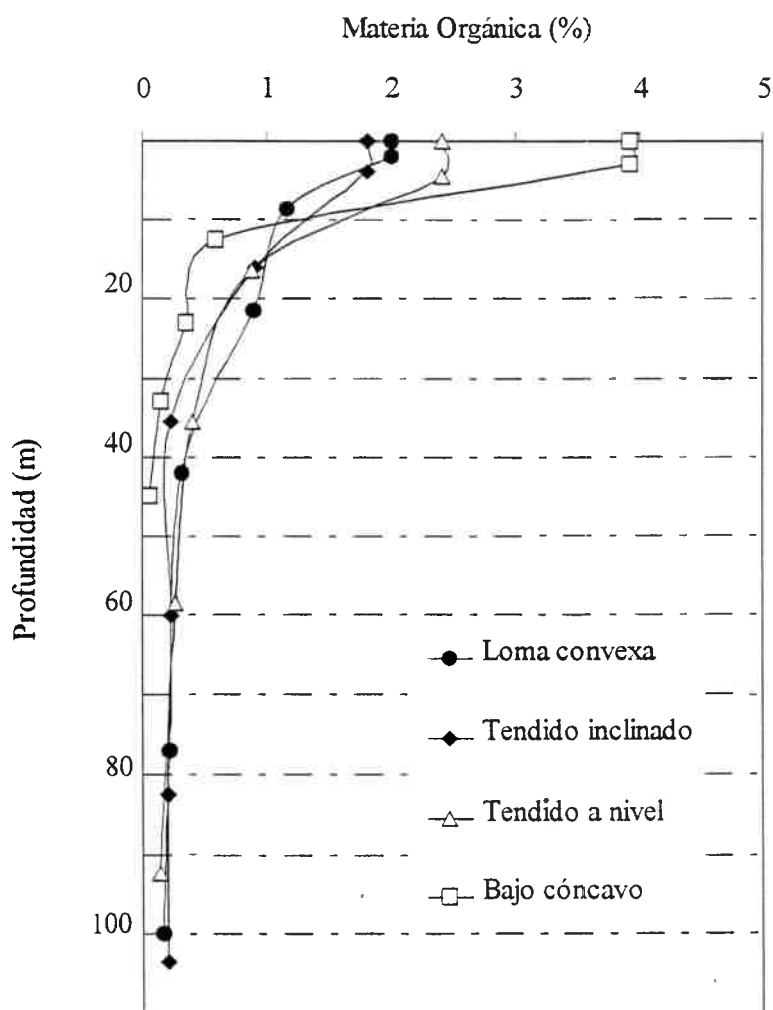


Figura 5.14: Distribución vertical del contenido de materia orgánica (%) en el perfil, para cuatro suelos de los ambientes característicos de las llanuras mal drenadas. Las observaciones corresponden al sector de texturas franco arenosas finas (Assunta) descrito por Cisneros, 1994.

### 5.2.2 Variabilidad del carbono orgánico en los suelos de las sierras

Los ambientes serranos se caracterizan por su elevada diversidad de condiciones de sitio, al combinarse variaciones en altitud, exposición, pendiente y profundidad del suelo, con el tipo de sedimento, las condiciones para el establecimiento vegetal y el tipo de vegetación que finalmente prospera. Tal interacción entre múltiples factores dificulta aún más el estudio de cada uno de ellos por separado. No obstante, los niveles de materia orgánica medidos en los suelos relevados son notablemente altos y poco variables (cf. Tabla 5.1), a pesar de los rangos de textura (y de los otros factores) observados. La proporción de la fracción arcilla+limo explicó menos de un 40% de la variabilidad en el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial de estos suelos mediante un modelo lineal, lo que aumentó a 44% con un polinomio de segundo orden (Figura 5.15 A, Tabla 5.10).

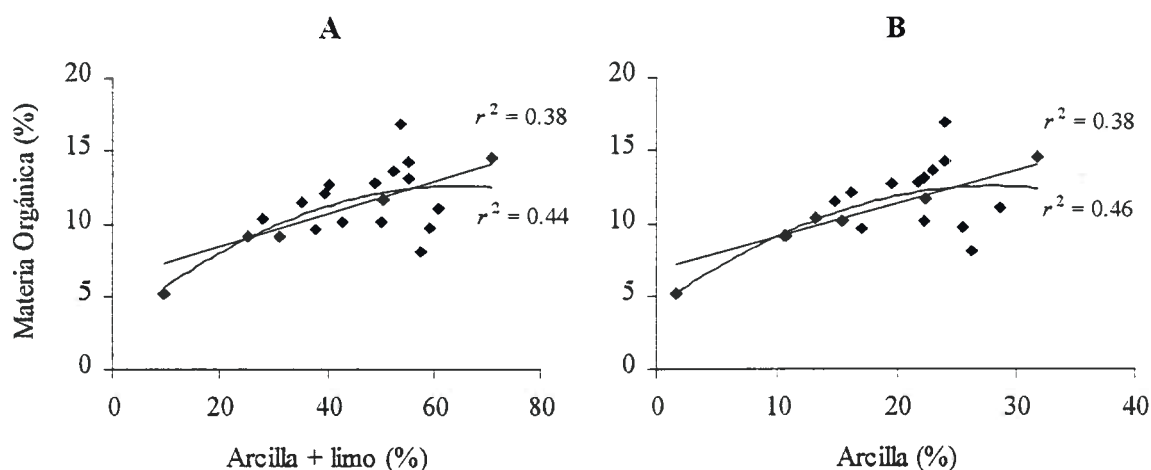


Figura 5.15: Relación entre la textura y el contenido de materia orgánica (%) en el horizonte superficial de los suelos de los sectores serranos, utilizando (A) la fracción 0 - 50  $\mu\text{m}$  y (B) la fracción 0 - 2  $\mu\text{m}$  como variables independientes.

Tabla 5.10: Modelos de regresión simple para el contenido de materia orgánica (%) en el horizonte superficial de los suelos de las sierras

Variable explicativa	Orden	Modelo	$r^2$
Arcilla + Limo (%)	I	$MO\% = 0.11 (A+L) + 6.3$	0.38
	II	$MO\% = -0.002 (A+L)^2 + 0.299 (A+L) + 2.95$	0.44
Arcilla (%)	I	$MO\% = 0.23 (A) + 6.9$	0.38
	II	$MO\% = -0.01 (A)^2 + 0.59 (A) + 4.3$	0.46

Aunque estos niveles de ajuste se encuentran en el orden del correspondiente al modelo lineal ajustado para la totalidad de las observaciones de las sub-regiones llanas (cf. Fig. 5.1), fue posible mejorarlos al considerar sólo a la proporción de arcilla en el horizonte superficial (Fig. 5.15 B; Tabla 5.10). El modelo de segundo orden ajustado a esta relación

describe un incremento decreciente (término exponencial negativo) en el contenido de materia orgánica con el aumento de la fracción arcilla: esta evolución, que explicó casi un 50% de la variabilidad, asemeja a un comportamiento del tipo 'saturación' con un máximo del 13% de materia orgánica para suelos con 29-30% de arcilla.

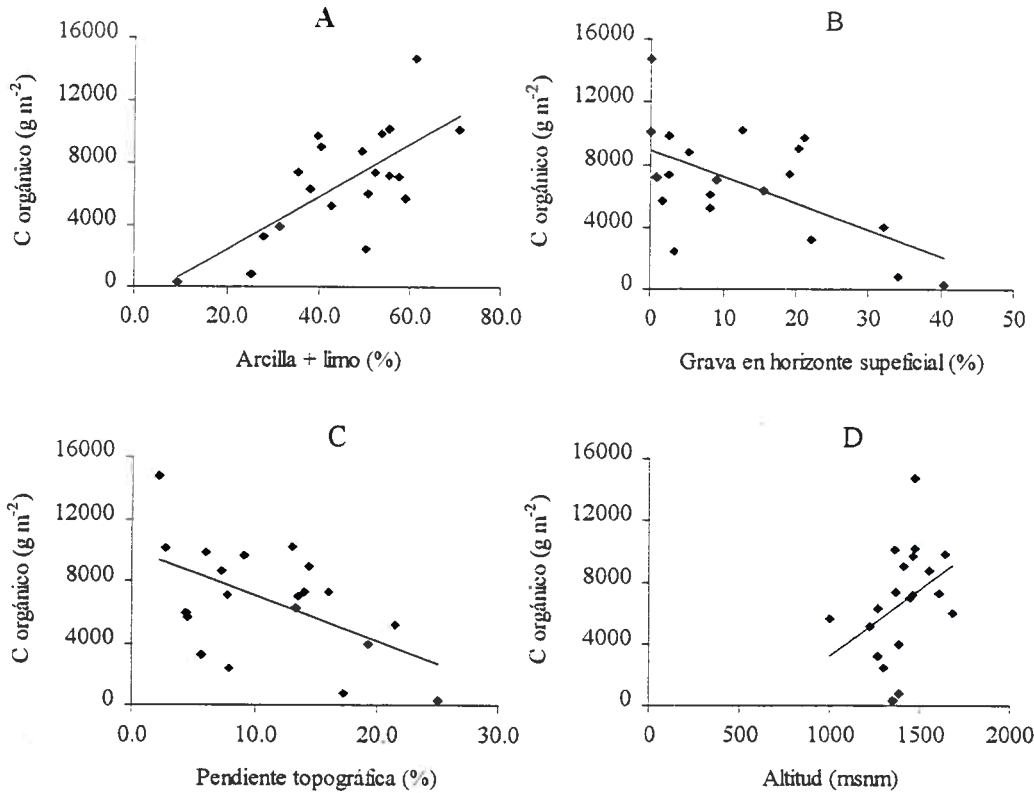


Figura 5.16: Variación del C orgánico en los horizontes superficiales de los suelos de los ambientes serranos frente a diferentes variables explicativas: (A) la suma de las fracciones limo y arcilla, (B) el contenido de gravas, (C) la pendiente del terreno y (D) la altitud del sitio con respecto al nivel del mar. Las ecuaciones de las rectas son presentadas en Tabla 5.11.

Una de las mayores limitaciones (y fuentes de variabilidad) en los suelos de las sierras es su profundidad, la cual se ve reducida en posiciones de pendientes pronunciadas o cuando existe un contacto lítico. La profundidad promedio para el sólum de los suelos relevados fue 0,47 +/- 0,28 m, con un intervalo de confianza ( $P < 0,05$ ) entre 0,35 y 0,60 m. La profundidad del horizonte orgánico frecuentemente se encuentra limitada a unos pocos centímetros superficiales (hasta 0,03 m). En tales situaciones, es más conveniente analizar la cantidad de carbono por unidad de superficie ( $\text{g C m}^{-2}$ ) en lugar del contenido porcentual, a fin de poder comparar entre suelos con profundidades del epipedón muy variables. La cantidad de carbono promedio acumulado en el horizonte superficial de los suelos de las sierras fue 6650 +/- 3330  $\text{g m}^{-2}$ , la cual aumentó con el incremento de la fracción arcilla+limo (Figura 5.16 A).

Sin embargo, no sólo la textura explicó - aunque débilmente - esta variabilidad en la cantidad de carbono superficial; variables tales como el contenido de gravas y la pendiente

topográfica brindaron modelos lineales con un grado de ajuste comparable (Fig. 5.16 B y C), y no así la altitud del sitio (Fig. 5.16 D) cuyo rango de variación fue relativamente estrecho (Tabla 5.11). Al usar grava (%) o pendiente (%) como variables independientes para explicar la variación del carbono superficial, se obtuvieron grados de ajuste aún mayores con modelos de decrecimiento exponencial, tal como se advierte en la distribución de puntos en Fig. 5.16. El carbono superficial disminuyó con la proporción de grava [G%] de acuerdo a la expresión  $C (g m^{-2}) = 10415 * e^{-0.053G\%}$  ( $r^2 = 0,50$ ), y con la pendiente del terreno [P%] según  $C (g m^{-2}) = 13216 * e^{-0.083P\%}$  ( $r^2 = 0,33$ ). Además, el contenido de gravas aumentó en posiciones de mayor pendiente ( $r^2 = 0,50$ ), mientras que la profundidad del solum y el contenido de arcilla+limo tendieron a disminuir en tales casos ( $r^2 = 0,44$  y  $r^2 = 0,49$ , respectivamente). En cierto grado, la pendiente resultó una variable integradora de las condiciones de sitio que explican la variación de la cantidad de carbono superficial en estos suelos.

Tabla 5.11: Modelos de regresión lineal simple para explicar la variación de la cantidad de carbono total ( $g m^{-2}$ ) en el horizonte superficial de los suelos de los ambientes serranos

Variable explicativa	Unidad	Modelo		
		Pendiente	Ordenada al origen	$r^2$
Arcilla + Limo	%	167,7	855	0,48
Grava	%	-170,7	8943	0,35
Pendiente topográfica	%	-291,1	10007	0,28
Altitud	msnm	8,7	5410	0,15

### 5.3 Integración en el contexto paisaje-suelo

En aquellos sectores donde predominan paisajes caracterizados por un notable 'movimiento' o variabilidad topográfica, y/o donde la distribución de los materiales originarios presenta un patrón espacialmente heterogéneo, afectando a la funcionalidad de los perfiles de suelo y al establecimiento/prosperidad de las formas vegetales, la variabilidad espacial en el contenido de materia orgánica de los suelos no puede ser explicada satisfactoriamente por los factores zonales descriptos hasta aquí. Es necesario entonces considerar los procesos que tienen lugar a escalas menores (1:50000 – 1:20000), que afectan a la funcionalidad de los suelos en cada ambiente y a las interrelaciones entre ambientes, a fin de aproximar rangos de referencia para calidad y salud de suelos relevantes para cada situación. Por ejemplo, el cálculo de la capacidad de fijación de C en materia orgánica a partir del  $CO_2$  atmosférico por unidad de superficie – una aplicación corriente de los modelos que describen la dinámica del carbono – puede presentar importantes diferencias entre los ambientes que componen un paisaje, sean éstas por topografía (drenaje, erosión), tipo de sedimentos, vegetación dominante y/o uso de la tierra actual e histórico. Las estimaciones basadas en factores zonales tienden a acumular estas desviaciones cuando son agregadas para grandes áreas. Debido a las características



del paisaje, este aspecto resulta mayormente importante en las llanuras bien drenadas fuertemente onduladas, en las llanuras medianosas y en las llanuras mal drenadas. Para éstas últimas, al igual que para los ambientes serranos, se ha discutido y ejemplificado la variabilidad al nivel de paisaje en la Sección 5.2.

El estado estacionario para el contenido de materia orgánica en el suelo en cualquier punto espacio-temporal puede ser descripto mediante una expresión simple, asumiendo homogeneidad en la composición de la fracción orgánica y en las tasas de transformación involucradas (Yang & Janssen, 2000). El estado estacionario  $[Y]$  resulta entonces del balance entre las adiciones  $[hX, \text{kg año}^{-1}]$  y las pérdidas  $[kY, \text{kg año}^{-1}]$ , de acuerdo a la expresión:  $Y = hX / k$ , donde  $h$  representa a la tasa de humificación (tasa relativa de ganancia en el contenido de materia orgánica edáfica a partir de restos vegetales, en  $\text{año}^{-1}$ ) y  $k$  representa a la tasa de descomposición (tasa relativa de producción de  $\text{CO}_2$  a partir de las fracciones orgánicas del suelo, estable, lábil o residual, en  $\text{año}^{-1}$ ). Esta expresión simple permite estudiar el efecto de los diferentes factores sobre los procesos de formación y transformación que llevarían a un estado estacionario teórico, distinguiendo entre aquellos que afectan a los aportes de restos orgánicos  $[X]$ , a su transformación en 'humus'  $[h]$  o a la estabilidad de éste en el suelo  $[k]$ . Estos conceptos teóricos pueden ser utilizados como guía para la integración de la dinámica orgánica en el contexto paisaje-suelo; los mismos han sido aplicados los siguientes ejemplos correspondientes a las llanuras bien drenadas y medianosas.

#### *Efecto de la distribución de los sedimentos en sectores fuertemente ondulados*

En los paisajes fuertemente ondulados es posible visualizar con claridad las relaciones funcionales entre ambientes de los sectores altos (lomas) y de los bajos, conectados topográficamente por laderas de pendiente y longitud variables. Tales relaciones se manifiestan mediante las transferencias superficiales de agua, solutos y sedimentos (orgánicos e inorgánicos), y en mayor o menor grado mediante las sub-superficiales (i.e. según textura, pluviometría, presencia de capas impermeables), que involucran agua y solutos. Adicionalmente, los sectores bajos pueden haber recibido además aportes de sedimentos fluviales asociados a los cauces naturales, o estar vinculados a capas freáticas fluctuantes, cercanas a la superficie. Estos procesos implican una distribución diferencial acentuada en los sedimentos originarios de los suelos y en la funcionalidad de los perfiles desarrollados. Un estudio de caso en la localidad de La Aguada (Bricchi et al., 2004), correspondiente a la sub-región llanuras bien drenadas, ha sido utilizado aquí para ilustrar el efecto de la distribución espacial de los sedimentos sobre el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial de los suelos (Figura 5.17).

Los suelos de La Aguada han sido clasificados como Hapludoles típicos; los desarrollados en las lomas convexas y media-lomas (laderas) presentan un desarrollo en profundidad del solum de ca. 0,8 m y un contenido de materia orgánica en situaciones de baja alteración (pastizal) del 2 al 3%. Los suelos del bajo, con una profundidad del solum de ca. 0,9 m, no presentan problemas de drenaje y pueden contener hasta un 5% de materia orgánica en el epipedón, cuya profundidad supera los 0,2 m (Fig. 5.17). El efecto de la distribución

espacial de los sedimentos se refleja en la textura del epipedón de ambos suelos<sup>8</sup>; el histograma en Fig. 5.17 ilustra con claridad la mayor abundancia de materiales finos (0 a 20 $\mu$ m) en los suelos del bajo, que duplican en cantidad a los de la loma. Las diferencias en el contenido de materia orgánica, así como en la textura de los horizontes superficiales se traducen en diferentes grados de estructuración y porosidad (cantidad y calidad), que influyen sobre la conducción de aire, agua y calor dentro del perfil; frente a tales modificaciones en su hábitat, la población y funcionalidad de los microorganismos del suelo es afectada y, en condiciones naturales o bajo cultivo, también lo es el desarrollo de la biomasa radical y aérea de la vegetación.

Las diferencias en la estática y dinámica de la energía y los fluidos dentro del perfil del suelo repercuten sobre las tasas de adición [kX] y de pérdida [kY] que afectan a su contenido de materia orgánica a diferentes profundidades. Para el epipedón, el suelo del bajo retuvo un 15% de humedad (v/v) frente a una succión de 15 bar, mientras que el de la loma retuvo un 10%; la retención hídrica a 0,3 bar fue de 28.5% para el suelo del bajo y no fue determinada para la loma, aunque la Hoja Apla Corral (3366-18) de la carta de suelos informa un equivalente de humedad de 19,2% para un suelo de similares características (Serie La Invernada). Estas diferencias en humedad disponible afectan tanto a  $h$  como a  $k$ , y por consecuencia también a  $X$  debido al desarrollo y cobertura de la vegetación. Mayores aportes de residuos vegetales [X] superficiales y subsuperficiales, sumado a condiciones más favorables para su humificación [ $h$ ], y un clima edáfico menos conducente para la descomposición [ $k$ ], más el efecto de 'protección' del C ejercido por las partículas finas han llevado a un contenido de materia orgánica más alto y a mayores profundidades en los suelos del bajo (Fig. 5.17).

Un ejemplo aún más contundente lo constituye el relevamiento realizado no lejos de la situación anterior (i.e. a unos 20 km de distancia), en las primeras estribaciones del pedemonte oriental del sistema de Comechingones, con sedimentos loésicos de similares características (Tabla 5.12). Más allá de los elevados valores medidos para el contenido de materia orgánica en los tres tipos de ambiente relevados, que responden al bajo grado de alteración de los sitios y a la presencia de buena parte de la vegetación natural de tipo monte, se observaron importantes diferencias entre las zonas de 'desprendimiento' y aquellas de 'acumulación'. Estas diferencias se condicen con un mayor desarrollo en profundidad del perfil y del epipedón, y con la abundancia de materiales más finos en las zonas cumúlicas.

---

<sup>8</sup> Procesos erosivos acelerados por influencia del uso y manejo de las tierras pueden haber contribuido a profundizar las diferencias originales

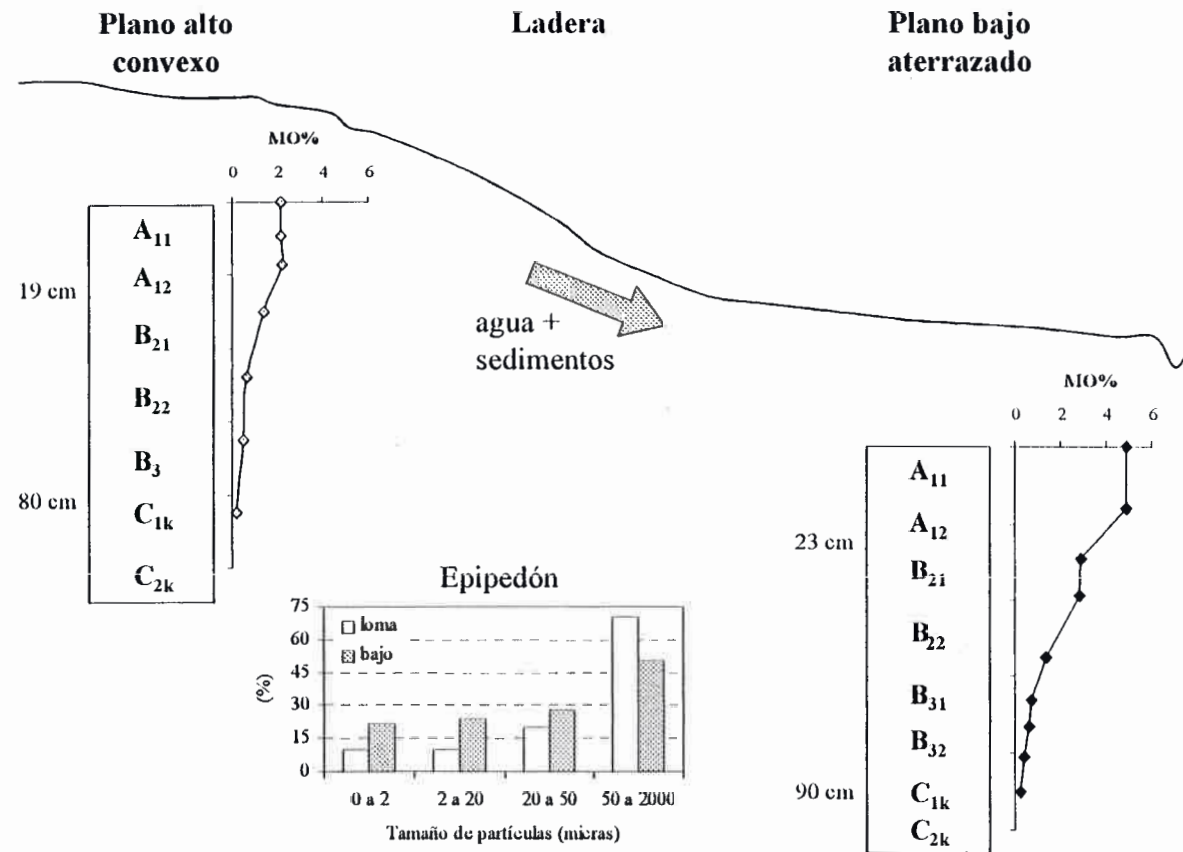
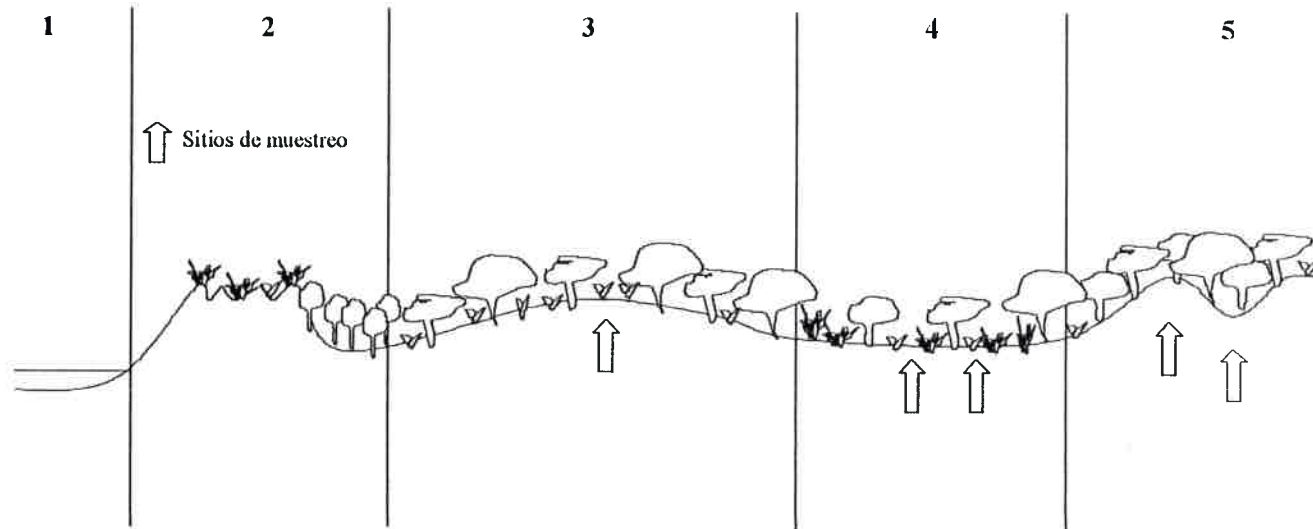


Figura 5.17: Efecto de la redistribución de sedimentos en paisajes fuertemente ondulados sobre el contenido de materia orgánica de los suelos. Los datos corresponden a relevamientos realizados por Bricchi *et al.* (2004) en la localidad de La Aguada, sobre situaciones de baja alteración antrópica. Las columnas representan el sécum de cada perfil de suelo, indicando la profundidad del epipedón y del sólum (cm). Las curvas indican la evolución del contenido de materia orgánica (MO%) medido en profundidad. Los histogramas indican la distribución del tamaño de partículas en el epipedón del suelo de loma (blanco) y del bajo (gris).

Ambiente código



Ambiente descripción

1	2	3	4	5
Lagunas asociadas a médanos	Médanos poco estabilizados, pastizales sammófilos e isletas de Chañar	Lomas convexas, médanos antiguos, caldenal con pastizal (C3), frecuentemente zona de desmonte para pasturas y verdesos	Planicies intermedanasas, caldenal abierto, alternando en parches 'monte-pastizal'	Medanos estabilizados, áreas de 'bordes y bajos', caldenal semicerrado con pastos C3

Pendiente

(variable)	1 al 2%	0.5 al 1%	2 a 3%
------------	---------	-----------	--------

Prof. 'epipedón'

< 5 cm	10 - 15 cm	15 - 20 cm	< 10 cm
--------	------------	------------	---------

Arcilla + Limo

<< 10%	15 a 20%	h/ 20%	8 a 10%
--------	----------	--------	---------

Materia Orgánica

0,5%	2,5 a 3,5%	1 a 1,5%	2,5 a 3,5%
------	------------	----------	------------

Figura 5.18: Perfil topográfico modal correspondiente al sitio Las Taguas, Provincia de San Luí, sub-región llanuras medanosas. Las flechas indican genéricamente los puntos de observación. El esquema representa la distribución y cobertura del monte de caldén (*Prosopis caldenia*) originario, y la coexistencia de estepas gramíneas en las 'abras' del monte (de acuerdo con Bogino, S., comunicación personal). Los rangos de valores para el contenido de materia orgánica corresponden a condiciones de muy baja alteración. Ver desarrollo del perfil de suelo en Apéndice VII – Tabla A.



Tabla 5.12: Variación en la profundidad del suelo, el contenido de arcilla+limo y de materia orgánica en tres ambientes dispuestos a lo largo de una transecta de estudio (toposecuencia) en el sector pedemontano oriental

Descripción	Ambiente		
	Alto	Ladera	Bajo
Descripción	Lomadas convexas afloramientos rocosos, ambientes úmbricos bajo monte de coco ( <i>Fagara coco</i> ) y parches de gramíneas altas	Pendientes pronunciadas (6% a +) con monte abierto y pastizal con gramíneas C3; signos de pastoreo moderado	Pie de loma con parches o isletas de monte en zonas de acumulación, y pastizal dominado por <i>Stipa</i> sp; leves signos de pastoreo
Profundidad sólum	65 cm	25 cm	152 cm
Profundidad epipedón	22 cm	18 cm	28 cm
Arcilla + limo	39,7%	28,2%	52,3%
Materia Orgánica	3,35%	3,51%	7,76%

#### *La influencia de la vegetación y del uso de la tierra en el Caldenal*

El uso extensivo de las tierras para producción ganadera hacia el sudoeste de la sub-región llanuras medanosas (Caldenal) se caracteriza por una escasa fragmentación espacial, donde grandes lotes o potreros son utilizados para el pastoreo con ganado vacuno. Ciertos lotes han sido desmontados y en ellos suelen implantarse pasturas permanentes y, en ciertos casos, verdes anuales (Capítulo 3). Tales unidades productivas normalmente comprenden más de un ambiente (unidad paisaje-suelo), aunque son manejadas en forma homogénea (Figura 5.18). El contenido de materia orgánica medido en los suelos de los diferentes ambientes relevados presentó importantes variaciones, a pesar de la homogeneidad en la clase textural de los suelos, como se ilustra en Apéndice VII, Tabla A, mediante un estudio de caso. La presencia o ausencia de un estrato arbóreo, su grado de cobertura y su tamaño en términos de biomasa condicionan a la cantidad  $[X]$  de residuos aportados y a su calidad, lo que redundan en diferentes tasas de humificación  $[h]$ ; mientras que la modificación del microambiente por sombreo afecta a las tasas de descomposición  $[k]$  de las diferentes fracciones orgánicas.

En los ambientes de tipo 3, 4 y 5 (Figura 5.18), bajo condición natural, las adiciones tienden ser mayores que las pérdidas  $[hX > kY]$ , mientras que en ambientes tipo 2, de escasa cobertura y elevada porosidad textural, tiende a ocurrir lo contrario  $[hX < kY]$ . Bajo vegetación arbórea (lotes 1 y 2 en Apéndice VII) los aportes de materia orgánica  $[X]$  y su transformación  $[hX]$  tienen lugar principalmente en la superficie, con lo que la cantidad de materia orgánica  $[Y]$  disminuye notablemente con la profundidad. Cuando el estrato arbóreo es removido y la vegetación herbácea (espontánea o implantada) es consumida por el ganado,  $X$  es mucho menor,  $k$  es mucho más rápida e  $Y$  disminuye abruptamente (lotes 11 y 14 en Apéndice VII). Aún cuando el estrato arbóreo es mantenido, aunque con

una menor cobertura (lote 6-monte en Apéndice VII), la compactación provocada por una alta carga animal sumada a la remoción del estrato herbáceo, afectan tanto a los aportes  $[X]$ , el crecimiento del estrato arbóreo puede ser también indirectamente afectado] y a su calidad  $[h]$ , como al microambiente donde tienen lugar las transformaciones  $[h$  y  $k]$ , redundando en bajos valores para  $Y$   $[hX < kY]$ .

#### 5.4 Observaciones finales

La variabilidad regional en el contenido de materia orgánica pudo ser analizada con cierto grado de certeza al considerar en forma aislada a los factores zonales bióticos y abióticos que controlan su formación y transformación (Sección 5.1). Sin embargo, buena parte de esta variabilidad respondió a sus interacciones, y a variaciones en estos factores a escala de paisaje, lo que implicó considerar análisis específicos a un mayor nivel de detalle (Secciones 5.2 y 5.3). El modelo CENTURY (Parton, *et al.* 1987), cuya sensibilidad regional y posibles aplicaciones serán analizadas en Capítulo 7, fue originalmente diseñado para el estudio de los factores que controlan los niveles de carbono a escala de regiones agroecológicas (i.e. factores zonales). Modificaciones posteriores han permitido incluir el efecto de factores que operan a escala de predio, considerando aspectos más detallados (uso de insumos, degradación) que derivan de las prácticas de manejo del agroecosistema (e.g. Gijsman *et al.*, 2002). No obstante, la elección de la escala de trabajo (i.e. factores zonales vs. relación paisaje-suelo) dependerá de los objetivos del estudio para el cual se aplica el modelo.

Las sub-regiones consideradas en este estudio han mostrado diferencias notables para los diversos factores zonales de control sobre la fracción orgánica al estado natural. La discriminación de 'sectores' dentro de cada una de ellas parece justificarse sólo en los casos en que existen fuertes gradientes sub-regionales para alguno de ellos (e.g. la textura dentro de las llanuras bien drenadas); esta discriminación tenderá a adquirir mayor importancia al considerar el efecto y las particularidades del uso y manejo de las tierras, lo que no fue abordado aquí con profundidad. Sin embargo, ciertos gradientes en los factores de control, especialmente los de origen climático, resultaron de la inclusión en el análisis a la sub-región sierras y pedemonte (Sección 5.1.2). Los gradientes térmicos y pluviométricos para las sub-regiones de tipo llanura han resultado muy estrechos, y su efecto sobre los niveles de materia orgánica ha sido 'oscurecido' por el efecto de la textura y de la vegetación, por la variabilidad a escala de unidad de paisaje simple, y aún por el inevitable efecto del patrón de uso de las tierras (actual e histórico). Factores tales como el tipo de vegetación tendieron a mostrar un efecto similar en todas las sub-regiones, aunque su magnitud fue diferente en cada caso. Nuevamente, la interacción entre todos estos factores, que es la que eventualmente define el contenido de materia orgánica del suelo en un estado estacionario teórico, dificultó aún más la visualización del efecto de los gradientes de cada factor en particular.

A pesar de ello, Los sitios seleccionados para este estudio dentro de cada sub-región permitieron en cierto grado contrastar los efectos de un factor manteniendo relativamente invariable a otro/s. De todas formas, fue necesario asumir ciertos supuestos a la hora de

agrupar a las observaciones. Por ejemplo, el contenido de arcilla + limo fue preferido por sobre el contenido de arcilla en la mayoría de los casos (e.g. Figuras 5.1, 5.2, 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10), debido a las importantes diferencias observadas en la fracción 2 a 50 $\mu$ m (Apéndice V), y a pesar de que mucha de la variación en la fracción orgánica fue satisfactoriamente explicada sólo por el contenido de arcilla. Además, la fracción arcilla+limo cumple diversas funciones en la protección del C en el suelo, que serán referidas posteriormente. Por otra parte, el empleo de los términos 'monte' y 'pastizal' para caracterizar a los tipos de vegetación tal vez no fue lo más adecuado técnicamente, aunque ellos se asemejan las definiciones empleadas en CENTURY (Capítulo 2, Submodelos bosque, pastizal y sabana). En muchos casos la vegetación de monte se asemeja fisonómicamente a la de una sabana con diferentes grados de cobertura, lo que afecta a la interpretación de los resultados – como será discutido más adelante (Capítulo 8) – y a su comparación con los obtenidos mediante el modelo (Capítulo 7). En consecuencia, muchos de los sitios incluidos en este estudio estuvieron asociados a fuentes de variabilidad importantes, fundamentalmente de origen antrópico, que en parte explican los bajos (aunque significativos) niveles de asociación entre variables explicativas y de respuesta observados hasta aquí.

## 6. La fracción orgánica, su composición y su relación con propiedades que definen calidad y salud de los suelos de la región

El monitoreo de la dinámica de la fracción orgánica del suelo, como herramienta para la evaluación de la sustentabilidad de un sistema productivo a través de su componente edáfica, tiene sentido en tanto representa una variable integradora de las propiedades que hacen a su calidad y salud. El contenido y la composición de la materia orgánica de los suelos influyen sobre sus propiedades químicas y físicas, que a su vez condicionan su funcionalidad y las condiciones para la vida dentro de ellos. En éste capítulo se analizan tales influencias sobre las propiedades físicas y químicas del horizonte superficial sobre la base de un gran número de observaciones realizadas por diversos autores y propias en la región. Las mismas son trabajadas estadísticamente a fin de establecer rangos de referencia – o bien modelos empíricos que permitan estimarlos – que sirvan como complemento al uso de modelos de simulación de la dinámica orgánica como herramientas de monitoreo. Estos rangos de referencia son útiles tanto a la hora de *parametrizar* los modelos, como al momento de ampliar la base de sus resultados, incluyendo en el análisis no sólo el impacto sobre el contenido de materia orgánica sino sobre las funciones del suelo. Finalmente se ilustran los rangos de variación de algunos aspectos cualitativos de la fracción orgánica edáfica, basados en recopilación y análisis de experiencias regionales.

### 6.1 Materia orgánica y propiedades relacionadas

Las propiedades relacionadas con el contenido de materia orgánica, y que hacen a la calidad y salud del suelo, que serán tratadas aquí son: la capacidad de intercambio catiónico, la capacidad para la retención hídrica y la relación sólido-vacíos a través de la densidad aparente y la porosidad. Las mismas resultan indicadores integrales de diferentes procesos que tienen lugar en la expresión de las distintas funciones del suelo.

#### 6.1.1 Capacidad de intercambio catiónico

Una parte importante de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los horizontes superficiales del suelo es aportada por las cargas negativas inherentes a la fracción orgánica, en especial en suelos de texturas gruesas o con una elevada proporción de arcillas de tipo 1:1. Es por ello que interesa conocer que magnitud de la capacidad de intercambio total es aportada por la materia orgánica ( $CIC_{MO}$ ) en los suelos de la región, a fin de poder ponderar el impacto que provocan las variaciones en su contenido sobre esta variable de fertilidad edáfica, para diferentes agrosistemas y frente a diversos escenarios de sustentabilidad que pueden ser evaluados mediante modelización (Capítulo 7). La



relación entre el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial de los suelos de la región y su correspondiente CIC presentó la distribución que se observa en Figura 6.1 A, donde se evidencia una relación lineal claramente positiva ( $r^2 = 0,65$ ). Cabe destacar que los valores de CIC con que se contó para éste análisis provienen de determinaciones realizadas por diversos autores en la región, por lo que parte de la variabilidad que se intenta explicar proviene de fuentes no edáficas (i.e. errores de medición variables). Del mismo modo, la relación entre el porcentaje de arcilla en el epipedón y la CIC fue positiva y algo más ajustada ( $r^2 = 0,7$ ), aunque la dispersión tendió a aumentar hacia el rango de texturas finas (Fig. 6.1 B).

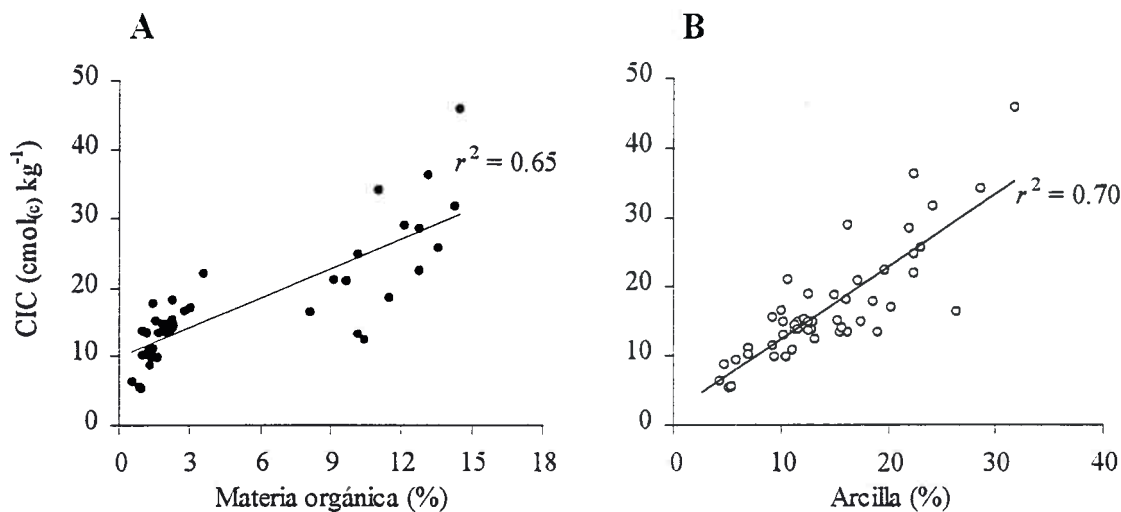


Figura 6.1: Relación entre el contenido de materia orgánica [A] y la proporción de arcilla [B] en el horizonte superficial de los suelos de la región y su capacidad de intercambio catiónico (CIC).

La distribución de las observaciones en Fig. 6.1 A muestra una clara diferenciación de dos sub-conjuntos de puntos, por encima y por debajo de ca. 8% de materia orgánica. Esta diferenciación corresponde a los grupos de muestras provenientes de los suelos de las llanuras y de las sierras, respectivamente, que por diversas razones ecológicas presentan importantes diferencias en sus niveles de materia orgánica de equilibrio (Capítulo 5). Evidentemente, cada sub-conjunto parece mostrar su propio modelo de ajuste para la relación CIC vs. materia orgánica, tal como lo confirman las Figuras 6.2 A y B, donde se han analizado estas relaciones por separado. Para el caso de las llanuras esta relación fue más ajustada, su pendiente algo mayor, y la ordenada al origen resultó positiva (nótese las diferencias en la escala de los ejes de ambos gráficos), indicando que teóricamente en suelos con 0% de MO la CIC se mantendría por encima de 5  $\text{cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$ . El modelo lineal que explicó el 50% de la variabilidad de la CIC para las sierras estaría indicando que ésta se hace cero cuando el valor de MO disminuye por debajo de 3,9%. Más allá de lo anecdótico de estos coeficientes, y aunque existen diferencias para el tipo de arcillas dominantes en los suelos de las sierras, el análisis deja ver con claridad que la materia

orgánica adquiere mucho mayor importancia en la determinación de la CIC de estos últimos.

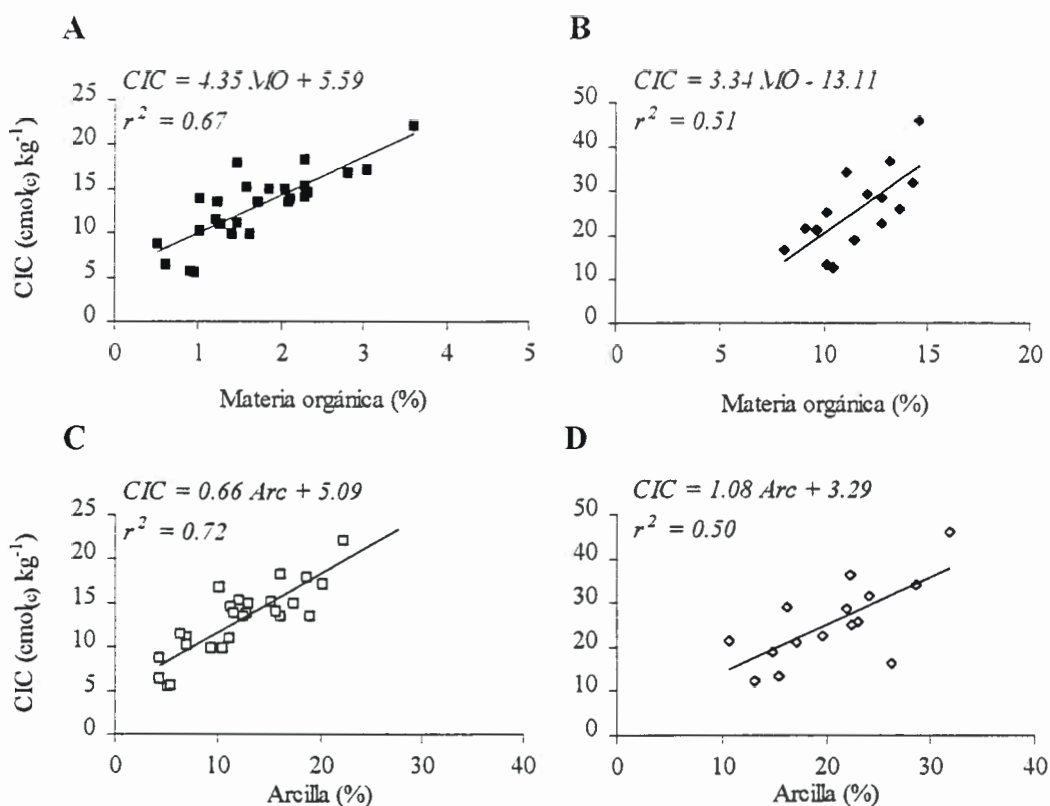


Figura 6.2: Relación entre el contenido de materia orgánica [A-B] y la proporción de arcilla [C-D] y sus correspondientes CIC en el horizonte superficial de los suelos de las sub-regiones de llanura [A-C] y de las sierras [B-D]. Nótese las diferencias en las escalas de los ejes x e y.

La afirmación anterior fue respaldada por el análisis de la relación entre la CIC y el contenido de arcilla del horizonte superficial, que resultó mucho más dispersa para los suelos de las sierras (Fig. 6.2 C y D). La ordenada al origen para los suelos de llanura indicaría que 5 cmol<sub>(c)</sub> kg<sup>-1</sup> de CIC pueden ser explicados por cargas no provenientes de la arcilla, aunque es poco probable que el valor de CIC disminuya aún linealmente en ese rango, para valores del % de arcilla tan cercanos a cero. A fin de conocer cuánto de la CIC es explicado por cada tipo de coloide, Benema (1966) desarrolló un método gráfico partiendo de un modelo de regresión múltiple de aplicación generalizada (Capítulo 4). La resolución gráfica de dicho método se presenta en Figura 6.3, donde se muestra la variación relativa de la CIC respecto de la materia orgánica en función de la variación relativa del porcentaje de arcilla respecto también del contenido de materia orgánica, todo llevado a términos porcentuales. De acuerdo al método, el gradiente de la recta representa la CIC aportada por la arcilla [CIC<sub>arcilla</sub>], mientras que la ordenada al origen representa 100 veces el valor de la CIC aportada por la materia orgánica [CIC<sub>MO</sub>]. Así, los resultados arrojaron valores de: CIC<sub>arcilla</sub> = 0,93 cmol<sub>(c)</sub> kg<sup>-1</sup> por cada punto porcentual de incremento en la fracción arcilla, y de CIC<sub>MO</sub> = 1,005 cmol<sub>(c)</sub> kg<sup>-1</sup> por cada punto porcentual de aumento en el contenido de materia orgánica ( $r^2 = 0,86$ ).

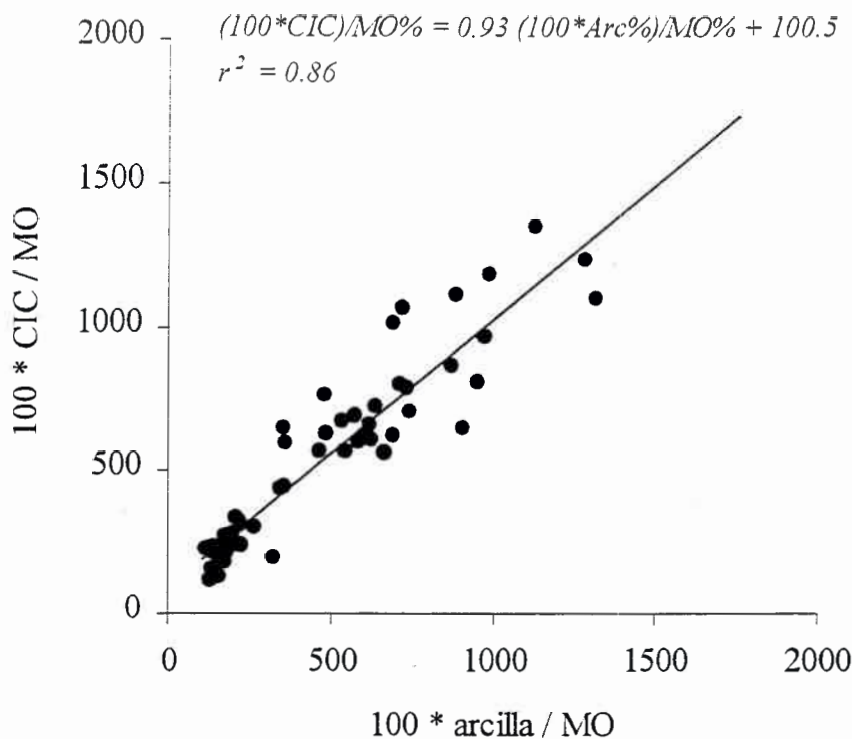


Figura 6.3: Resolución gráfica del método de Benema (1966) para la determinación de la CIC explicada por la materia orgánica, para los suelos de la región.

Conociendo estos coeficientes, es posible estimar el valor de la CIC para los suelos de la región a partir de sus porcentajes para las fracciones arcilla y materia orgánica. Con el fin de validar este modelo contra observaciones regionales se utilizaron datos independientes provenientes de las fuentes listadas en Apéndice VI, Tabla A. La relación entre el contenido de materia orgánica y la CIC, proveniente de mediciones independientes (INTA), y para la CIC estimada mediante los coeficientes del modelo de Benema es presentada en Figura 6.4 A. Una distribución similar, pero utilizando al porcentaje de arcilla como variable ordinal es presentada en Fig. 6.4 B. Para los valores medidos se observó un incremento de 3,9 y de 0,65  $\text{cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$  por cada punto porcentual de aumento en los valores de materia orgánica y de arcilla ( $r^2 = 0,70$  y  $0,81$ ), respectivamente, valores éstos que aparecen similares a los observados para los suelos de las llanuras anteriormente (4,35 y 0,66, respectivamente, cf. Fig. 6.2 A y C). Del mismo modo, los valores para la ordenada al origen resultaron en los mismos rangos hallados anteriormente (4,4 y 4,9, respectivamente). Si bien el grado de ajuste entre los valores estimados y los observados fue elevado (Fig. 6.4 C), se observó una leve tendencia del modelo a subestimar las mediciones por debajo de ca. 2% de materia orgánica (aproximadamente 12% de arcilla) y a sobreestimarlas por encima de éste (Fig. 6.4 A y B).

Estos resultados parecen indicar la utilidad de este enfoque metodológico para la estimación de la capacidad de intercambio catiónico en los suelos de la región. Sin embargo, existen ciertas restricciones y objeciones a la metodología que deben ser tenidas en cuenta, y que son discutidas más adelante (Capítulo 8). Las estimaciones mediante

modelos empíricos no son capaces de reemplazar a las determinaciones analíticas de la CIC, aunque entregan valores de referencia para contrastar los resultados de éstas últimas en el monitoreo del estado de salud del suelo.

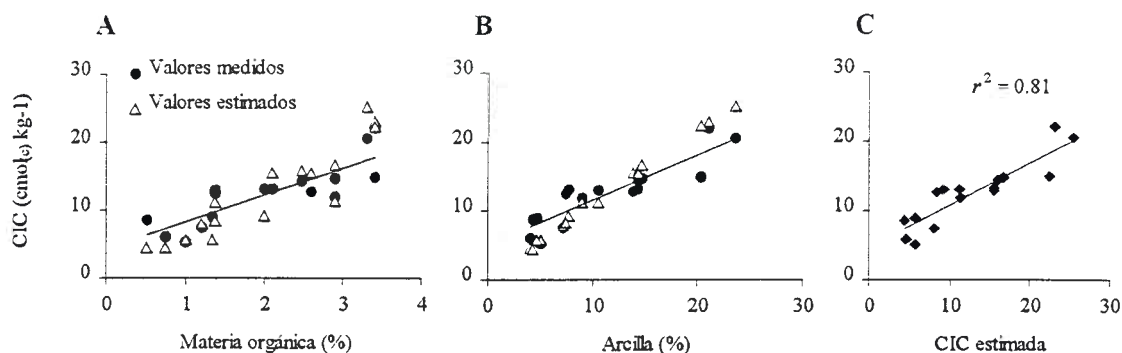


Figura 6.4: Estimación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método de Benema (1966) para el horizonte superficial de suelos de la región descriptos en la Carta de Suelos de la República Argentina (INTA); valores agrupados de acuerdo a su contenido de materia orgánica [A] y de arcilla [B]. Grado de ajuste entre las estimaciones y las mediciones publicadas [C].

### 6.1.2 Retención hídrica

El contenido de materia orgánica en el horizonte superficial del suelo es un determinante clave de su estructuración, su porosidad y, consecuentemente, de la estática y dinámica de los fluidos dentro de él. Mayores contenidos de materia orgánica se asocian a mayores volúmenes de agua infiltrada y retenida en el suelo, y a una más fácil liberación de ésta hacia las plantas y microorganismos. Es por ello que interesa conocer la relación existente entre estas variables para los suelos de la región, a fin de poder (i) estimar o predecir la capacidad de retención hídrica a partir de datos disponibles o fácilmente mensurables y (ii) evaluar el estado de salud del suelo respecto de sus relaciones hídricas, que eventualmente afectan al crecimiento vegetal. La relación entre el porcentaje de humedad volumétrica, tanto a capacidad de campo (CC, 0,3 bar) como a la marchitez permanente (CMP, 15 bar), y el contenido de materia orgánica (MO%) del horizonte superficial de los suelos de la región describe la tendencia ilustrada en Figura 6.5 A, donde además pueden advertirse en algunos casos los pares de puntos alineados (CC y CMP) correspondientes a un mismo suelo (i.e. igual MO%). A modo ilustrativo, se han graficado las líneas de tendencia correspondientes a cada distribución. Si bien, ellas muestran una mayor separación hacia valores elevados de materia orgánica, el incremento en el porcentaje de agua disponible no es tan amplio como lo que sugiere el aumento del valor de CC al aumentar MO%, debido al aumento simultáneo de CMP.

El conjunto de valores utilizados en éste análisis incluye mediciones de las constantes hídricas realizadas en suelos de la región por diferentes autores, y para situaciones bajo condiciones de uso y manejo variables (Capítulo 4). Estas fuentes de variación se manifiestan en la importante dispersión vertical de los valores de CC y CMP en el rango



de contenidos de materia orgánica menores al 5% - que corresponden también a los suelos más estudiados en la región, los de mayor importancia productiva. Al utilizar una variable explicativa de menor variabilidad a través del rango de situaciones de uso y manejo incluidas, como lo es la suma de las fracciones arcilla y limo, se obtiene una tendencia aún más clara, como la ilustrada en Figura 6.5 B. La relación entre la textura y el contenido de materia orgánica ha sido ampliamente analizada en el capítulo anterior; en condiciones naturales o de escasa alteración antrópica, y bajo condiciones ecológicas comparables, la misma es claramente positiva (Sección 5.1). Esto permite pensar que, en condiciones naturales, la relación entre el contenido de materia orgánica y las constantes hídricas debería mostrar una distribución gráficamente más parecida a la de la Fig. 6.5 B.

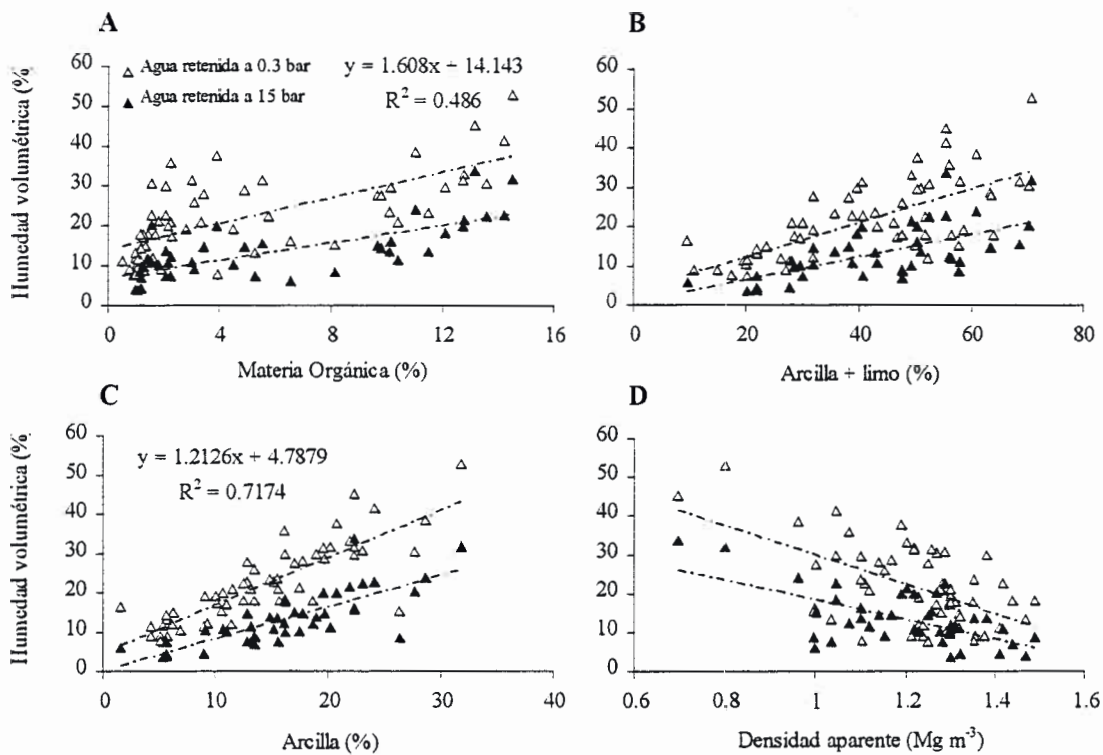


Figura 6.5: Relaciones entre las constantes hídricas (humedad volumétrica a capacidad de campo y a capacidad a la marchitez permanente) y el contenido de materia orgánica [A], de la fracción arcilla+limo [B], arcilla [C] y la densidad aparente [D] del horizonte superficial de los suelos de la región.

La mayor parte de los suelos de la región presentan contenidos de arcilla en el horizonte superficial menores al 20%; la relación entre éstos y los valores de CC y CMP fue estrechamente lineal y positiva (Figura 6.5 C), con valores de  $r^2$  mayores a 0.7. Estas relaciones fueron mejoradas al ser ajustadas mediante polinomios de segundo orden, aunque sólo levemente- (datos no mostrados). Sin embargo, el principal efecto del contenido tanto de materia orgánica como de arcilla sobre la capacidad de retención hídrica es indirecto, ya que éstas afectan inicialmente a la agregación y estructuración de la fase sólida del suelo. No se contó con mediciones de porosidad ni de estabilidad de agregados en número suficiente que pudieran ser relacionadas con las variables bajo estudio. La densidad aparente, que fue medida en todos estos suelos y que resulta una

variable integradora de sus condiciones físicas, mostró una relación negativa con ambas constantes hídricas (Figura 6.5 D), aunque con una importante dispersión en el rango de densidades entre 1.2 – 1,3 kg dm<sup>-3</sup>. Por último, se intentó establecer un intervalo de confianza al 5% para el porcentaje de agua útil (CC – CMP) en el horizonte superficial de estos suelos en función de su contenido de arcilla (Figura 6.6). Sin embargo, y debido a la dispersión original de los datos, el contenido de arcilla sólo explicó el 40% ( $P < 0,05$ ) de la variabilidad en el rango de agua útil, y de allí que gran parte de las observaciones cayera por fuera del intervalo establecido estadísticamente.

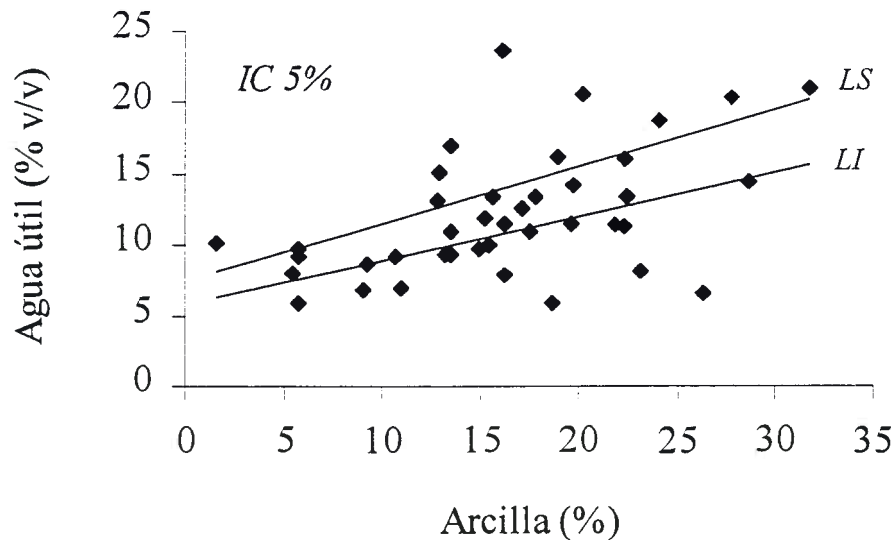


Figura 6.6: Intervalo de confianza al 5% para el contenido de agua útil de los suelos de la región en función de su proporción de arcilla en el horizonte superficial.

#### *Modelos empíricos*

Una capacidad de predicción algo mayor para las constantes hídricas se obtuvo al utilizar técnicas de regresión múltiple para desarrollar modelos que incluyan a las variables involucradas en forma combinada (Tabla 6.1). La textura explicó con mayor precisión la variación en los valores de ambas constantes, e.g. un modelo que consideró sólo arcilla y limo como variables independientes explicó el 71% de la variación en CC (no mostrado). A pesar de la importante dispersión en las observaciones (Fig. 6.5), en especial para el contenido de C orgánico (utilizado aquí en lugar de la materia orgánica en función de los dígitos involucrados), y de la correlación entre las variables utilizadas (e.g. la arcilla presentó un coeficiente de correlación de 0,32 con el C y de 0,56 con la densidad aparente), se logró explicar más del 70% de la variabilidad en los valores de CC y CMP mediante regresión múltiple. La variabilidad en el valor de CMP fue algo mejor explicada por las variables disponibles, en comparación con CC. Esto se condice con el hecho de que, a altos valores de succión matricial, la forma de la curva característica de humedad de un suelo y el valor de CMP dependen principalmente de su granulometría; a bajos valores, en cambio, la estructura manifiesta un mayor efecto, afectando al valor de CC (Hillel, 1998). Un procedimiento similar se llevó a cabo para lograr estimar el porcentaje de agua útil en el horizonte superficial, aunque los resultados fueron menos alentadores; el mejor

modelo  $[0.18*(arcilla+limo) - 0,05*C \text{ orgánico} - 5,95*densidad \text{ aparente} + 13,75]$  explicó sólo el 35% de la variabilidad en la diferencia CC - CMP ( $P < 0,001$ ).

Tabla 6.1: Modelos de regresión múltiple para explicar la variabilidad en el valor de las constantes hídricas para el horizonte superficial de los suelos de la región. Todos los modelos fueron altamente significativos ( $P < 0,001$ ).

Variable de respuesta	Modelo	$r^2$
CC	$1.09*Arcilla + 0.09*C \text{ orgánico} + 4.44$	0,74
	$1.15*Arcilla - 14.88*DAP + 24.26$	0,75
	$1.07*Arcilla + 0.05*C \text{ orgánico} - 10.63*DAP + 18.68$	0,75
CMP	$0.57*Arcilla + 0.11*C \text{ orgánico} + 0.03$	0,76
	$0.65*Arcilla - 14.89*DAP + 20.63$	0,71
	$0.55*Arcilla + 0.09*C \text{ orgánico} - 6.84*DAP + 9.44$	0,78

CC: humedad volumétrica a capacidad de campo (%); CMP: humedad volumétrica a capacidad a la marchitez permanente (%); DAP: densidad aparente ( $Mg \text{ m}^{-3}$ ); Arcilla en % y C orgánico en  $g \text{ kg}^{-1}$  de suelo.

Los modelos empíricos desarrollados por Boekel (1986) para estimar los valores de las constantes hídricas a partir del contenido de materia orgánica y de la densidad aparente (DAP, en  $kg \text{ dm}^{-3}$ ) han sido ampliamente utilizados para generar valores por defecto en diferentes modelos de simulación (de la dinámica orgánica, del crecimiento vegetal, etc.). Aplicando el modelo de Boekel correspondiente al rango de texturas de los suelos de la región para la estimación de CC [ $CC = 2,45*MO (g \text{ kg}^{-1}) / (1000/DAP) + 0,05$ ], se obtuvo una distribución de valores respecto del contenido de arcilla del horizonte superficial como la ilustrada en Figura 6.7 A. El contenido de arcilla fue utilizado sólo como variable ordinal, y se introdujo para mejor referencia la recta de regresión lineal entre éste y el valor de CC ( $r^2 = 0,71$ ). La dispersión de las estimaciones respecto de las observaciones fue realmente notable, y obviamente mucho más amplia que la correspondiente a las estimaciones producidas con los modelos empíricos de Tabla 6.1, que fueron derivados a partir de ellas (Figura 6.7 B). Siguiendo la línea metodológica de Boekel, se utilizaron diversas técnicas de regresión - lineal y no lineal - para caracterizar la relación entre el cociente MO / DAP (contenido de materia orgánica y densidad aparente) y el contenido volumétrico de agua a 0,3 bar (CC%), partiendo a la distribución en valores cercanos a 2 para el cociente MO / DAP (Figura 6.8 A).

Tabla 6.2: Modelos de regresión no lineal para explicar la variabilidad en el valor de la humedad volumétrica a capacidad de campo para el horizonte superficial de los suelos de la región. Todos los modelos fueron altamente significativos ( $P < 0,001$ ).

Tipo de modelo	Modelo (generalizado)	$r^2$
Linear - linear	$CC\% = A + B / [1 + D * (MO/DAP)]$	0,52
Exponencial - linear	$CC\% = A + B * R^{(MO/DAP)} + C * (MO/DAP)$	0,56
Cuadrático - linear	$CC\% = A + B / [1 + D * (MO/DAP)] + C * (MO/DAP)$	0,55

CC: humedad volumétrica a capacidad de campo (%); MO: contenido de materia orgánica (%); DAP: densidad aparente ( $Mg \text{ m}^{-3}$ ).

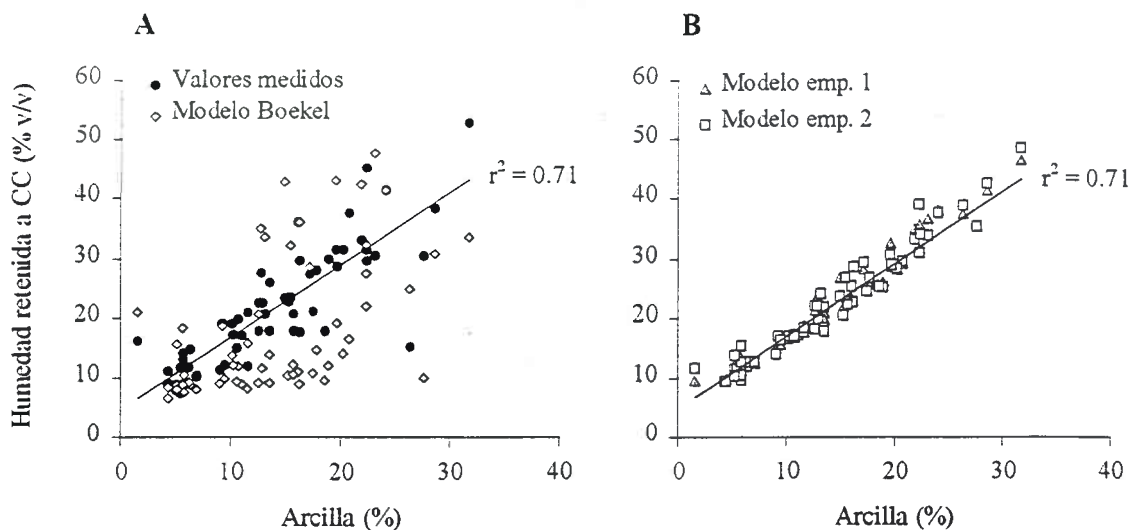


Figura 6.7: Relación entre el contenido de arcilla y los valores medidos y estimados para la capacidad de campo de los suelos de la región. Estimaciones realizadas mediante el modelo de Boekel [A] y utilizando los modelos empíricos desarrollados con datos regionales [B].



Figura 6.8: [A] Relación entre el cociente MO / DAP (contenido de materia orgánica y densidad aparente) y el contenido volumétrico de agua a 0,3 bar (CC%). [B] Relación entre el contenido de arcilla en el horizonte superficial y los valores medidos y estimados para CC. Estimaciones mediante modelos empíricos derivados de los datos regionales.

Ninguno de los modelos fue capaz de explicar más del 50-60% de la variabilidad en la CC (Tabla 6.2); de esta forma, el valor de los coeficientes de regresión resultó anecdótico y no fue explícito en Tabla 6.2, aunque puede ser consultado en Apéndice VI, junto con los respectivos ANOVAs. Resulta evidente en Fig. 6.8 A que la fase lineal del modelo de regresión expo-linear presentó el mayor grado de ajuste, correspondiendo a los mayores valores de materia orgánica en el horizonte superficial. Lo mismo ocurrió con el modelo cuadrático lineal, aunque éste no fue representado gráficamente para evitar superposición con el anterior. Utilizando nuevamente al porcentaje de arcilla como variable ordinal (Fig. 6.8 B), fue posible contrastar la mayor dispersión de las estimaciones logradas con el



modelo expo-linear con respecto a las observaciones y a las estimaciones del modelo empírico que incluyó a las variables explicativas arcilla (%) y C orgánico ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (cf. Tabla 6.1, modelo empírico 1 en Fig. 6.7 B). Este último modelo, que incluye dos variables fácilmente disponibles para los suelos de la región, y que explicó el 75% de la variabilidad en el valor de CC, ha sido validado con mediciones regionales independientes, como se describe a continuación.

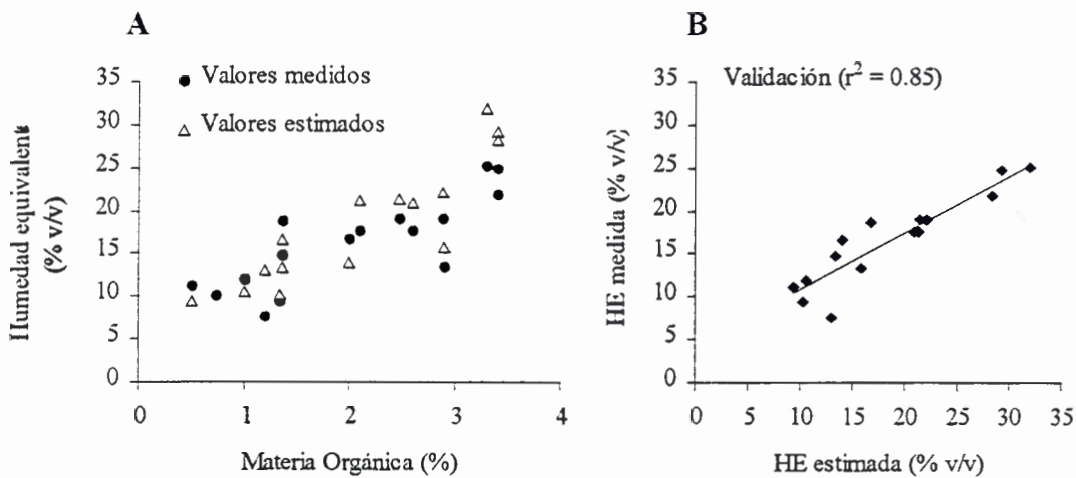


Figura 6.9: Estimación de la humedad equivalente en suelos de la región descriptos en la Carta de Suelos de la República Argentina (INTA); valores medidos (publicados) y estimados en función del contenido de materia orgánica [A]. Relación entre las estimaciones y las mediciones de la humedad equivalente [B].

Para la validación de éste modelo empírico se utilizaron los datos provenientes de los casos listados en Apéndice VI, Tabla A. Para estos perfiles, descriptos en su mayor parte en las diferentes Hojas regionales de la Carta de Suelos (INTA), no se cuenta exactamente con el dato de humedad volumétrica a una succión de 0,3 bar, sino con la humedad equivalente (HE). Las estimaciones de CC en Figura 6.9 A fueron realizadas asignando al modelo de regresión lineal los valores-dato de arcilla y C orgánico publicados en las fuentes. El grado de ajuste entre las observaciones independientes y las estimaciones fue elevado (Fig. 6.9 B), y se observó una tendencia del modelo a subestimar el valor de CC por debajo de ca. 2% de MO y a sobrestimarlo por encima de este valor. Nuevamente, es evidente que estas relaciones varían de acuerdo al nivel de materia orgánica considerado. Para el rango de texturas de los suelos considerados aquí, la diferencia entre los valores de CC y de HE (i.e. agua fácilmente utilizable) pueden ser importantes en términos relativos, aunque algo menos relevantes en términos absolutos (i.e., en mm de agua retenida). A niveles altos de materia orgánica en el suelo, éstas relaciones parecen ser más estables, como se postula a continuación.

#### *Relaciones hídricas en suelos con elevados contenidos de materia orgánica*

Los suelos de los sectores serranos y pedemontanos presentaron valores elevados de materia orgánica (Capítulo 5), los cuales podrían suponerse cercanos a los niveles de saturación de C para los suelos de la región (Capítulo 8). Bajo tales condiciones, los

valores promedio para las constantes hídricas resultaron entre un 60 y un 70% mayores que los correspondientes a los suelos de las llanuras, los que a su vez presentaron un contenido de materia orgánica menor a la mitad del correspondiente a las sierras, para las muestras consideradas en éste análisis (Tabla 6.3). Sin embargo, el contenido de agua útil (CC - CMP) no aumentó en igual proporción que las constantes hídricas, y presentó valores similares en ambos casos. La densidad aparente ponderada para el horizonte superficial presentó iguales valores promedio, aunque una mayor dispersión en el caso de los suelos de llanura.

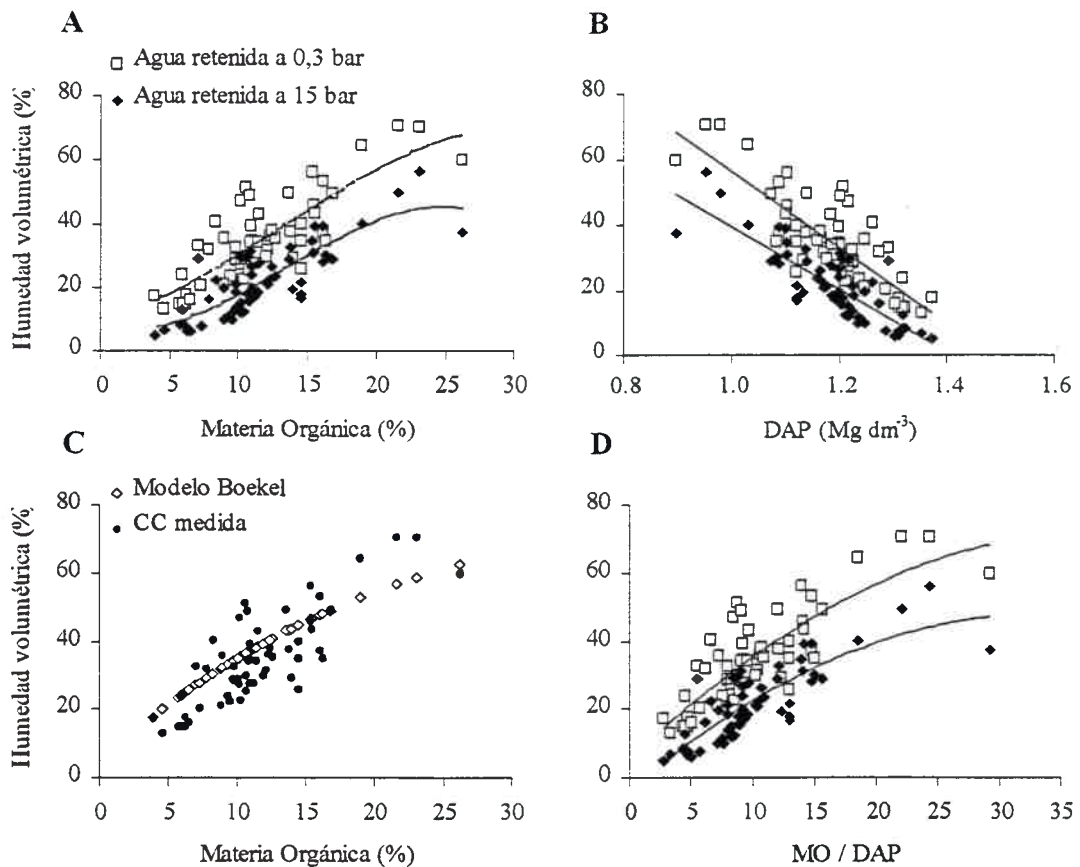


Figura 6.10: Relaciones entre el contenido de materia orgánica [A] y la densidad aparente [B] y la humedad volumétrica a 0,3 y 15 bar en el horizonte superficial de los suelos de los sectores serranos; estimación de la retención a 0,3 bar mediante el modelo de Boekel [C] y relación entre el cociente MO/DAP (contenido de materia orgánica y densidad aparente) y los contenidos volumétricos a 0,3 y 15 bar.

Tabla 6.3: Valores promedio para diferentes variables a partir de las muestras correspondientes a las llanuras (bien y mal drenadas, medianosas) y a los sectores serranos

Sub-regiones	n	Materia Orgánica (%)	Densidad aparente (Mg m <sup>-3</sup> )	Humedad volumétrica a 0,3 bar (%)	Humedad volumétrica a 15 bar (%)	Agua útil (%)
Llanuras	40	4,5 +/-4,3	1,2 +/-0,2	21,4 +/-10,1	13,5 +/- 7,0	12,5 +/-4,9
Sierras	56	11,6 +/-4,4	1,2 +/-0,1	34,9 +/-13,7	21,9 +/-11,1	13,0 +/-5,0

Valores en cursiva representan desviaciones estandar.

La relación entre el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial de los suelos de las sierras y sus valores para las constantes hídricas fue aceptablemente ( $r^2 \sim 0,7$ ) explicada por polinomios de tercer orden (Figura 6.10 A). Niveles de ajuste similares fueron obtenidos mediante regresión lineal para la relación entre la densidad aparente y las constantes hídricas de estos suelos (Fig. 6.10 B). Estos niveles de ajuste contrastan notablemente con los obtenidos mediante regresiones simples para los suelos de las sierras, que oscilaron entre 0,2 y 0,3. De esta forma, al aplicar el modelo de Boekel se obtuvo una dispersión entre los valores estimados y las observaciones como la que se ilustra en Fig. 6.10 C, lo que implicó que las estimaciones explicaran linealmente el 67% ( $P < 0,05$ ) de la variabilidad en las observaciones. Por su parte, el cociente MO / DAP presentó relaciones más estrechas con los valores de CC y CMP ( $r^2 = 0,68$  y  $0,70$ , respectivamente), que fueron mejor ajustadas mediante polinomios de segundo orden (Fig. 6.10 D). Nótese que el cociente MO / DAP adquirió en este caso valores que duplicaron los correspondientes a los suelos de las llanuras; para estos últimos, el ajuste resultó mucho más estrecho hacia el rango de valores altos (i.e. MO / DAP > 8) de esta variable (cf. Fig. 6.8 A).

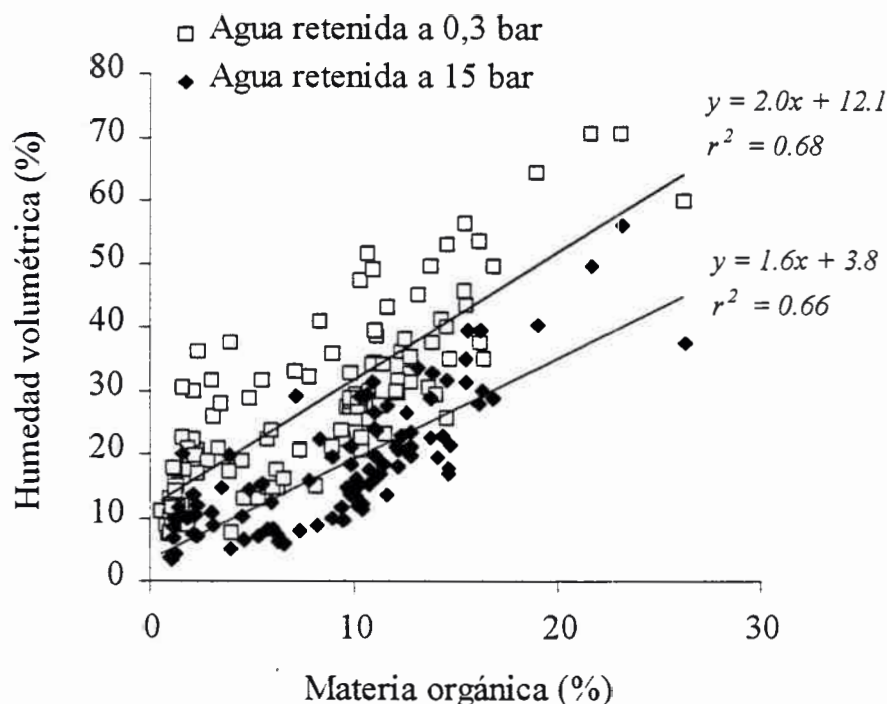


Figura 6.11: Determinación gráfica de los equivalentes gravimétricos de la materia orgánica para la totalidad (llanuras + sierras) de los suelos de la región (explicación en texto principal).

#### *Equivalentes gravimétricos*

Estos resultados sugieren el papel preponderante de la fracción orgánica en la regulación de las relaciones hídricas en suelos con altos niveles de C. En suelos con menores contenidos de materia orgánica, esta función aparece asumida principalmente por el

contenido de arcilla. El equivalente gravimétrico de la arcilla para los suelos de las llanuras fue de 81 [g agua útil g<sup>-1</sup>arcilla], mientras que el incremento marginal promedio del contenido de agua útil respecto del de arcilla fue de 0,48 p/p (ó 0,57 v/v) – éstos suelos retienen medio gramo más de agua por cada punto de aumento en su porcentaje de arcilla. Su equivalente gravimétrico para la materia orgánica fue de 332 [g agua útil g<sup>-1</sup>materia orgánica], en tanto que el incremento marginal respecto de ésta no pudo ser estimado, debido a la importante dispersión de las observaciones (cf. Fig. 6.5 y texto relacionado); el equivalente gravimétrico de la materia orgánica para los suelos de las sierras fue de 101. Al considerar ambos subconjuntos en un análisis integral (Figura 6.11), el valor para el equivalente gravimétrico se ubicó en 202, mientras que los incrementos marginales para las constantes hídricas respecto de la materia orgánica fueron estimados en 1,7 y 1,3 p/p (2,0 y 1,6 v/v) para CC y CMP, respectivamente.

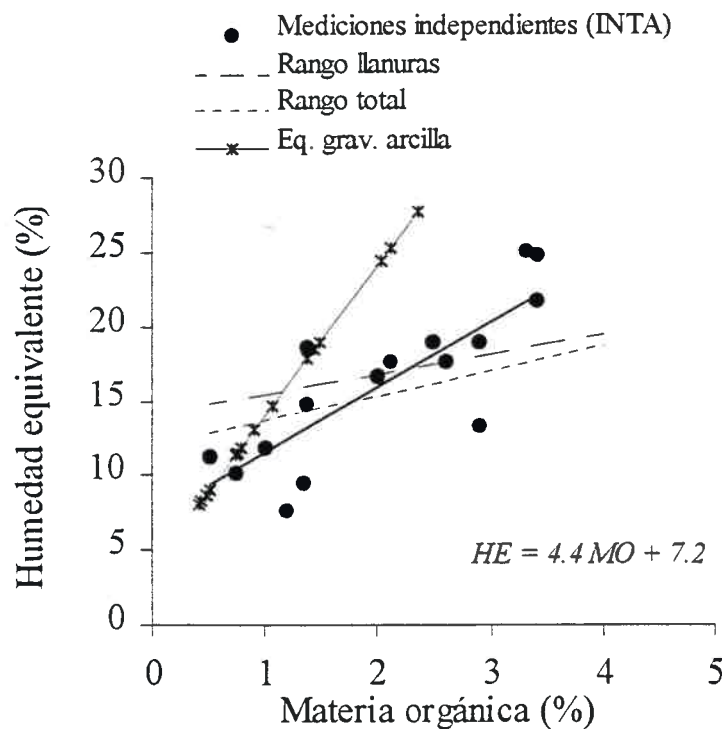


Figura 6.12: Relación entre el contenido de materia orgánica y el equivalente de humedad para el horizonte superficial en suelos de la región descriptos en la Carta de Suelos de la República Argentina (INTA); valores medidos (publicados) ajustados linealmente y estimaciones de acuerdo a los diferentes enfoques analizados (ver texto principal).

Las discrepancias en los valores de los equivalentes graviméricos, en los incrementos marginales y en la estabilidad de las relaciones empíricas entre los suelos con altos y bajos niveles de materia orgánica, hacen que este enfoque no constituya una herramienta confiable para la estimación de las constantes hídricas. Utilizando nuevamente las únicas mediciones independientes disponibles (Apéndice VI – Tabla A) se introdujo una recta de ajuste entre el contenido de materia orgánica y la humedad equivalente ( $r^2 = 0,67$ ), cuya ecuación aparece en Figura 6.12, donde fue representada por una línea entera. Los valores de humedad equivalentes fueron también estimados (mediante su conversión de v/v en



p/p) utilizando las ecuaciones halladas para (i) todo el rango de valores disponibles (Rango total) y (ii) sólo para el rango de suelos de llanura (Rango llanuras). Por último, se utilizó la ecuación desarrollada para la arcilla, correspondiente al rango de suelos de llanura (Eq. Garv. Arcilla). Ninguna de éstas ecuaciones parece describir con claridad la tendencia en el valor de la humedad equivalente respecto de la materia orgánica, observada para las mediciones independientes. No obstante, en búsqueda de valores de referencia para monitorear 'salud' del suelo, o de valores por defecto para la estandarización de modelos de simulación, la ecuación desarrollada a partir del total de las observaciones [llanuras + sierras, Fig. 6.11] podría resultar suficientemente apropiada.

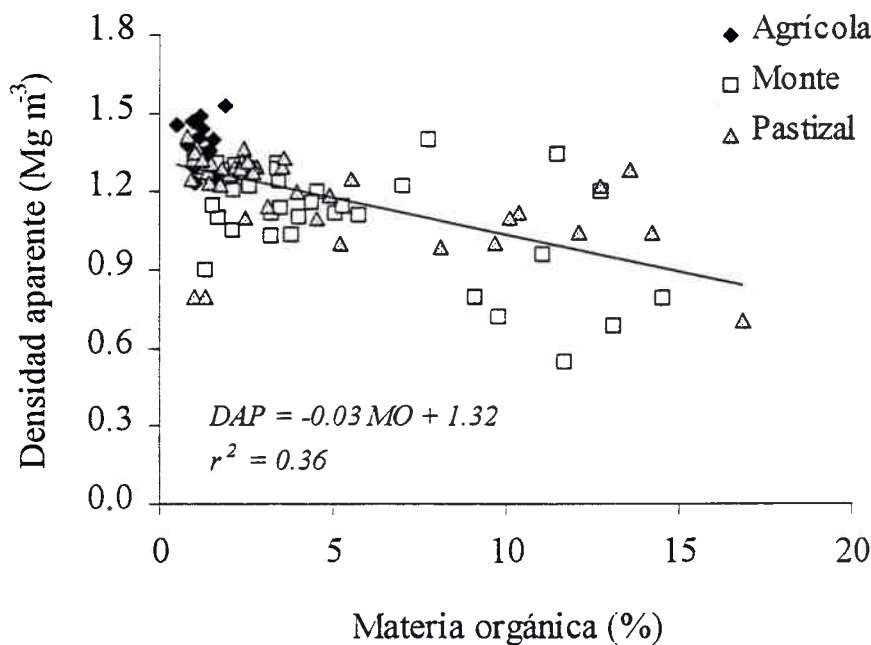


Figura 6.13: Relación entre el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial de los suelos de la región y su densidad aparente, para diferentes situaciones de uso de la tierra.

### 6.1.3 Densidad aparente y porosidad total

Desde el punto de vista del monitoreo de la salud de suelo (y de la sustentabilidad del sistema), interesa conocer los rangos de variación para la densidad aparente del horizonte superficial bajo diferentes condiciones agroecológicas e historias de uso en la región, y su relación con la fracción orgánica como variable integradora. El dato de densidad aparente entrega una expresión indirecta de las condiciones de estructuración del suelo que definen su porosidad, afectando a la infiltración y retención hídrica y a las condiciones para la vida en el suelo (e.g. exploración radical, disponibilidad de nutrientes, etc.). La relación entre el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial de los suelos de la región y su densidad aparente aparece representada en Figura 6.13. Allí se han discriminado las observaciones de acuerdo a la historia de uso (predominante) de cada situación de muestreo; los mayores valores para la densidad aparente y los menores para el contenido

de materia orgánica correspondieron a las mediciones en situaciones con historias de uso agrícola. El grado de ajuste entre ambas variables fue bajo ( $r^2 = 0,36$ ), y el mismo no ha podido ser mejorado por regresiones múltiples incluyendo otras variables, ni al discriminar por tipos de vegetación para condiciones naturales, ni utilizando técnicas de regresión no lineal que fragmenten la distribución. La tendencia indica una disminución gradual en el valor de la densidad aparente al aumentar el contenido de materia orgánica. En el caso de los pastizales naturales y los relictos de monte esta disminución se ubicó entre 0,02 y 0,03 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente, por cada punto de aumento en el porcentaje de materia orgánica ( $r^2 \sim 0,3$ ).

Tabla 6.4: Materia orgánica, densidad aparente y cálculo de la porosidad total para los suelos de la región (n = 122) agrupados de acuerdo a su historia de uso predominante y a su proporción para la fracción arcilla+limo en el horizonte superficial.

Historia de uso* / Clase arcilla+limo	Materia orgánica (%)	Densidad aparente (Mg m <sup>-3</sup> )				Porosidad total** (%)
		Media	Mínima	Máxima	Desvío	
<i>Monte</i>						
0 - 30 %	2,73	1,13	0,90	1,30	0,11	57,2
30 - 60 %	4,85	1,19	0,80	1,35	0,16	55,2
60 - 90 %	9,35	0,95	0,55	1,40	0,28	63,9
<i>Pastizal</i>						
0 - 30 %	1,45	1,20	0,80	1,42	0,23	54,6
30 - 60 %	3,88	1,23	1,00	1,37	0,10	53,6
60 - 90 %	5,26	1,17	0,71	1,33	0,18	55,8
<i>Agricultura</i>						
0 - 30 %	1,00	1,37	1,24	1,54	0,10	48,4
30 - 60 %	1,29	1,36	1,23	1,49	0,09	48,8
60 - 90 %	1,70	1,31	1,26	1,36	0,03	50,8

\**Monte*: situaciones en que el estrato arbóreo esta aún presente (con o sin uso pastoril); *Pastizales*: incluye pastizales originales y aquellos creados por desmonte, sin labranza; *Agricultura*: situaciones en que se practica labranza para la implantación de cultivos y pasturas

\*\*Estimado en base a un valor 2,65 kg dm<sup>-3</sup> para la densidad promedio de los minerales del suelo

A fin de sistematizar la variabilidad de las observaciones se adoptó un criterio similar al utilizado para el análisis de los factores zonales en Capítulo 5, donde se discriminó a las observaciones en dos (mayor o menor a 40%), tres (mayor a 60, entre 30 y 60 o menor a 30%) y cuatro (mayor a 60, entre 40 y 60, entre 20 y 40 y menor a 20%) clases de acuerdo al valor de la fracción arcilla+limo. El grado de ajuste lineal entre la densidad aparente y la materia orgánica mejoró al considerar clases de texturas cada vez más diferenciadas; e.g. fue similar al general para la clase < 40% ( $r^2 = 0,4$ ), sólo fue algo mejorado para la clase < 30% ( $r^2 = 0,5$ ) y resultó bastante estrecho para la clase < 20% ( $r^2 = 0,9$ ). Las observaciones de densidad aparente han sido tabuladas utilizando la estratificación en tres clases y la discriminación original por historias de uso (Tabla 6.4); el contenido promedio de materia orgánica para cada clase se presenta como referencia. Utilizando la expresión  $[(\text{Densidad mineral} - \text{Densidad aparente}) / \text{Densidad mineral}] * 100$ , y asumiendo un

valor promedio  $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$  para la densidad de los minerales del suelo (i.e. densidad real), se calculó la porosidad total promedio (%) para cada clase.

Confirmando las observaciones y análisis del Capítulo 5, el contenido de materia orgánica promedio disminuyó en función de la historia de uso siguiendo la secuencia Monte - Pastizal - Agricultura, y aumentó con la clase de textura a medida que aumentó la proporción de arcilla+limo (Tabla 6.4). Como era de esperarse, la densidad aparente mostró un comportamiento exactamente inverso. De acuerdo a estos rangos de referencia, en situaciones sin labranza, con o sin estrato arbóreo, es de esperarse que el valor de la densidad aparente ronde entre 1 y  $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ . Los máximos valores absolutos, los rangos de variación (min. - max.) más estrechos y la menor dispersión en los valores (desvío), fueron observados para las situaciones bajo rotación agrícola por largos períodos. Nótese que el valor estimado para la porosidad total varió más ampliamente entre situaciones con diferentes historias de uso que entre clases de textura, a pesar de que éstas últimas presentaron un importante contraste. Desde luego, esta estimación no permite inferir nada sobre la distribución del tamaño de poros o 'calidad' del espacio poroso, que es factible de variar ampliamente dentro del rango de texturas de los suelos considerados.

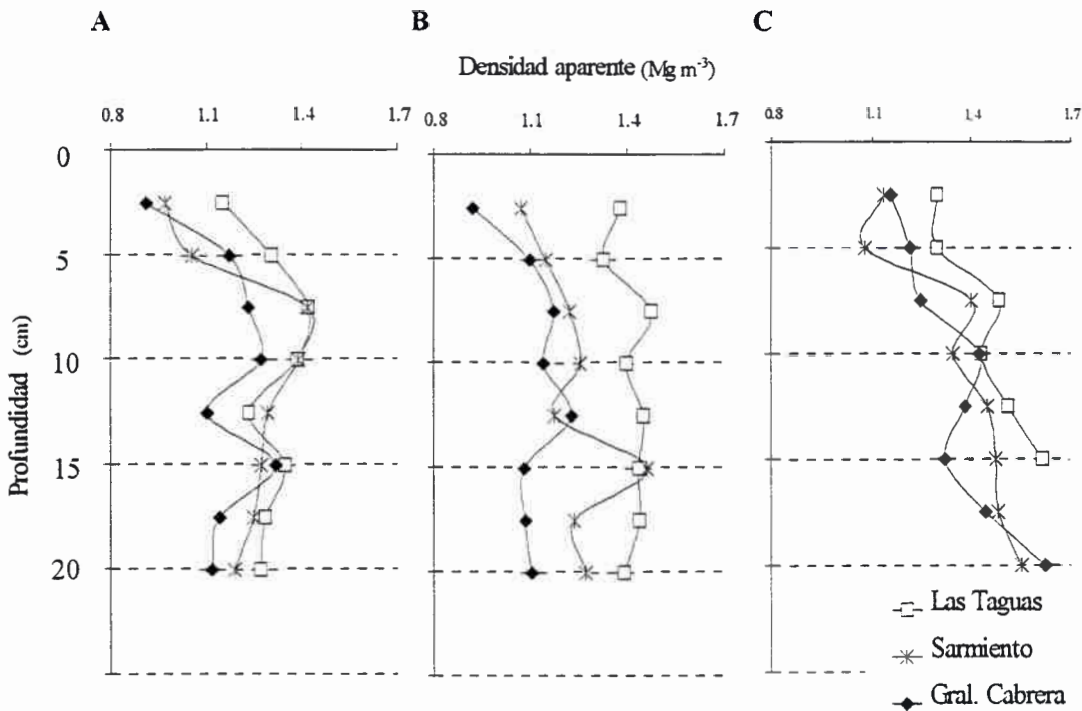


Figura 6.14: Evolución del valor de densidad aparente con el incremento de la profundidad a través del horizonte superficial, en tres sitios ubicados a lo largo de una transecta NE-SO (gradientes climático y granulométrico) en la región. [A] Montes; [B] Pastizales; [C] Rotaciones agrícolas.

#### Variaciones con la profundidad

Los valores de densidad aparente medidos a campo mediante una sonda de rayos gamma a intervalos de 2,5 cm de profundidad, fueron posteriormente promediados para informar un

valor que represente a los primeros e.g 20 cm del perfil. Sin embargo, resulta también interesante ilustrar lo que ocurre con la evolución del valor de densidad aparente con el incremento de la profundidad a través del horizonte superficial. La Figura 6.14 presenta estas relaciones para tres estudios de caso ubicados a lo largo de una transecta imaginaria NE - SO, que atraviesa la región conforme varían los gradientes climático y granulométrico (Capítulo 3). En los tres sitios se han determinado los perfiles de densidad aparente en situaciones con historias de uso diferentes (A: montes, B: pastizales y C: rotaciones con agricultura), aunque las mismas varían mucho entre localidades, de acuerdo a las particularidades de cada sub-región. Sin embargo, es posible advertir en todos los casos menores valores superficiales para los suelos bajo monte, que aumentan por debajo de los 5 cm, y una mayor densificación ( $DAP > 1,4 \text{ Mg dm}^{-3}$ ) hacia profundidades entre 15 y 20 cm para las situaciones en que se practicaron labranzas. Los suelos más finos y con mayor contenido de materia orgánica de Gral. Cabrera tendieron a mostrar los valores más bajos de densidad aparente en situaciones sin labranza.

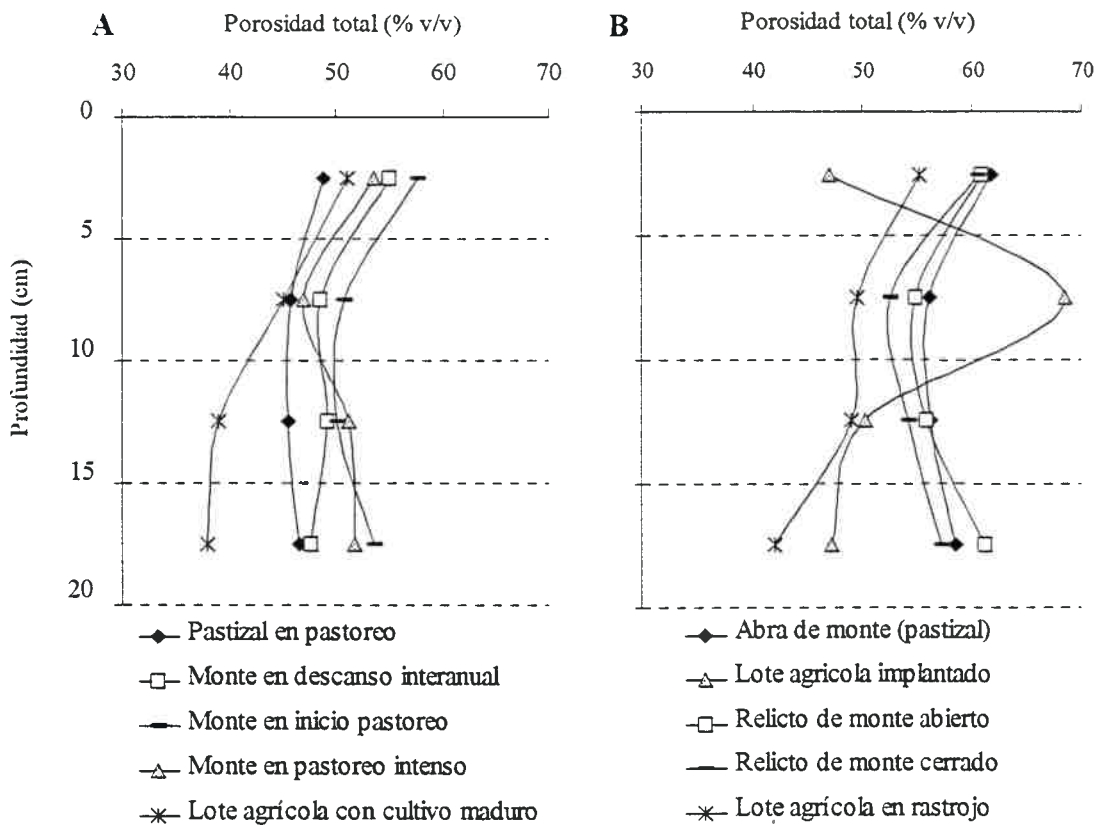


Figura 6.15: Evolución del valor de porosidad total con la profundidad en diferentes situaciones de uso y manejo para suelos de texturas contrastantes. [A] Sub-región llanuras medanosas, sector SO; [B] sub-región llanuras bien drenadas, sector pampa plana.

El mismo instrumental utilizado para la medición de la densidad aparente entrega una estimación del valor de la porosidad total (de acuerdo a discontinuidades en la propagación de las ondas) a intervalos de 5 cm. Estas mediciones permiten mejorar los cálculos del volumen del espacio poroso necesarios en la calibración de modelos que



expliquen la estática y dinámica de los fluidos en el suelo. Además, la evolución del valor de porosidad total con la profundidad resultó notablemente sensible a las variaciones en el uso y manejo del suelo, como lo ilustra la Figura 6.15 para suelos de texturas contrastantes (A: sub-región llanuras medanosas, sector SO; B: sub-región llanuras bien drenadas, sector pampa plana). Los efectos del uso y manejo sobre la dinámica orgánica y sus propiedades relacionadas son analizados con mayor detalle en el trabajo de tesis complementario a éste (De Grazia, inédito). Sin embargo, interesa destacar aquí las diferencias en la magnitud de los rangos de variación de los valores de porosidad, frente a distintos planteos de uso y manejo, entre éstos dos suelos, que resultan representativos de sus respectivas áreas agroecológicas. Para el suelo de textura gruesa considerado en Fig. 6.15 A, las diferencias entre los perfiles de porosidad total bajo diferentes situaciones de uso y manejo son menores. Para el suelo de textura más fina (Fig. 6.15 B), se observaron diferencias de hasta un 20% en el valor de DAP a 7,5 cm de profundidad para suelos en descanso, frente a aquellos recientemente implantados, debido probablemente a una mayor compactación por el tránsito de maquinaria.

## 6.2 Aspectos cualitativos de la fracción orgánica

Los ‘aspectos cualitativos’ a considerar aquí refieren a la composición del carbono orgánico edáfico en términos de su fraccionamiento físico, a la relación entre los contenidos de carbono y nitrógeno en la fracción orgánica en general, y a las variaciones en el contenido de materia orgánica en el suelo con la profundidad. Aspectos éstos, que amplían la información que ofrece el dato individual sobre el contenido orgánico del horizonte superficial, y que pueden afectar y/o complementar la definición de rangos de referencia y la validación regional del modelo CENTURY para el monitoreo de calidad y salud del suelo.

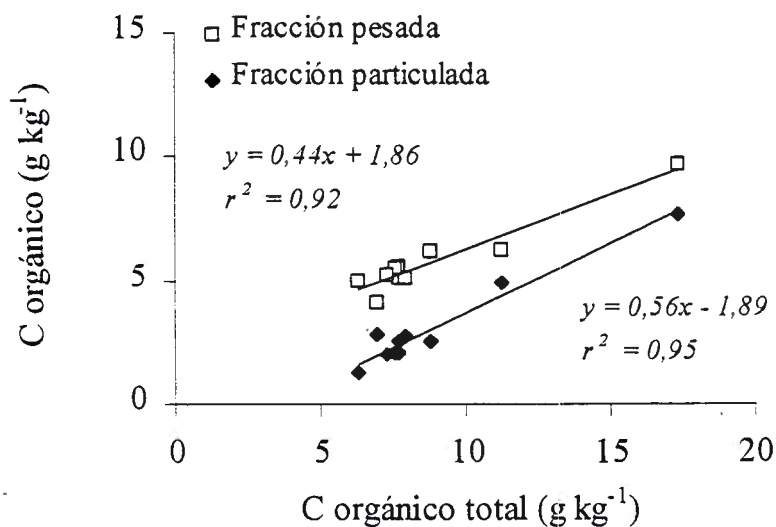


Figura 6.16: Contenido de carbono orgánico correspondiente a las fracciones pesada (0 – 53  $\mu\text{m}$ ) y particulada (53 – 2000  $\mu\text{m}$ ) en función del contenido de carbono orgánico total del horizonte superficial, en suelos del sector fuertemente ondulado de las llanuras bien drenadas. Las ecuaciones corresponden a las rectas de regresión simple.

### Fracciones físicas del carbono orgánico

El ejemplo regional con el que se ilustra la relación entre el contenido de C del suelo y la distribución del mismo asociado a diferentes fracciones granulométricas (pesada: 0-53  $\mu\text{m}$ ; intermedia: 53-250  $\mu\text{m}$ ; liviana: 250-2000  $\mu\text{m}$ ) corresponde a mediciones en suelos bajo diferentes sistemas de uso y manejo de la tierra, con sistemas de labranza convencional, conservacionista o sin remoción del suelo, y a distintas profundidades realizadas por Bricchi et al. (2004) en el sector fuertemente ondulado de las llanuras bien drenadas (cf. Capítulos 3 y 5). La Figura 6.16 muestra la relación entre el contenido de carbono orgánico total y los contenidos de carbono en las fracciones pesada y particulada (i.e. intermedia + liviana), considerando valores promedio de múltiples observaciones. Si bien, las líneas de tendencia que representan a la distribución de puntos de ambas fracciones tienden a converger a medida que aumenta el contenido de C total, es posible afirmar que en promedio corresponderían a 44 y 56% del C total (pesada y particulada, respectivamente) para este rango de contenidos de C. La diferencia entre éstas pendientes, sumadas a la discrepancia entre el signo y magnitud de los valores para la ordenada al origen se condicen con el hecho normalmente observado de que la fracción particulada es menos estable (la ordenada al eje  $x$  correspondería a 2,9  $\text{g kg}^{-1}$  de C total), y la primera en perderse frente a la degradación por el uso.

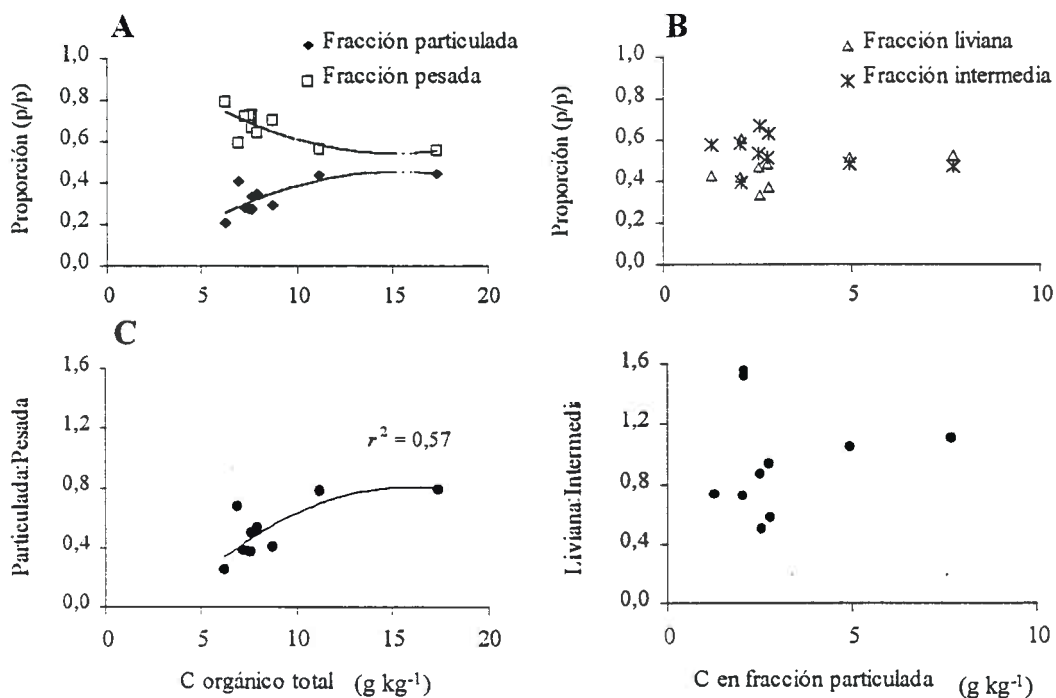


Figura 6.17: Proporciones relativas [A y B] y relaciones [C y D] de y entre las diferentes fracciones físicas del carbono (pesada: 0-53  $\mu\text{m}$ ; intermedia: 53-250  $\mu\text{m}$ ; liviana: 250-2000  $\mu\text{m}$ ; particulada: intermedia + liviana) en suelos del sector fuertemente ondulado de las llanuras bien drenadas bajo diferentes situaciones de uso de la tierra.

Sin embargo, aún en este rango relativamente estrecho de contenidos de C (expresados como porcentaje de materia orgánica, estos valores oscilaron entre 1,08 y 2,98 %, aunque el 90% de las observaciones estuvo comprendida en un rango porcentual de sólo 0,85 unidades) es posible advertir una variación en la proporción de las fracciones definidas anteriormente (Figura 6.17). La fracción pesada (i.e. 'estable') tendió a disminuir con el aumento de C orgánico en el suelo (Fig. 6.17 A); esta relación fue aceptablemente explicada por un modelo polinómico de segundo orden ( $r^2 = 0,6$ ), lo que potencialmente indicaría la existencia de valores 'críticos' que sería de interés conocer para las varias condiciones agroecológicas regionales. Concomitantemente, la relación entre las fracciones particulada y pesada tendió a aumentar con el contenido de C total (Fig. 6.17 C), aunque sólo hasta un cierto punto; para el valor derivado de las observaciones en suelos poco o no disturbados ( $17,3 \text{ g kg}^{-1}$ ) correspondió una relación entre ambas fracciones de 0,8. Dentro del rango de valores medidos para la fracción particulada ( $F_P$ ), la proporción de las fracciones liviana ( $F_L$ ) e intermedia ( $F_I$ ) se mantuvieron relativamente estables (Fig. 6.17 B). Modelos lineales ajustados entre el contenido de C en la  $F_P$  y entre los correspondientes a  $F_L$  y  $F_I$  indicaron proporciones estables del orden del 54 ( $r^2 = 0,96$ ) y del 46% ( $r^2 = 0,94$ ), respectivamente; el modelo correspondiente a  $F_L$  mostró además un valor negativo para la ordenada al origen.

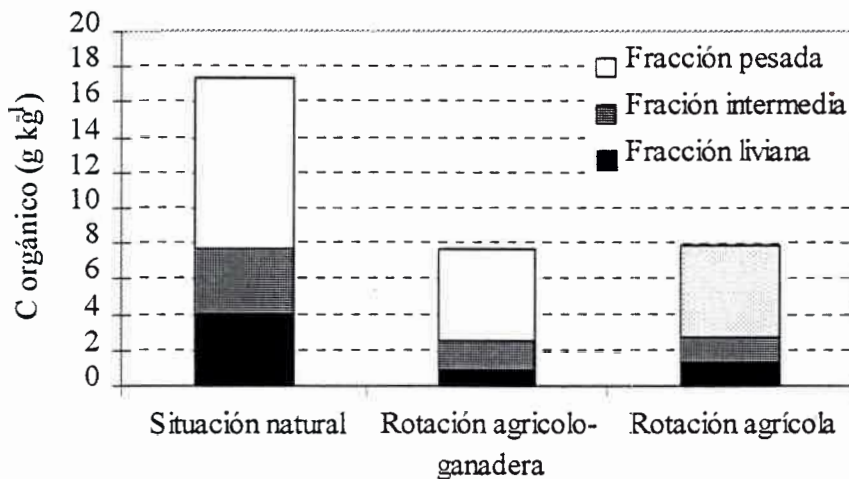


Figura 6.18: Contenido de C orgánico total y en cada una de sus fracciones físicas (pesada: 0-53  $\mu\text{m}$ ; intermedia: 53-250  $\mu\text{m}$ ; liviana: 250-2000  $\mu\text{m}$ ) para diferentes situaciones de uso de la tierra en el sector fuertemente ondulado de las llanuras bien drenadas.

La relación  $F_L:F_I$  tendió a aumentar levemente con el aumento del contenido de carbono en la  $F_P$  (Fig. 6.17 D); sin embargo, se evidencia un par de valores alejados de esta tendencia general y que corresponden a los promedios de las observaciones en suelos bajo sistemas de labranza reducida y en rotaciones agrícola-ganaderas. Las particularidades referentes al uso y manejo de las tierras y a su efecto sobre la composición de la fracción orgánica edáfica escapan a los objetivos de este trabajo; no obstante, la observación anterior nos permite inferir la importancia de considerar el uso histórico de la tierra en la definición de rangos de referencia para la relación entre las fracciones físicas del C. Así lo

confirma la distribución relativa de las mismas en suelos bajo diferentes sistemas de uso (Figura 6.18 y Apéndice VIII - Figuras A y B). El contenido de C orgánico total en los suelos bajo condición natural fue casi el doble del correspondiente a los suelos bajo uso agrícola y ganadero. La proporción de la fracción pesada en el C orgánico total fue algo menor en la situación no disturbada (Apéndice VIII - Fig. A), mientras que en los suelos bajo rotación agrícola-ganadera se observó la menor proporción relativa para la fracción liviana (Apéndice VIII - Fig. B).

#### *Relación carbono:nitrógeno*

Para ilustrar la variación regional de este indicador cualitativo de la fracción orgánica, se utilizaron datos provenientes de diversas fuentes en que se contó con la información fehaciente sobre el método de determinación del N total (Informes UNRC - cf. Capítulo 4). Los mismos corresponden a observaciones mayormente provenientes de la sub-región llanuras bien drenadas, y bajo un amplio rango de situaciones de alteración por uso y manejo. A pesar de esta importante variabilidad en el origen de los datos, la relación entre los contenidos de C y N se mantuvo relativamente estable ( $r^2 = 0,74$ ) para todo el rango de valores considerado (Figura 6.19 A). Forzando la regresión a través del origen se obtuvo una pendiente de 0,094, cuya inversa (1/0.094) equivale a 10,7 y correspondería al valor promedio para la relación C:N. La variabilidad no explicada por este modelo lineal se visualiza en la débil ( $r^2 = 0,41$ ) tendencia al incremento en el valor de la relación C:N con el aumento de contenido de materia orgánica (y de la fracción arcilla+limo) en el suelo (Fig. 6.19 B).

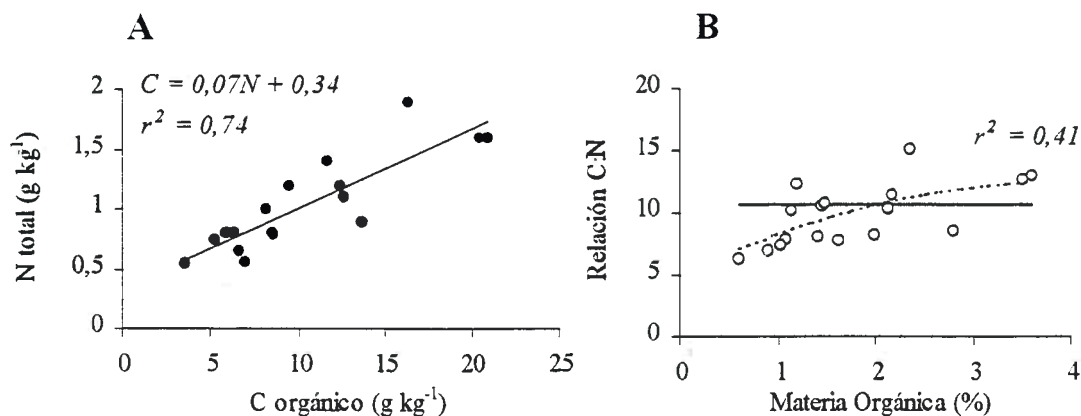


Figura 6.19: Relación entre los contenidos de carbono y nitrógeno [A] y su variación para diferentes niveles de materia orgánica [B] en suelos de la sub-región llanuras bien drenadas bajo diferentes situaciones de uso de la tierra. La línea horizontal en [B] indica el valor promedio estimado para la relación C:N.

Mayores niveles de C en el suelo parecerían estar asociados a la mayor abundancia relativa de fracciones menos estables, las que normalmente presentan relaciones C:N más altas (Fig. 6.19 B). Esta última afirmación, sumada a la confirmación de un valor positivo para la ordenada al origen en Fig. 6.19 A, constituyen hipótesis de interés en el estudio de los aspectos cualitativos de la fracción orgánica y de su variación frente a diferentes condiciones agroecológicas.



### *Perfiles verticales de materia orgánica*

La evolución vertical del contenido de materia orgánica, que fuera ilustrada anteriormente para suelos de las diferentes sub-regiones (Capítulo 5 – Figs. 5.14 y 5.17), resulta importante en la determinación de las cantidades totales de C presentes en el suelo, cuya evolución temporal es efectivamente simulada por CENTURY (y no así del contenido). El perfil vertical de la fracción orgánica reviste aproximadamente la forma de una curva de disminución exponencial, cuyos parámetros podrían hallarse para cada tipo de suelo, a fin de integrar el valor de C en función de la profundidad y obtener un dato aproximado de cantidad total. Un enfoque alternativo consiste en asumir un valor de contenido de C constante para todo el perfil y multiplicarlo por una profundidad crítica, obteniendo una cantidad total de carbono equivalente a la que se obtendría al integrar para todo el perfil. En muchos casos, no se cuenta con determinaciones de materia orgánica a distintas profundidades del perfil. Conociendo la profundidad crítica para los diferentes tipos de suelo bajo estudio, bastará contar sólo con el dato de contenido de C superficial para estimar la cantidad total de C. A continuación se desarrolla y ejemplifica el cálculo de la profundidad crítica que ha sido adoptado en las etapas de validación del modelo (Capítulo 7).

La profundidad crítica puede ser hallada mediante un cálculo sencillo; la cantidad total de carbono en el suelo corresponde a:

$$\text{Cantidad de C [g m}^{-2}\text{]} = \text{Contenido de C [g kg}^{-1}\text{]} * \text{Masa total del perfil [kg m}^{-2}\text{]} \quad (\text{Eq.1})$$

Nótese que podría prescindirse de las unidades de superficie cuando se refieran los cálculos a un área de 1 m<sup>2</sup>. De la expresión precedente se desprende que la masa del perfil puede ser calculada como el cociente entre la cantidad total y el contenido promedio de C en el perfil. La masa total puede ser también calculada al multiplicar la densidad aparente promedio para todo el perfil (cf. variación vertical en Sección 6.1.3) por el volumen de suelo considerado:

$$\text{Masa total del perfil [kg m}^{-2}\text{]} = \text{Densidad aparente [kg m}^{-3}\text{]} * \text{Volumen perfil [m}^3\text{]} \quad (\text{Eq.2})$$

Reemplazando al volumen por el producto del área [m<sup>2</sup>] por la profundidad [m] y a la masa por el cociente entre la cantidad y el contenido de C derivado de Eq. 1, reacomodando la expresión y refiriéndola a un área de 1 m<sup>2</sup> se tiene que:

$$\text{Profundidad [m]} = \frac{\text{Cantidad de C en el suelo [g m}^{-2}\text{]}}{\text{Contenido de C [g kg}^{-1}\text{]} * \text{Densidad Aparente [kg m}^{-3}\text{]}} \quad (\text{Eq.3})$$

La cantidad total de C en el perfil es calculada por integración de la cantidad correspondiente a cada capa diferenciada, o bien multiplicando el promedio ponderado del contenido de C para todo el perfil. Del mismo modo la densidad aparente promedio puede

obtenerse asumiendo un valor constante o utilizando los perfiles de variación vertical para su ponderación. Cuando se reemplaza en *Eq. 3* con el contenido de carbono superficial (i.e. el dato corriente), se obtiene el valor de la profundidad crítica. En Tabla 6.5 se presentan los cálculos correspondientes a los mismos ejemplos utilizados en Capítulo 5 (Figs. 5.14 y 5.17) para suelos de las llanuras mal drenadas y bien drenadas, en el sector fuertemente ondulado.

Tabla 6.5: Cálculo de la profundidad crítica para la ponderación de la cantidad de carbono total ( $\text{g m}^{-2}$ ) a partir del contenido de carbono superficial ( $\text{g kg}^{-1}$ )

Ejemplo	Prof. sólum (m)	Contenido de C ( $\text{g kg}^{-1}$ )		Cantidad de C ( $\text{g m}^{-2}$ )			Prof. crítica*** (m)
		Sólum*	Epipedón	Sólum**	Epipedón	0-20 cm	
<i>Llanuras mal drenadas</i>							
Lomas convexas	1,00	2,4	11,5	2980	2760	1840	0,207
Tendidos inclinados	1,05	2,1	10,5	2590	2290	1910	0,197
Tendidos a nivel	0,93	2,5	14,0	3130	2840	2580	0,179
Bajos cóncavos	0,45	3,0	22,8	3750	2150	2260	0,132
<i>Llanuras bien drenadas</i>							
La Aguada (loma)	0,85	5,4	12,6	6800	3110	3270	0,432
La Aguada (bajo)	0,90	11,9	28,4	14840	5750	6760	0,418

\*Promedio ponderado para todas las capas del perfil

\*\*Sumatoria de los valores correspondientes a todas las capas del perfil

\*\*\*Los cálculos se realizaron considerando valores constantes para la densidad aparente

Como se desprende de estos cálculos, la profundidad crítica no depende del contenido ni de la cantidad de C (Tabla 6.5), sino de la forma que describe su evolución con la profundidad. El modelo CENTURY arroja valores simulados para la cantidad total de C asumiendo una profundidad constante de 0,2 m; existe sin embargo una notable discrepancia entre tal valor y el correspondiente al epipedón (aún sin considerar las variaciones en la densidad aparente) en ciertos casos. Claramente, los cálculos para estos ejemplos indican la importancia de considerar los ajustes por profundidad de los resultados de las simulaciones previo a su interpretación.

### 6.3 Observaciones finales

Los valores de referencia a escala sub-regional analizados en Capítulo 5, considerando variaciones en textura, clima y tipo de vegetación, constituyen una primera aproximación para la definición de indicadores de calidad de suelos, como variable de sustentabilidad de los sistemas productivos. Los mismos pueden ser complementados con los rangos para propiedades físicas y químicas discutidos aquí, a fin de ampliar la información obtenida mediante las simulaciones de la evolución del contenido de C en los suelos. Sin embargo, ciertas consideraciones metodológicas acerca de los enfoques adoptados aquí deben ser tenidas en cuenta:

En primer lugar, los modelos empíricos deben ser aplicados con un criterio referencial y en ningún caso podrán reemplazar a las mediciones de las propiedades que ellos estiman. Su utilidad reside en la descripción (y, a largo plazo, comprensión) de los factores involucrados en la determinación de una cierta propiedad y de sus pesos relativos (sentido y magnitud). Los mismos pueden ser utilizados para identificar y direccionar hipótesis de trabajo. En segundo lugar, los datos utilizados aquí han sido recolectados por diferentes autores y con fines diversos, que no son necesariamente los mismos que los de éste trabajo. Esto introdujo una importante variabilidad cuyo significado no tiene vinculación alguna con el comportamiento y las relaciones de las variables bajo estudio.

Los valores de materia orgánica considerados en la determinación de rangos de referencia hasta aquí no incluyeron información alguna sobre sus características intrínsecas. Al indicar como referencia un valor promedio para el contenido de materia orgánica en un determinado suelo, sujeto a condiciones agroecológicas particulares, no se consideran sus atributos cualitativos (a pesar de su importancia en relación con los aspectos funcionales). La composición química de la fracción orgánica edáfica, fuertemente asociada al tipo ecológico de humus y susceptible al uso y manejo de las tierras, es indudablemente un factor a considerar en la evaluación de calidad y salud del suelo. Sin embargo, la información disponible no permite analizar su variabilidad regional, y su determinación resulta costosa y sus resultados altamente variables (Janssen, 2002). El fraccionamiento físico del carbono orgánico, en cambio, es una herramienta de más fácil implementación y homologación, que permite inferir abundante información sobre la dinámica orgánica en los suelos. Por otra parte, tales fracciones pueden ser asimiladas a los diferentes *pools* de carbono que asume el modelo CENTURY, que será objeto de validación regional en el próximo capítulo.

## 7 Sensibilidad del modelo CENTURY a las condiciones regionales y su aplicación para el análisis de escenarios futuros

El monitoreo del contenido de materia orgánica del horizonte superficial, en tanto indicador de calidad y salud de suelos, es propuesto aquí como una herramienta para evaluar sustentabilidad de los sistemas agroproductivos a través de su componente edáfica (cf. Capítulo 1). Para ello, es necesario contar con rangos de valores de referencia regionales para diferentes situaciones agroecológicas y con métodos apropiados para su monitoreo, tanto en su evolución actual como frente a escenarios dinámicos, biofísicos y socioeconómicos, que afecten al uso y manejo de las tierras. En el Capítulo 5 se han analizado los diferentes factores que controlan los niveles de materia orgánica en los suelos de la región, a fin de encontrar valores de referencia ajustables a la variabilidad regional. En el Capítulo 6 se analizó el efecto de tales niveles sobre propiedades físico-químicas que hacen a la calidad del suelo y a su resiliencia. En este capítulo, se complementarán estos análisis con la evaluación de la herramienta metodológica para el monitoreo de la fracción orgánica, esto es: un modelo de simulación de la dinámica del C en el agroecosistema en el contexto de un marco conceptual que involucra a las nociones de calidad y salud del suelo. El modelo CENTURY (Parton *et al.*, 1987) a sido elegido para tal fin de acuerdo a las consideraciones técnicas (i.e. modelo mecanístico, multi-componente, fácilmente inteligible) y prácticas (i.e. amplia aplicación internacional, bajo requerimiento en datos, en constante renovación, etc.) que fueron discutidas en los Capítulos 1 y 2.

En la Sección 7.1 se analiza la sensibilidad del modelo frente a las condiciones agroecológicas regionales y se estudian algunos aspectos relacionados a la estructura interna y supuestos asumidos durante las simulaciones, que puedan afectar a los resultados y predicciones. En la Sección 7.2 se propone y ejemplifica una posible aplicación del modelo para el análisis de escenarios futuros.

### 7.1 Evaluando la sensibilidad del modelo a las condiciones regionales

La sensibilidad – en sentido amplio – del modelo a las condiciones regionales ha sido evaluada en tres etapas. En primer lugar se analizó el grado de ajuste de las predicciones hechas con el modelo respecto de las observaciones a campo, discutiendo algunas consideraciones sobre el diseño de las simulaciones. Luego se estudiaron algunos aspectos específicos que hacen a la estructura interna y supuestos del modelo, que pueden ayudar en la interpretación de los resultados por parte del usuario de esta herramienta de monitoreo. Por último, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad formal, calculando sensibilidades parciales relativas a diferentes planteos de uso de la tierra.



### 7.1.1 Grado de ajuste general para la condición 'natural'

El modelo predijo en forma aceptable ( $r^2 = 0,86$ ) el nivel de carbono orgánico total de los suelos del centro de Argentina para las condiciones de equilibrio natural (Figura 7.1). Los sitios de muestreo incluidos corresponden a las llanuras medanosas, las llanuras bien drenadas subnormales a fuertemente onduladas y las llanuras mal drenadas. Los ambientes serranos no fueron incluidos en este análisis; en los restantes casos, las situaciones de intrazonalidad acentuada (e.g. sectores con frecuencia anegables e inundables del sud-este de la región) fueron también evitadas (ver: Intrazonalidad y ambientes serranos, Capítulo 5). Si bien es prácticamente imposible encontrar situaciones de nula intervención antrópica en la región, las situaciones incluidas aquí ( $n = 44$ ) presentan un grado de alteración mínimo, conservando su vegetación natural o sub-espontánea (i.e. pastizales creados en áreas de desmonte antiguo), y siendo marginalmente utilizados en la producción ganadera, con muy baja carga animal. Para las simulaciones se han utilizado los escenarios *Natural* (Capítulo 4) con y sin monte, durante periodos de simulación de 5000 años.

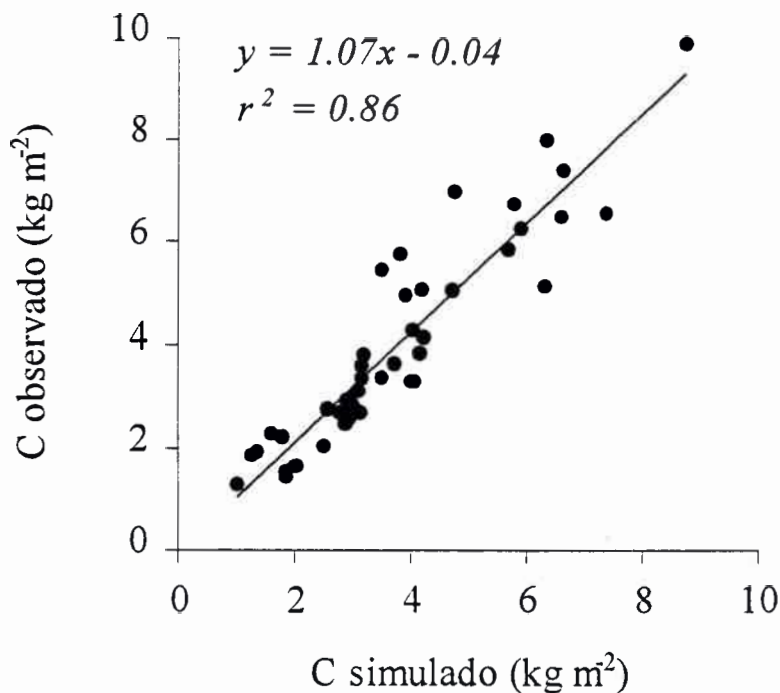


Figura 7.1: Comparación entre los valores medidos y simulados por CENTURY para la cantidad de carbono orgánico total en el horizonte superficial de suelos bajo condiciones cuasi-naturales del centro de Argentina ( $P < 0,01$ ;  $n = 44$ ). El análisis incluye situaciones de pastizales naturales y antrópicos y de monte natural, bajo leve alteración por uso y manejo. Los ambientes serranos no han sido incluidos.

El valor de C simulado por el modelo corresponde aproximadamente a más de un 90% del correspondiente al medido. La distribución de puntos en Figura 7.1 indica un mayor grado de ajuste entre los valores medidos y simulados para sitios con menores cantidades de carbono en el horizonte superficial (i.e.  $C$  observado  $<$  ca.  $4000 \text{ g m}^{-2}$ ). Esta observación

condujo a la desagregación de los puntos de acuerdo al tipo de vegetación presente actualmente en cada sitio (Figura 7.2 A y B). La relación entre los valores observados y simulados por CENTURY resultó estadísticamente mas estrecha para las situaciones bajo pastizal ( $r^2 = 0,88$ ) comparadas con los montes ( $r^2 = 0,78$ ). Para éstos últimos, existen fuentes de variación importantes, como la estimación de la densidad y cobertura del rodal o la variabilidad asociada a las condiciones de muestreo en suelos forestales. Sin embargo, el modelo subestimó en mayor medida la cantidad de C en el horizonte superficial de los pastizales, comparados con los de los montes (74 vs. 83%, respectivamente).

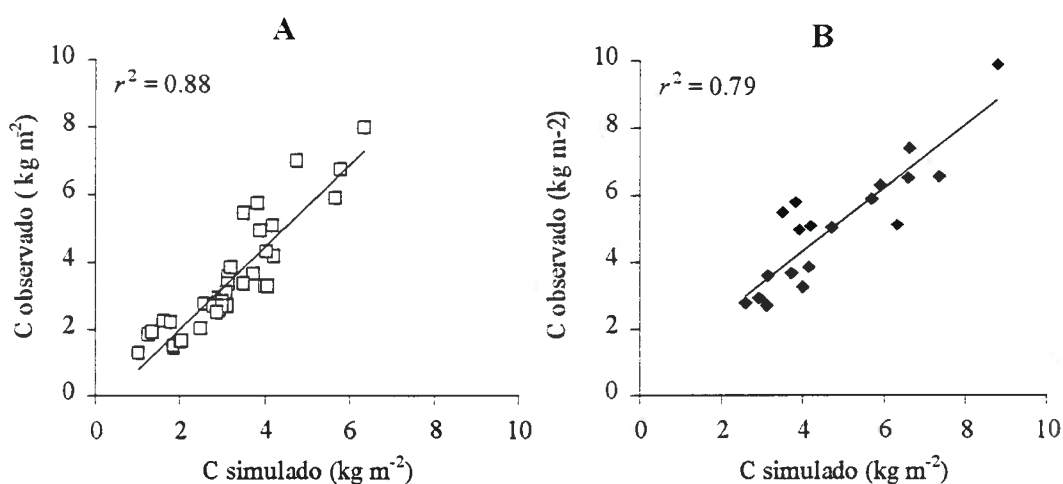


Figura 7.2: Comparación de los valores de C orgánico total medidos y simulados con CENTURY, para los horizontes superficiales de los suelos del centro de Argentina en situación de pastizal (A) y monte (B), en condiciones cuasi-naturales (en el caso de pastizales, se agregaron también situaciones bajo uso con mínimos signos de alteración).

Más allá del amplio rango de texturas de los suelos incluidos, los horizontes superficiales de los suelos de monte presentaron una cantidad promedio de C orgánico total mayor que los de pastizal, confirmando las observaciones hechas en Capítulo 5, pero con rangos de dispersión absoluta en la muestra notablemente similares para ambos (Tabla 7.1). La variación relativa resultó de esta forma mucho mayor en la muestra de suelos de pastizal ( $CV = 0,56$ ), lo cual responde al amplio gradiente ambiental considerado. Estos resultados indicarían que, independientemente de su ubicación geográfica dentro de la región, los horizontes superficiales de los suelos de monte poseen entre ca. 4000 a 6000 g C m<sup>-2</sup> ( $P < 0,05$ ), cuando se encuentran en condiciones de baja alteración antrópica. Considerando una profundidad del epipedón de 0,2 m y una densidad aparente de 1250 kg m<sup>-3</sup>, este rango resulta entre 16 y 29 g de C orgánico total por kg de suelo (entre 2,8 y 5% de materia orgánica, asumiendo un factor de conversión constante). Mediciones en suelos de montes bajo pastoreo arrojaron valores de materia orgánica claramente por debajo de este límite inferior (e.g. 1,1 % en Gral. Cabrera, 1,3 % en La Aguada, 0,59 % en Chaján, 1% en Villa Mercedes y 0,48% en Buena Esperanza, entre otros). Nótese que estos rangos resultan sumamente consistentes con aquellos que expresan las Figuras 5.9 y 5.10, para diferentes tipos de vegetación e historias de uso de las tierras.

La distribución de los puntos en la Figura 7.2 A muestra un conjunto de datos en su extremo superior derecho; los mismos corresponden a observaciones en suelos de pastizal con valores mayores del 60% para la suma de las fracciones limo y arcilla, en la sub-región llanuras loésicas fuertemente onduladas. Este subconjunto de observaciones incluye al único Argiudol típico descrito en la región (*Serie Mugnaini*). Cuando este subconjunto no fue considerado el valor promedio de C total para los pastizales fue de  $2580 \pm 330 \text{ g m}^{-2}$ , con un coeficiente de variación de 0,34; el modelo prácticamente no subestimó estas observaciones ( $m = 0,94$ ), aunque fue menos preciso ( $r^2 = 0,8$ ), en comparación con el análisis del conjunto completo de observaciones para pastizales. Un rango entre ca. 2200 y 2800  $\text{g C m}^{-2}$  corresponde a niveles de materia orgánica entre 1,5 y 2 % (profundidad 0,2 m; densidad aparente  $1250 \text{ kg m}^{-3}$ ) para el subconjunto mayoritario de suelos de la región, el cual se encuentra por fuera del rango calculado al usar todas las observaciones (i.e. 1,7 – 2,6 % de materia orgánica).

Tabla 7.1: Estadísticos descriptivos para el conjunto de observaciones de la cantidad de carbono orgánico en el horizonte superficial utilizadas en la validación de las simulaciones, para ambos tipos de vegetación en condiciones cuasi-naturales

Vegetación tipo	C orgánico total ( $\text{g m}^{-2}$ )			Coeficiente de variación
	Media	Desvío estándar	Intervalo de confianza 5%	
Pastizal	3120	1740	+/- 670	0,56
Monte	5100	1830	+/- 820	0,36

A partir de lo ilustrado por este conjunto de datos, y de las interacciones textura\*vegetación previamente observadas (Cap. 5), los rangos de referencia para el nivel de materia orgánica en condiciones de equilibrio cuasi-natural deberían ser definidos para cada sub-región en particular, en especial para las situaciones de pastizal. En el caso de los montes naturales, donde una gran cantidad de C del ecosistema se aloja en el componente biótico, las condiciones edafo-climáticas parecen tener un efecto relativamente menor sobre la determinación del nivel de C de equilibrio en el suelo, comparado con los pastizales. En este sentido, el uso de la tierra parece ser más importante; montes bajo pastoreo en las diferentes zonas de la región muestran valores de C orgánico muy por debajo del límite inferior del rango de C total establecido a partir de las situaciones cuasi-naturales. El grado de ajuste de las simulaciones generadas mediante CENTURY para diferentes situaciones de uso y manejo de las tierras es evaluado con mayor profundidad en un trabajo complementario (De Grazia, inédito). Aquí, simulaciones para situaciones de baja alteración antrópica mostraron un grado de ajuste interesante, tanto para el conjunto general como para cada tipo de vegetación dominante. Pero también, el modelo predijo aceptablemente la cantidad de C total en equilibrio para un amplio rango de condiciones agroecológicas, tal como se ilustra en Figura 7.3 para un Hapludol típico bajo escenarios de desmonte, labranza (a partir de 1950) y pastoreo en diferentes momentos durante el

siglo XX. En principio, esto permitiría utilizar CENTURY para la generación y evaluación de escenarios de uso y manejo, para el monitoreo de sustentabilidad, estudios de impacto ambiental, de riesgos u otras aplicaciones en la región. Sin embargo, aún es necesario conocer la sensibilidad del modelo a los diferentes factores que condicionan la dinámica del C en los agrosistemas, y evaluar el alcance de la representatividad de los resultados a generar mediante su uso (Secciones 7.1.2 y 7.1.3).

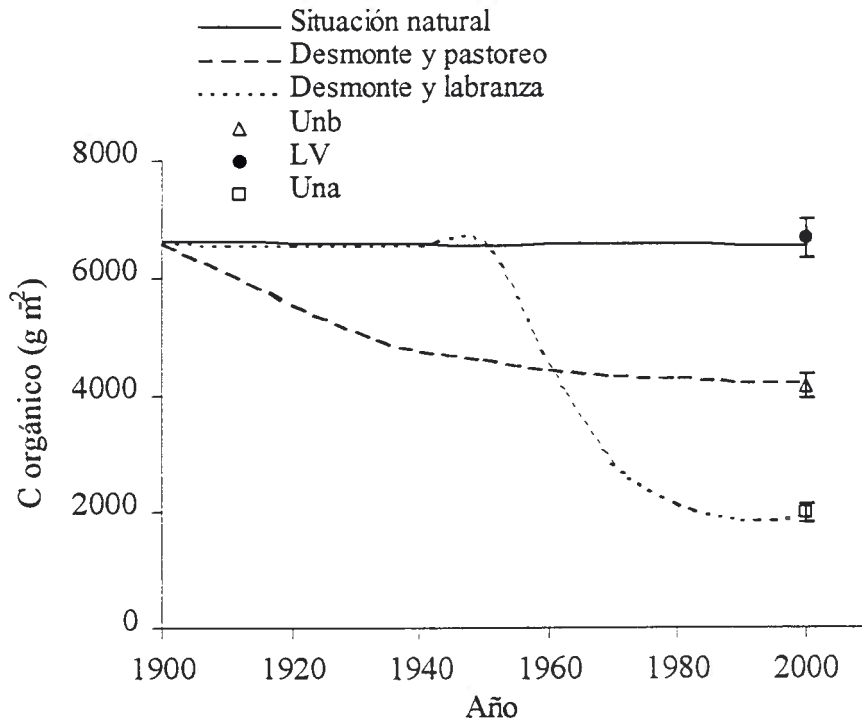


Figura 7.3: Simulación de la evolución del carbono orgánico superficial en un Hapludol típico de la sub-región llanuras bien drenadas suavemente onduladas, bajo diferentes escenarios de uso de las tierras (ver texto) durante el siglo XX. Los puntos corresponden al promedio de las mediciones (muestras) tomadas en los sitios de simulación (Unb, LV y Una, en Tablas B y C, Apéndice V); las barras verticales indican su desviación estándar. Nota: el aumento aparente de C orgánico previo al desmonte y labranza resulta de un artificio del programa gráfico, al intentar “suavizar” la serie de puntos.

Por último, existen otras fuentes posibles de error que deben ser tenidas en cuenta al operar el modelo para las condiciones locales: el período de simulación necesario para alcanzar el valor de C orgánico de equilibrio, y la historia de ‘uso y manejo’ de las tierras en condiciones cuasi-naturales. Para las estimaciones presentadas en Figs. 7.1 y 7.2, los periodos de simulación utilizados fueron de 5000 años, bajo esquemas de manejo *Natural*, es decir, considerando un pastoreo muy leve (por parte de herbívoros naturales) durante la evolución del suelo y un grado mayor durante los últimos siglos, al ingresar la ganadería extensiva (Capítulo 4). La Figura 7.4 ilustra la magnitud de las diferencias en los niveles de carbono orgánico simulados para el horizonte superficial de cierto suelo dentro de la región, al utilizar períodos de simulación de 3000, 4000 o 5000 años. Las simulaciones fueron realizadas bajo la situación *Potencial* (Capítulo 4), que asume que no existe efecto alguno del pastoreo, ni siquiera por los mamíferos nativos. Las diferencias en el nivel de



carbono final para el año 2000 no son de gran importancia al utilizar períodos de simulación de 3000 años o más: en los casos en que la vegetación dominante en el ecosistema original es de tipo 'monte' (i.e. sabana en CENTURY), estas diferencias son algo mayores (ca. 400 g C m<sup>-2</sup>, Fig. 7.4 A) que para el caso de los pastizales, que parecen alcanzar su equilibrio mucho antes (Fig. 7.4 B).

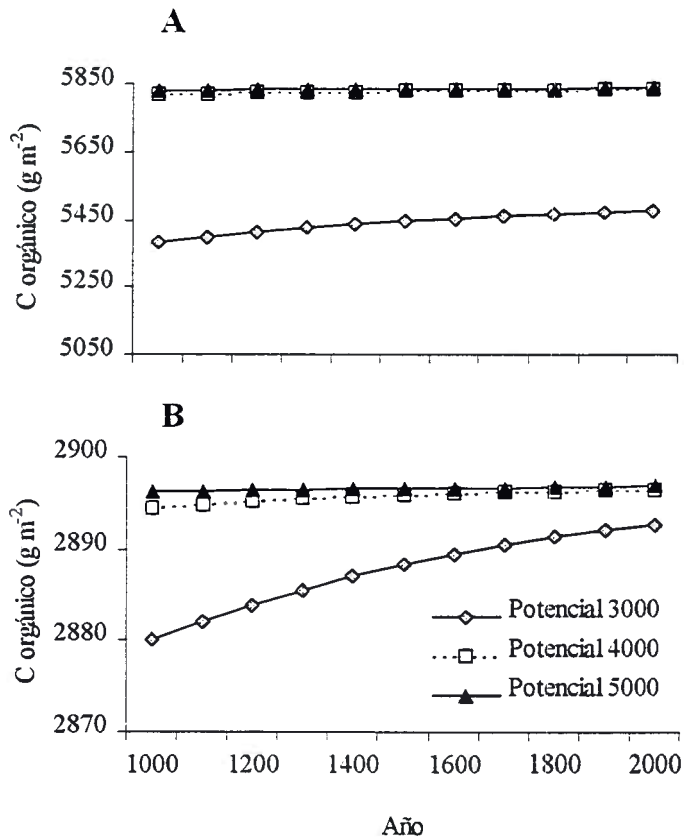


Figura 7.4: Simulación de los niveles de "equilibrio" para la cantidad de carbono total en el horizonte superficial de suelos de monte [A] y pastizal [B] utilizando el modelo CENTURY, para una situación potencial (sin pastoreo) durante 3000, 4000 o 5000 años (Sitio de simulación: *Sarmiento*. Apéndice V – 3, Tabla E). Las Figuras muestran la última etapa en la evolución del C orgánico, durante el último milenio.

La historia de uso y manejo a establecer en el programa de simulación cuando se quieren simular las condiciones 'naturales' que se pueden observar a campo, puede constituir un punto crítico en esta metodología. En primer lugar, porque el grado de ajuste entre observaciones y estimaciones dependerá de ésta; una situación de pastizal natural observada puede provenir de historias de uso muy variables, incluso del desmonte de la vegetación original, sobre la que evolucionó el nivel de C de equilibrio en ese suelo (esto puede tener consecuencias sobre la 'calidad' de la fracción orgánica, como se analiza posteriormente). En segundo lugar, por que éstas simulaciones del estado de equilibrio, o de la condición natural, pueden ser utilizadas para generar rangos de valores de referencia contra los cuales contrastar las mediciones actuales o las simulaciones de escenarios futuros, a fin de evaluar indicadores de salud del suelo (cf. Fig. 1.1 y texto relacionado; ver más adelante Sección 7.2), para lo cual deben ser confiables. Sin embargo, las

diferencias obtenidas al operar el modelo bajo las condiciones *Potencial*, *Naturales* y *Actuales* propuestas aquí (Cap. 4) han sido, en la mayoría de los casos, de escasa magnitud. La Figura 7.5 ilustra las diferencias a esperar en el nivel final de C orgánico en el horizonte superficial de un suelo de pastizal al establecer distintos planteos de uso y manejo genéricos para operar el modelo. La Figura 7.6 entrega un análisis similar para la situación del mismo suelo bajo vegetación de monte, y agrega como referencia los efectos del desmonte y de la labranza sobre el nivel de C orgánico superficial de ése suelo.

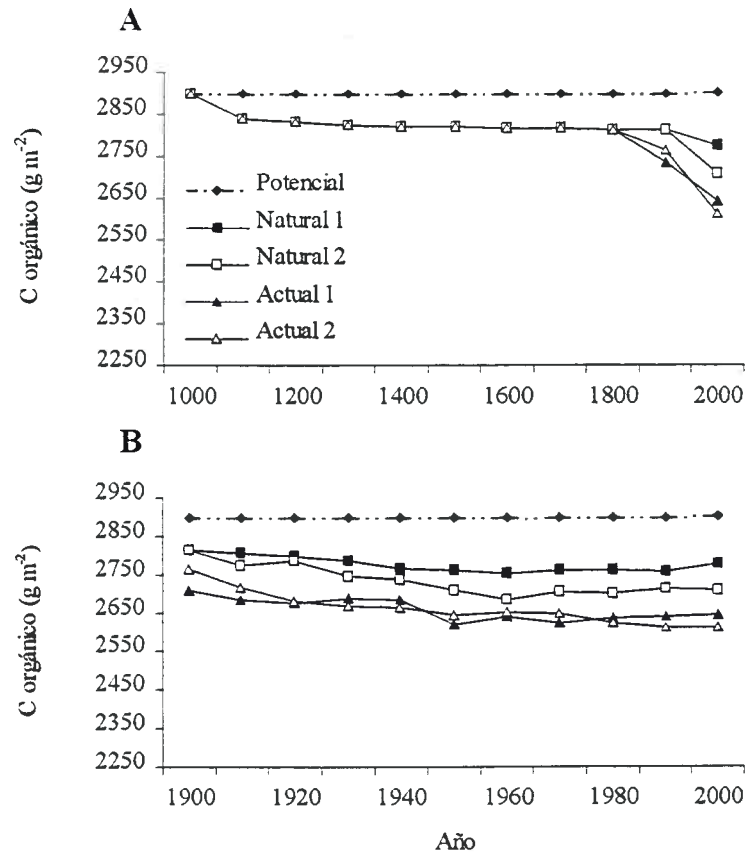


Figura 7.5: Simulación de la evolución del C orgánico en el horizonte superficial de un suelo de pastizal bajo diferentes historias de uso de la tierra utilizando CENTURY (Sitio de simulación: *Sarmiento*. Apéndice V – 3, Tabla E). Evolución durante el último milenio [A] y durante el siglo XX [B]. Las situaciones genéricas de uso de la tierra son descritas en Capítulo 4.

Las simulaciones del nivel de C orgánico final en el suelo de pastizal (de textura franco arenosa) así como de su evolución durante el último milenio (Fig. 7.5 A) o durante el siglo XX (Fig. 7.5 B), adoptando diversos escenarios de ‘uso y manejo’, presentaron escasas diferencias entre sí. Los escenarios *Actuales*, que simulan diferente grado de presión por pastoreo durante los últimos siglos de la evolución del suelo del pastizal, presentaron los valores más bajos de C orgánico. Sin embargo, a la hora de establecer rangos de valores de referencia para la construcción de indicadores de salud del suelo, tales diferencias resultan poco importantes. Esto permitiría pensar también que en la práctica, el margen para el grado de degradación que pueden presentar los pastizales naturales que podrían ser utilizados como generadores de rangos de referencia para los indicadores de salud del

suelo, es bastante amplio. La misma tendencia fue observada para las simulaciones correspondientes al suelo de monte, aunque las diferencias absolutas (en g de C por m<sup>2</sup>) fueron algo más amplias (Fig. 7.6 A y B). En ocasiones, los relictos de monte natural se encuentran destinados a la provisión de reparo climático para el ganado, con lo que las condiciones de suelo (e.g. compactación) no permitirían utilizar estas situaciones como generadoras de indicadores de referencia para calidad de suelo, a pesar de su elevado contenido de materia orgánica.

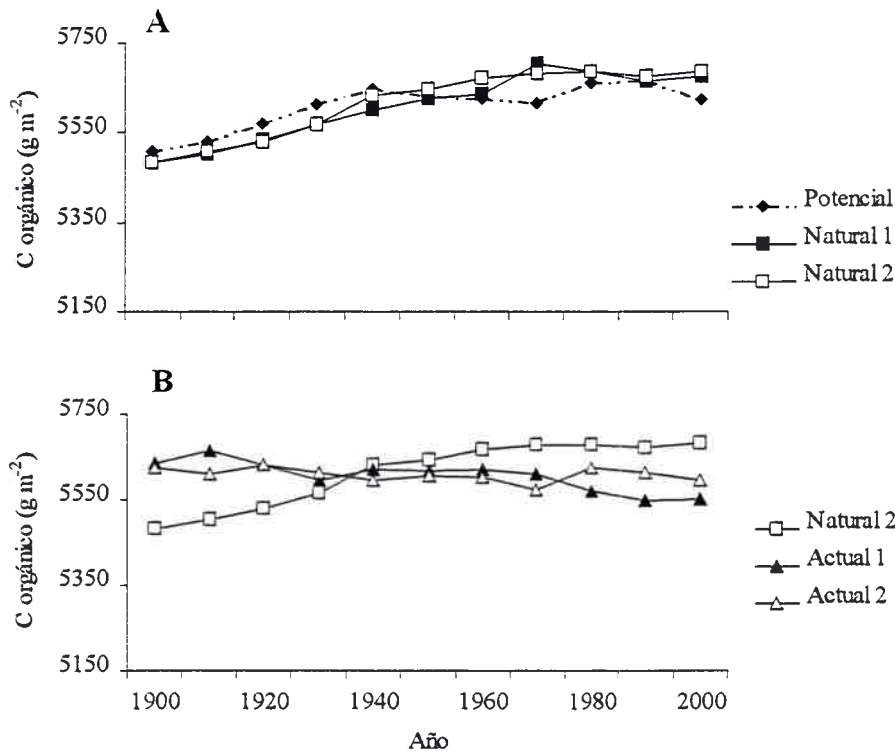


Figura 7.6: Simulación de la evolución del C orgánico en el horizonte superficial de un suelo de monte bajo diferentes historias de uso de la tierra utilizando CENTURY; su evolución durante el siglo XX (Sitio de simulación: *Sarmiento*. Apéndice V – 3, Tabla E). Las situaciones genéricas de uso de la tierra son descriptas en Capítulo 4.

En Figura 7.7 se evidencia la magnitud de los efectos del desmonte y la labranza – utilizando escenarios genéricos cuyas particularidades no son objeto de esta tesis – sobre la evolución del C orgánico. Estos resultados son presentados aquí a fin de ilustrar tales diferencias y de destacar que, tal como en el caso de los escenarios de *Desmonte* en diferentes momentos simulados en Fig. 7.7 A, los pastizales naturales de origen antrópico (terrenos desmontados) presentan niveles de C comparables a los valores de equilibrio para los pastizales originales (ca. 3000 g m<sup>-2</sup>). Si bien, los escenarios de *Labranza* deben ser analizados detenidamente, y detallando con mayor profundidad los esquemas de rotaciones asumidos, las curvas correspondientes a estas simulaciones ilustran en principio la magnitud del efecto del laboreo del suelo sobre los niveles de C en el tiempo. De acuerdo a las simulaciones generadas por CENTURY, los suelos de pastizal (Fig. 7.7 B)

sometidos a labranzas (rotaciones agrícola-ganaderas) presentan niveles finales de C orgánico menores que aquellos provenientes del desmonte (Fig. 7.7 A).

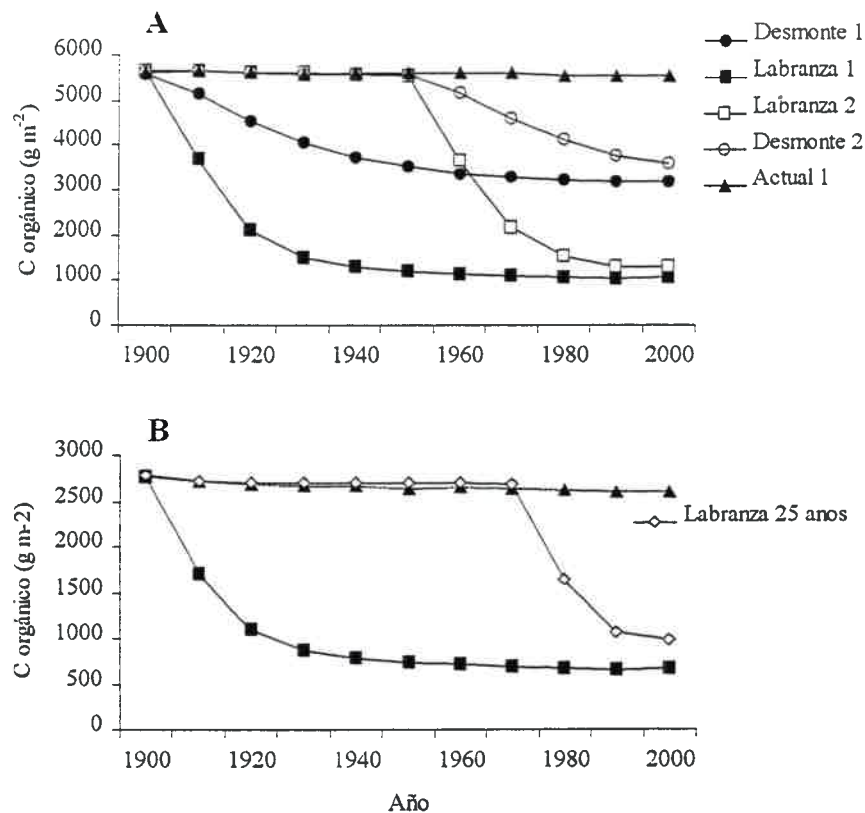


Figura 7.7: Simulación de la evolución del C orgánico en el horizonte superficial de un suelo de monte bajo diferentes historias de uso de la tierra utilizando CENTURY (Sitio de simulación: *Sarmiento*. Apéndice V – 3, Tabla E); su evolución durante el siglo XX en situaciones de pastoreo con y sin desmonte, y labranza (situaciones genéricas de uso de la tierra descritas en Capítulo 4).

### 7.1.2 Aspectos mecanísticos y comportamiento regional: simulación de procesos clave

A fin de mejorar la interpretación de los resultados de las simulaciones con CENTURY, es importante conocer la lógica que respalda a las operaciones del modelo, evitando utilizar una herramienta que revista el carácter de “caja negra”. Para ello, se han seleccionado algunos aspectos que hacen a la estructura interna del modelo para un análisis más profundo. Estos aspectos fueron seleccionados para intentar sintetizar e ilustrar la mayor cantidad de procesos mecanísticos posibles, considerando a las etapas de (i) fijación del C atmosférico, (ii) su redistribución en diferentes fracciones dentro del suelo y (iii) su liberación nuevamente hacia la atmósfera.

#### 7.1.2.1 La curva de producción de biomasa

La curva de producción de biomasa (i.e. fijación de C en biomasa) simulada por CENTURY para el pastizal natural presenta la evolución ilustrada en la Figura 7.8, donde cuatro sitios fueron seleccionados dentro de las sub-regiones de las llanuras bien y mal



drenadas (las llanuras medanosas y las sierras no fueron consideradas, a fin de acotar los gradientes ambientales) (Apéndice V – 3, Tabla A). Se asumió la misma presión de pastoreo en todos los casos. La producción del pastizal refleja en gran medida la evolución de los factores ambientales durante el ciclo primavero-estivo-otoñal aunque con ciertas diferencias de acuerdo a las condiciones de sitio. En todas las situaciones simuladas se observa un pico de producción en el mes de diciembre, aunque su magnitud varía considerablemente. Las simulaciones correspondientes a Las Selvas (Gral. Deheza) y Río Cuarto muestran los mayores niveles de producción de biomasa aérea, en ambos casos sobre suelos de textura franca (~15% arcilla). Los sitios El Espinillar (Gral. Cabrera) y Assunta (La Carlota), con texturas algo más gruesas, muestran una menor acumulación de C en la biomasa aérea del pastizal, a pesar de encontrarse bajo regímenes climáticos comparables. La importancia de la curva de producción de biomasa reside en que la misma determina la magnitud de los aportes de restos orgánicos al suelo luego de cada ciclo de crecimiento anual. La evolución de esta curva resultó así notablemente sensible a las condiciones de sitio, particularmente a la textura, como se detalla a continuación.

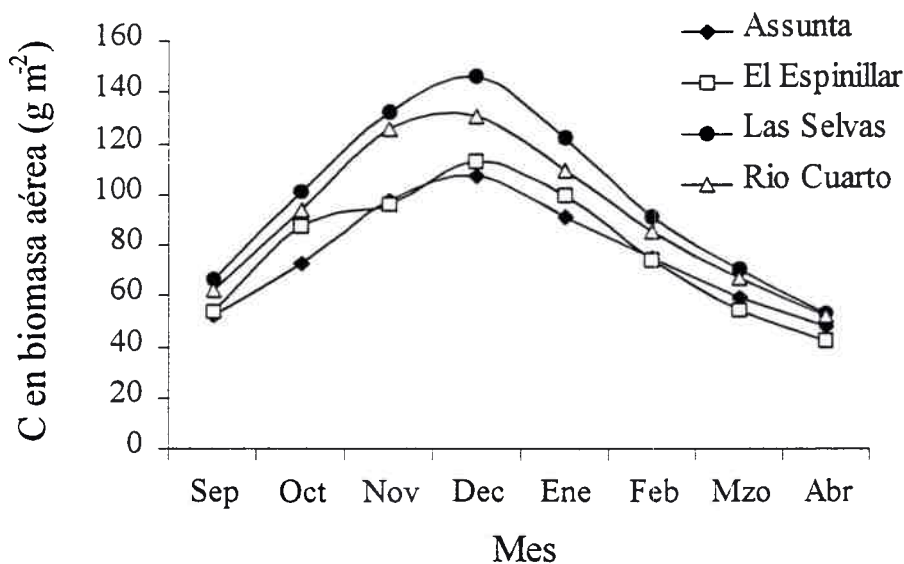


Figura 7.8: Simulación de la evolución del C alocado en la biomasa aérea del pastizal bajo pastoreo durante el período primavero-estivo-otoñal para sitios seleccionados dentro de las sub-regiones llanuras bien drenadas (sub-normales y levemente onduladas) y mal drenadas (zonales) con regímenes climáticos comparables.

Para los sitios Las Selvas (Gral. Deheza) y El Espinillar (Gral. Cabrera), es posible asimilar la producción de biomasa a la evolución de las precipitaciones y de la temperatura media de la serie climática utilizada para la simulación (Gral. Deheza, cuenca media) ya que la misma fue empleada en ambos casos (Apéndice V – 2, Fig. A). Esta comparación permite destacar las diferencias en el comportamiento simulado del pastizal provocadas por los factores no climáticos ni antrópicos, ya que el manejo del pastoreo y la historia de uso del pastizal (simulados) fueron similares. Al inicio del crecimiento anual del pastizal la producción de biomasa no difiere en forma significativa entre ambos sitios (Figura 7.8). A partir del mes de noviembre, la producción simulada para Las Selvas supera en forma notoria a la correspondiente a El Espinillar, tendencia que se mantiene

durante los meses de mayor producción (Nov – Ene). Tales diferencias, sin embargo, comienzan a declinar a medida que el pastizal es limitado en su crecimiento hacia el final del ciclo estacional. La acumulación de C por fijación fotosintética a lo largo del ciclo simulada para Las Selvas supera en 26 % a la correspondiente a El Espinillar (Figura 7.9 A). Estas diferencias pueden ser atribuidas a variaciones en la disponibilidad de agua y/o de nutrientes en el suelo inducidas por la textura y el contenido de materia orgánica para ambos sitios. En ambos casos, no existieron impedimentos físicos para la exploración radical, riesgo de anegamiento, exceso de sales ni acidez.

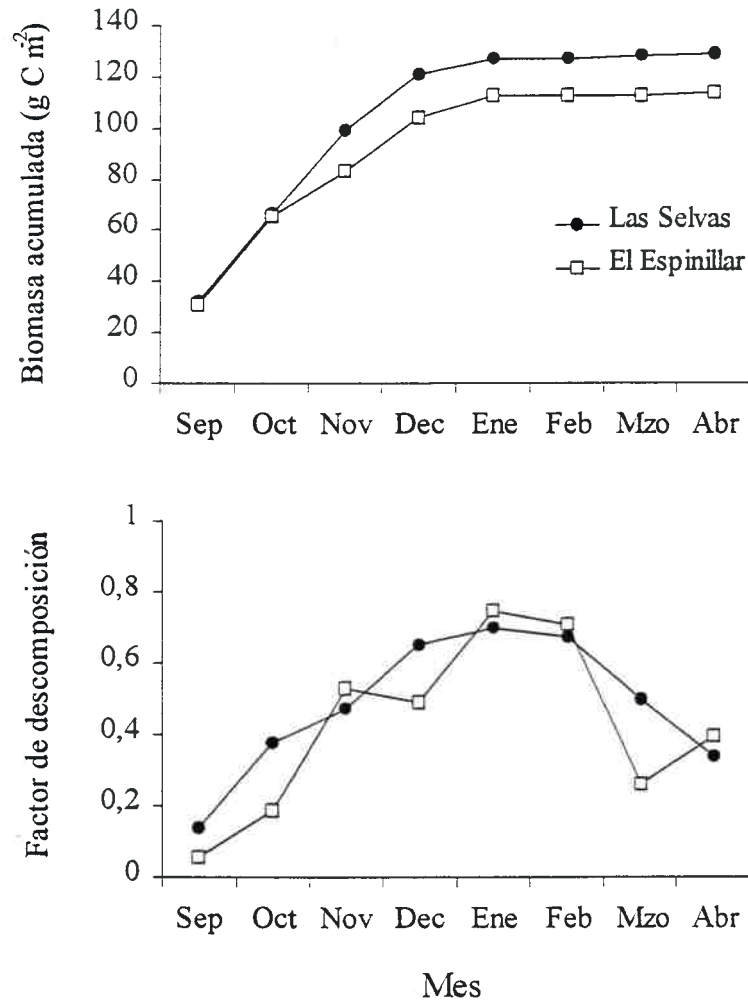


Figura 7.9: Simulación de la dinámica del C en suelos pastizales naturales bajo pastoreo. [A] C acumulado en la biomasa aérea a lo largo del ciclo de crecimiento primavero-estivo-otoñal y [B] evolución del factor de descomposición de la fracción orgánica activa calculado por el modelo, para dos sitios correspondientes a la sub-región llanuras bien drenadas con relieve sub-normal, sometidos a presiones de pastoreo similares.

En respuesta al efecto de la textura y de la materia orgánica sobre el microclima del suelo, el factor de descomposición de la fracción orgánica activa fue más variable para El Espinillar, oscilando hacia valores tan bajos como la mitad del correspondiente a Las Selvas (Figura 7.9 B) en el mes de octubre – etapa de pleno crecimiento del pastizal. Por otra parte, éstas diferencias se reflejan consecuentemente en la dinámica del N en el pastizal (Figura 7.10 A y B). La disponibilidad de N mineral a lo largo de la estación de

crecimiento fue mayor para Las selvas, conduciendo a una mayor absorción del mismo y su asimilación en la biomasa del pastizal. Mayor disponibilidad de N – dentro de ciertos rangos fisiológicos – implica una menor relación C:N, lo cual favorece a una descomposición más rápida de los residuos vegetales, afectando nuevamente al equilibrio edáfico. El N mineral en la solución del suelo puede ser absorbido por las raíces, adsorbido por la matriz del suelo, volatilizado como gas o lixiviado en profundidad con el agua de percolación. La intensidad de, y el equilibrio entre, estos procesos estará nuevamente afectada por la textura del horizonte superficial.

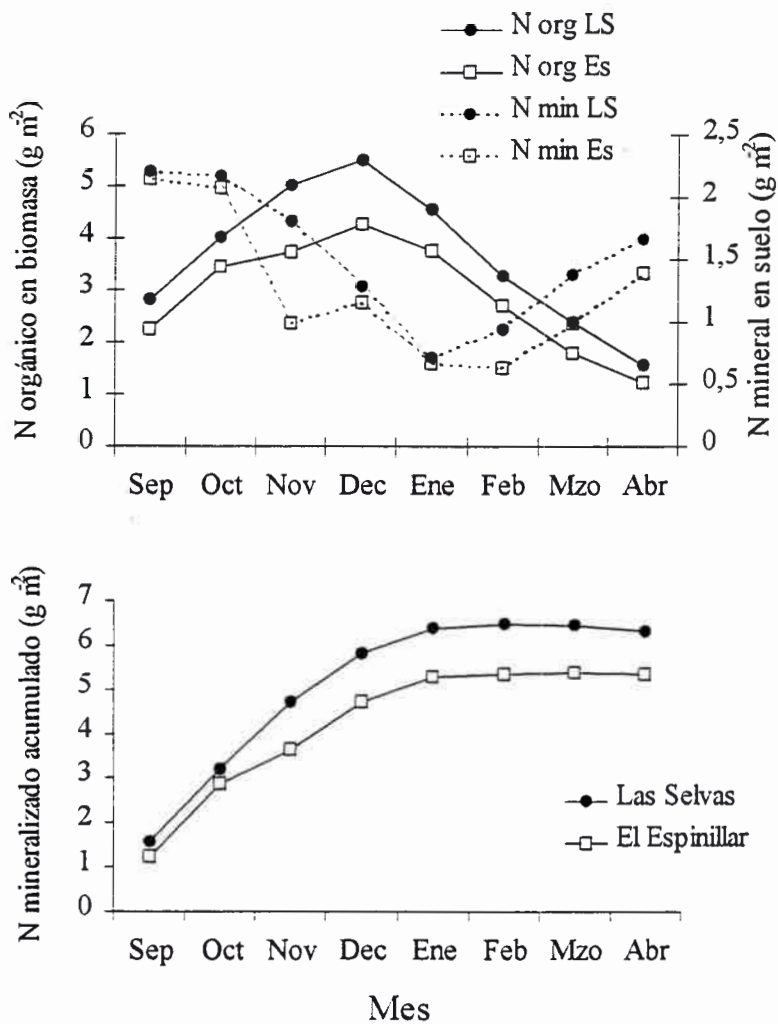


Figura 7.10: Simulación de la dinámica orgánica edáfica en suelos de pastizal bajo pastoreo, para dos sitios correspondientes a la sub-región llanuras bien drenadas con relieve sub-normal. [A] Cantidad de N orgánico contenido en la biomasa del pastizal y disponibilidad de N mineral en el horizonte superficial del suelo; [B] N mineralizado durante el ciclo de crecimiento primavero-estivo-otoñal del pastizal.

#### 7.1.2.2 Cantidad y calidad de carbono orgánico en el suelo

En el modelo CENTURY, la redistribución del C entre los diferentes compartimentos que representan a sus fracciones orgánicas (activa, estable, pasiva – cf. Sec. 2.2) es afectada por la textura del suelo y por el tipo de vegetación, cuando se simulan las condiciones de

equilibrio natural, o bien por el uso y manejo simulados. La textura afecta a las tasas de transformación en el suelo, mientras que el tipo de vegetación afecta a la cantidad y calidad de los aportes orgánicos (relación Lignina:N), los cuales pueden ser ampliamente modificados por el uso y el manejo. La Tabla 7.2 muestra la composición de la fracción orgánica edáfica simulada para un Haplustol éntico en condición cuasi-natural correspondiente a las llanuras medanosas, sector NE, bajo dos tipos de vegetación dominante durante la evolución del suelo. Las simulaciones fueron corridas bajo el esquema de uso y manejo *Natural*. La cantidad de carbono total en los horizontes superficiales resultó casi el doble para el suelo bajo monte comparado con el de pastizal, y presentó además una proporción algo mayor para la fracción estable que éste último, cuya fracción pasiva (humus) llegó al 30% del C orgánico total. Estos resultados, sin embargo, no están considerando variaciones verticales en el contenido de C orgánico edáfico, sino que el modelo asume una distribución uniforme hasta los 0,2 m de profundidad; correcciones por profundidad del epipedón podrían estrechar estas diferencias (Sec. 6.2). Debido a las diferencias en "calidad" de los restos orgánicos entre ambos tipos de vegetación, la fracción orgánica activa representó una proporción algo mayor sobre el C total en el suelo de pastizal – una diferencia interesante a la hora de calcular tasas de mineralización.

Tabla 7.2: Estimación de las fracciones orgánicas edáficas para un Haplustol éntico de las llanuras medanosas, simuladas por CENTURY para dos tipos de vegetación dominante durante la evolución del suelo (Serie climática: Mackenna 94-99). Valores entre paréntesis indican fracción porcentual.

Vegetación tipo	C orgánico (g m <sup>-2</sup> )			Total
	Activo	Estable	Pasivo	
Monte	106 (1.9)	4165 (74.4)	1327 (23.7)	5598 (100)
Pastizal	69 (2.6)	1724 (66.0)	819 (31.4)	2612 (100)

La Figura 7.11 ilustra los cambios en las fracciones orgánicas edáficas a partir de la simulación de tres escenarios de uso de las tierras durante el siglo XX, para un Hapludol típico correspondiente a la sub-región llanuras bien drenadas. Tal como fuera ilustrado con anterioridad, el C orgánico total disminuye paulatinamente (exponencial negativa, cf. Fig. 7.2 ó 7.6) respecto del nivel inicial en el caso de desmonte (a principios del siglo XX) y pastoreo; y lo hace más abruptamente en el caso en que se desmontó e incorporó las tierras a cultivos hacia mitad del siglo, llegando con un nivel de C más bajo al año 2000 (Fig. 7.11 A). Sin embargo, estos efectos adquieren diferentes magnitudes de acuerdo a qué fracción orgánica edáfica se trate. Independientemente del uso de la tierra, el impacto aumenta en la secuencia activa-estable-pasiva, como es de esperar, aunque la fracción activa (Fig. 7.11 B) sufre una disminución del 28% en el caso de desmonte-pastoreo y del 95% en el caso de desmonte-labranza, mientras que la fracción estable (Fig. 7.11 C) disminuye en 50 y 96%, y la pasiva (Fig. 7.11 D) en 3 y 10% en ambos casos, respectivamente. Así, la fracción estable aparece como la más afectada en el caso de desmonte-pastoreo.



Tabla 7.3: Cambios cuali-cuantitativos de las fracciones orgánicas edáficas bajo tres situaciones de manejo del monte natural (agrosistemas) durante el siglo XX en dos situaciones agroecológicas contrastantes.

Fracción orgánica edáfica	Carbono orgánico (g m <sup>-2</sup> )								
	Monte natural en pastoreo			Desmonte en 1900 y pastoreo			Desmonte en 1960 y labranza		
	Año	1900	2000	Prop. (%)	1900	2000	Prop. (%)	1900	2000
<i>Hapludol típico (Río IV)</i>									
Activa	140	144	2,2	139	100	2,4	139	6	0,3
Estable	4584	4535	68,9	4560	2287	54,2	4566	176	9,3
Pasiva	1898	1905	28,9	1897	1835	43,5	1897	1708	90,3
Total	6622	6584	100,0	6596	4222	100,0	6603	1891	100,0
<i>Ustipsament típico (Las Taguas)</i>									
Activa	73	69	1,7	74	70	2,5	66	3	0,3
Estable	2996	2988	74,8	2966	1849	64,8	2986	139	13,7
Pasiva	941	940	23,5	940	933	32,7	940	872	86,0
Total	4010	3997	100,0	3980	2853	100,0	3992	1014	100,0

Prop. (%): proporción de cada fracción en el C orgánico total

Tabla 7.4: Balance de C orgánico para tres situaciones de manejo durante el siglo 20 a partir de un monte natural en la localidad de Río Cuarto (Haplustol típico, ver detalles sitio Unb). Pastoreo: 30% de remoción de la biomasa herbácea sin desmonte; Desmonte: desmonte gradual desde el inicio del siglo con una remoción del 30% de la biomasa aérea herbácea; Labranza: desmonte en 1960 e inicio de las labranzas para la implantación de cultivos.

Partición del C	Carbono orgánico (g m <sup>-2</sup> )						
	Inicial	Final			Diferencia relativa (%)		
		Pastoreo	Desmonte	Labranza <sup>‡</sup>	Pastoreo	Desmonte	Labranza
<b>A) Materia orgánica edáfica</b>							
Fracción activa	139,6	144,1	100,2	6,1	3,2	-28,2	-95,6
Fracción estable	4583,8	4534,7	2286,9	176,4	-1,1	-50,1	-96,2
Fracción pasiva	1898,5	1905,0	1835,3	1708,4	0,3	-3,3	-10,0
<b>B) Microorganismos en superficie</b>	89,0	89,6	30,8	1,2	0,7	-65,4	-98,6
<b>C) Residuos vegetales</b>							
Metabólicos	99,7	118,7	104,1	1,8	19,1	4,5	-98,2
Estructurales	643,4	656,3	339,6	8,1	2,0	-47,2	-98,7
<b>D) Biomasa herbácea</b>							
Aérea	36,2	29,5	273,6	335,4	-18,6	655,7	826,5
Subsuperficial	48,7	35,4	314,0	338,5	-27,4	544,9	595,0
Muerta en pie	19,6	17,1	178,0	1,1	-12,8	807,3	-94,5
<b>E) Biomasa forestal total<sup>‡</sup></b>	10575,0	9890,0	0,0	0,0	-6,5	-100,0	-100,0
<b>F) Producción primaria anual</b>	417,0	692,2	587,6	673,9	66,0	40,9	61,6
<b>G) Componente animal (anual)</b>							
Remoción por pastoreo	-9,9	-8,1	-63,0	0,0	18,6	-534,6	n/c
Retorno por heces y orina	2,9	2,4	18,9	0,0	-16,0	556,6	n/c
<b>Carbono total (sumatoria A:G)</b>	18543,5	18106,9	6006,0	3250,8	-2,4	-67,6	-82,5
<b>(Producción primaria / C total)*100</b>	2,2	3,8	9,8	20,7			

<sup>‡</sup>La remoción de C de la biomasa forestal (signo negativo) no fue considerada en el balance de carbono total para los sistemas de desmonte y labranza a fin de no sobrestimar las pérdidas de C en estos sistemas. <sup>‡</sup>Se ignoró el componente animal de la rotación agrícola.

Estos cambios asimétricos para las diferentes fracciones orgánicas indican que la composición del carbono orgánico del suelo es alterada por el uso y manejo en las simulaciones con CENTURY. La Tabla 7.3 presenta la magnitud de los cambios y la variación de las proporciones de cada fracción orgánica para el ejemplo analizado arriba (cf. Fig. 7.11), y para un suelo de características contrastantes, correspondiente al sector SO de las llanuras medanosas. La proporción de la fracción orgánica activa (ca. 2%) tiende a aumentar en términos relativos para la situación de desmonte-pastoreo y a disminuir (casi desaparecer) para el caso de desmonte-labranza en ambos suelos, de acuerdo a las simulaciones generadas por CENTURY. En el primer caso, la fracción estable tiende también a disminuir en términos relativos, mientras que en el último la fracción pasiva representa alrededor del 90% del C orgánico final, en ambos suelos.

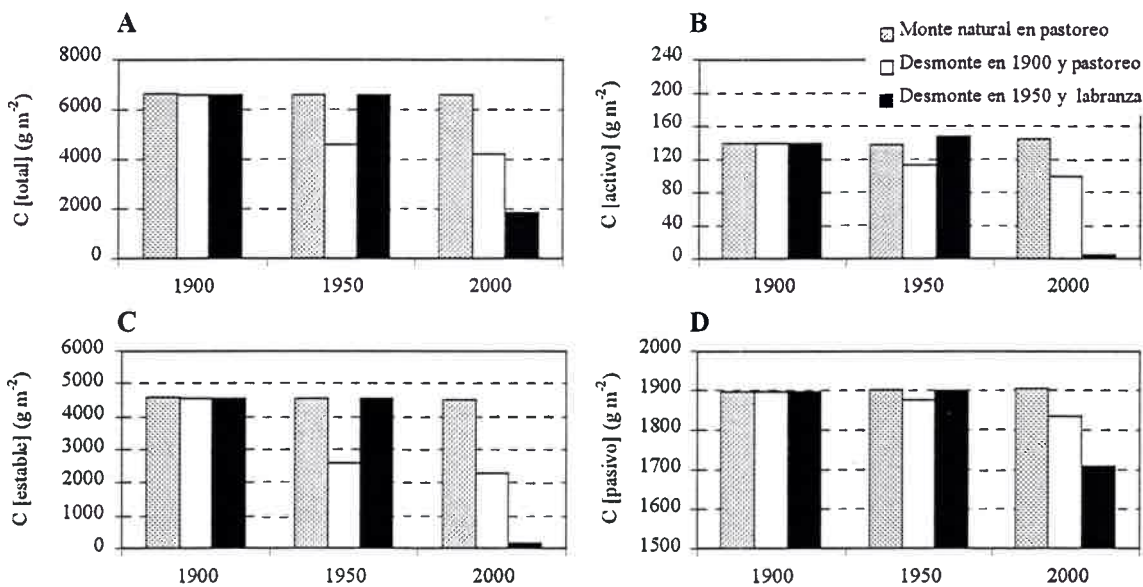


Figura 7.11: Simulación de los cambios en las “fracciones” orgánicas edáficas simuladas por CENTURY para un Hapludol típico de las llanuras bien drenadas evolucionado bajo vegetación de monte y sometido a tres esquemas de uso de la tierra durante el siglo XX. [A] C orgánico total; [B] C orgánico activo; [C] C orgánico estable y [D] C orgánico pasivo (ver definición de fracciones en el modelo – Capítulo 2).

En la sección precedente se indicó que el origen y la historia de uso de un pastizal natural actual (que puede ser utilizado para generar indicadores de calidad de suelo de referencia) pueden ser variables, y de esta forma afectar a la fracción orgánica edáfica y a su composición. La proporcionalidad entre las fracciones activa, estable y pasiva simuladas para el mismo Hapludol típico (Río Cuarto) analizado en Fig. 7.11, en condiciones cuasi-naturales y bajo vegetación de pastizal (2,9, 65,3 y 31,8%, respectivamente), difieren de aquellas simuladas para un pastizal proveniente del desmonte 100 años atrás (Tabla 7.3). En este caso, el suelo de pastizal presentó un nivel de C superficial de  $2500 \text{ g m}^{-2}$ , menor al del pastizal ‘antrópico’ (ca.  $4200 \text{ g m}^{-2}$ ). Nuevamente, estas diferencias pueden estrecharse al considerar la profundidad de epipedón en cada caso, aunque es destacable la variación tanto en ‘calidad’ como en cantidad de la fracción orgánica simulada por

CENTURY para éste suelo bajo dos orígenes y/o historias de uso bien diferentes. Nótese que, para el Haplustol éntico analizado en Figs. 7.5, 7.6 y 7.7 las diferencias en el nivel de C orgánico fueron de 2800 vs. 3200 g m<sup>-2</sup> para el pastizal original y el antrópico, respectivamente. Evidentemente, éstas diferencias fueron más notables para el suelo de textura más fina. La proporcionalidad entre las fracciones activa: estable: pasiva para el Haplustol éntico varió de 2,6: 66,0: 31,4 a 2,2: 57,7: 40,1 de acuerdo a la historia de uso. Para ambos suelos, la fracción estable fue menor en el suelo del pastizal originado por desmonte, mientras que la fracción pasiva fue mayor.

### *7.1.2.3 Balances de carbono de largo plazo y dinámica del CO<sub>2</sub>*

Los balances de carbono de largo plazo constituyen una herramienta de monitoreo de la sustentabilidad del agroecosistema de gran utilidad, por cuanto permiten estudiar los cambios operados en su estabilidad, en su eficiencia y en su diversidad estructural-funcional (i.e. compartimentos de C y sus interacciones). Diferentes planteos de uso y manejo del ecosistema original implican simplificaciones en mayor o menor grado del mismo. En tal sentido, y para los ejemplos regionales analizados hasta aquí, la simplificación del agroecosistema aumenta en la secuencia: Monte en pastoreo - Desmonte y pastoreo - Desmonte y labranza. Desde luego, es posible diferenciar importantes matices dentro de cada una de estas categorías, que sin duda afectan a la sustentabilidad de cada tipo de sistema. Sin embargo, éstos ejemplos (teóricos) son utilizados aquí para ilustrar el efecto de tales modificaciones en la estructura del sistema sobre los flujos de C hacia, desde y entre los diferentes compartimentos en que éste se distribuye dentro del sistema de acuerdo al modelo CENTURY. Los resultados de las simulaciones y del procesamiento posterior de las mismas para tres escenarios de uso y manejo sobre un Hapludol típico evolucionado bajo suelo de monte son presentados en Tabla 7.4. La columna "Inicial" presenta los valores simulados para la condición de equilibrio natural a principios del siglo XX.

La simplificación del agroecosistema se evidencia en principio en la menor participación relativa de ciertos compartimentos de C en el total del sistema, lo que aparece también ligado a fuertes reducciones de índole cuantitativa (Tabla 7.4). Así, al comparar las cantidades totales de C simuladas en cada uno de estos sistemas con el valor original (año 1900) se observa que luego de cien años las mismas se han reducido en un 68 y un 83 %, respectivamente, para los sistemas genéricos que representan ganadería y agricultura con desmonte; en el sistema en que el estrato arbóreo fue mantenido la cantidad total de C se mantuvo casi invariable (-2,4%). La cantidad total de C en la materia orgánica del suelo se reduce en un 36 y un 71%, respectivamente, para ambos sistemas con desmonte. La productividad primaria fue incrementada en todos los sistemas respecto del original, aunque al expresarla con relación al C total se observa un valor mucho más elevado para el sistema agrícola (i.e. 20,7% - una quinta parte del C del total). Para este sistema se observan importantes pérdidas en casi todos los compartimentos de C excepto, desde luego, para la biomasa herbácea. La relación entre el C correspondiente a la productividad primaria y el C orgánico edáfico fue del orden del 0,11, del 0,14 y del 0,36 para los tres sistemas teóricos simulados, respectivamente.



En ausencia de procesos erosivos de magnitud, es posible asumir que la totalidad de las pérdidas de C desde el compartimento correspondiente a la fracción orgánica edáfica representan una liberación neta de CO<sub>2</sub>. Asimismo, es posible estimar las cantidades potenciales de C que cada sistema puede fijar a partir del CO<sub>2</sub> atmosférico. Este mecanismo fue ilustrado con las curvas de producción del pastizal para diferentes condiciones de sitio (Sec. 7.1.2.1). En Tabla 7.4, la productividad primaria neta simulada para el hipotético sistema bajo rotación agrícola (673 g C m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>) corresponde a su tasa de fijación anual de C; asumiendo un índice de cosecha (IC) promedio de 0,45 para la biomasa aérea (nuevas variedades de cultivos de grano alcanzan valores del 0,5, aunque el IC considerado aquí debe incluir también a las malezas y a los cultivos no cosechados o pérdidas) para el cálculo de la remoción anual de C, la fijación efectiva desciende a 523 g C m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>, lo que equivale a una tasa de fijación del CO<sub>2</sub> atmosférico neta (fotosíntesis – respiración) de 19,2 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. La eficiencia de fijación de este CO<sub>2</sub> en C orgánico edáfico dependerá aún de las características cualitativas de los residuos vegetales aportados al suelo, de condiciones ambientales que favorezcan la actividad microbiana, de la capacidad del suelo para proteger formas activas del C, etc.

### 7.1.3 Análisis de sensibilidad

La cantidad potencial de carbono en el suelo simulada por CENTURY varió de acuerdo a las condiciones de sitio tanto para las situaciones provenientes de pastizales (Tabla 7.5, en página 148) como de montes (Apéndice IX, Tabla A) naturales. Fue mayor en las llanuras mal drenadas y bien drenadas y menor en las medianosas, en tanto que las diferencias dentro de cada sub-región estuvieron asociadas a la clase textural y al régimen hidrotérmico. Al simular diferentes historias “tipo” de uso y manejo de las tierras para el siglo XX (Capítulo 4), se observaron diferentes grados de disminución del valor potencial. Notoriamente, la disminución resultó mucho más acentuada en los casos en que se simulaban rotaciones agrícolas. Por otra parte, la magnitud de las pérdidas varió también de acuerdo a las características de sitio. Así, el efecto e.g. del planteo de uso y manejo *Labranza 2* sobre el nivel de C luego de 100 años fue el mayor en términos relativos para el sitio *Mkp* en Tabla 7.5. Para las situaciones provenientes de monte natural (Apéndice IX, Tabla A) el efecto de la presión de pastoreo fue casi imperceptible cuando el estrato leñoso se mantuvo en el sistema (*Pastoreo*); el nivel potencial de C disminuyó entre un 25 y un 40% con el desmonte y hasta un 80% con la labranza. La magnitud de estas pérdidas fue algo mayor para las llanuras medianosas.

La sensibilidad del modelo frente a cambios en las condiciones de sitio fue claramente manifestada por la variación en los valores potenciales de C en el suelo entre sub-regiones y entre sitios (Tabla 7.5 y Apéndice IX, Tabla A), cuyo rango de oscilación fue de 1740 y de 4980 g m<sup>-2</sup>, respectivamente, para situaciones provenientes de pastizales y montes naturales. La sensibilidad a las condiciones impuestas por el uso y manejo de las tierras para el rango de situaciones tipo simuladas aquí fue algo menor. En sentido estricto, la sensibilidad a los cambios en el patrón de uso (i.e. pastoreo, desmonte, labranza) fue mucho mayor que a cambios en el manejo (e.g. intensidad de pastoreo). A fin de ilustrar la

magnitud de la respuesta integral del modelo a las variables de manejo, la sensibilidad parcial relativa (*Spr*) fue calculada para las situaciones provenientes de pastizales (Tabla 7.6) y de montes (Apéndice IX, Tabla B) naturales. Para todos los sitios provenientes de pastizal natural, la variación en el nivel de C edáfico fue mayor al aumentar la intensidad de pastoreo en el rango desde 0,6 a 0,8 unidades ganaderas por hectárea (promedio anual), y menor para el rango 0,8 – 1,2. La *Spr* frente a la cantidad de años en que se simulan rotaciones agrícolas continuas fue mayor para los primeros 30 años que entre los 30 y los 100, lo cual deriva del patrón exponencial negativo para la evolución simulada del C del suelo con el tiempo (cf. Fig. 7.7). Para los sitios provenientes de monte natural, la *Spr* a la intensidad de pastoreo fue casi imperceptible, aunque resultó bastante elevada para los primeros 50 años desde el desmonte, y mucho mayor que para los sitios de pastizal durante los primeros 30 años de rotación agrícola.

Tabla 7.6: Sensibilidad parcial relativa del modelo para el valor de C del suelo total\*\* simulado frente a variaciones en variables de manejo del agrosistema. Resultados promedio de simulaciones durante 100 años en sitios provenientes de vegetación natural de tipo pastizal.

Sub-región	Sitio *	Intensidad de Pastoreo		Tiempo bajo labranza	
		0,6 a 0,8 UG	0,8 a 1,2 UG	0 a 30 años	30 a 100 años
Llanuras mal drenadas	<i>As1</i>	0,07	0,02	1,32	0,13
	<i>As3</i>	0,08	0,07	1,25	0,14
Llanuras bien drenadas	<i>Lp</i>	0,12	0,06	1,87	0,14
	<i>Lv</i>	0,10	0,06	1,47	0,14
Llanuras medanosas	<i>Bgp</i>	0,04	0,02	1,60	0,16
	<i>Lvp</i>	0,07	0,02	1,69	0,16
	<i>LTP</i>	0,09	0,05	1,54	0,16

\*Código de sitio correspondiente a los presentados en Apéndice V – 3.

\*\* Suma de las fracciones activa, estable y pasiva

Los cambios operados en el nivel potencial del C del suelo frente a diferentes planteos de uso y manejo son el resultado de cambios de diferente magnitud en los distintos componentes (compartimentos) del subsistema suelo-residuos orgánicos (SSRO) (Tabla 7.7 y Apéndice IX, Tabla C). En los sitios provenientes de pastizales, el mayor efecto del pastoreo fue observado para la biomasa microbiana superficial, la cantidad de residuos orgánicos sobre y dentro del perfil (principalmente raíces) y para la 'calidad' de los residuos en superficie, representada por su fracción metabólica (i.e. fácilmente descomponible). El efecto de las labranzas fue drástico en el caso de las fracciones lábiles del C y aún en la fracción orgánica estable, así como en la cantidad de residuos aportados al suelo. Para los dos sitios provenientes de monte natural, y con texturas comparables a los anteriores, el pastoreo sólo afectó a la fracción metabólica de los aportes superficiales (cambios cualitativos) mientras que el desmonte y las labranzas afectaron nuevamente a las fracciones activas y estables en el suelo.

Tabla 7.5: Valor potencial para el C total simulado por CENTURY para diferentes sitios provenientes de vegetación natural de tipo pastizal, y variación porcentual en el nivel de C del suelo total simulado bajo diferentes situaciones de uso histórico de la tierra durante el siglo XX.

Sub-región	Sitio*	C suelo** potencial (g m <sup>-2</sup> )	Variación relativa del C total (%)				
			Natural	Pastoreo 1	Pastoreo 2	Labranza 1	Labranza 2
Llanuras mal drenadas	<i>As1</i>	3014	-3,4	-6,6	-7,5	-70,8	-58,4
	<i>As3</i>	3675	-1,3	-4,4	-7,8	-69,8	-56,7
Llanuras bien drenadas	<i>Lp</i>	2830	-4,1	-9,4	-12,0	-77,3	-66,6
	<i>Lv</i>	3574	-3,5	-8,3	-11,2	-74,1	-60,9
Llanuras medanosas	<i>Mkp</i>	2902	-4,3	-9,3	-10,2	-77,1	-100,0
	<i>Bgp</i>	2100	-1,3	-3,0	-4,2	-76,6	-62,0
	<i>Lvp</i>	1936	-1,5	-4,6	-5,5	-76,8	-63,4
	<i>Ltp</i>	2064	-4,1	-8,4	-10,6	-76,1	-62,2

\*Código de sitio correspondiente a los presentados en Apéndice V – 3.

\*\*Suma de las fracciones activa, estable y pasiva

Tabla 7.7: Valor potencial simulado por CENTURY para la cantidad de C total (g m<sup>-2</sup>) y su distribución en los diferentes compartimentos del subsistema suelo-residuos orgánicos para tres sitios provenientes de vegetación tipo pastizal; variación relativa (%) en los principales componentes por efecto de la historia de uso y manejo de la tierra durante el siglo XX.

Sub-región/ Uso histórico de la tierra	C total en el subsistema	C en el suelo			Biomasa microbiana superficial	Residuos orgánicos		Fracción metabólica residual*
		Fr. activa	Fr. estable	Fr. pasiva		Superficial	Sub-superf.	
<b>Llanuras mal drenadas (AsI)</b>								
Potencial (g m <sup>-2</sup> )	3353	71	1809	1135	32	172	198	35
Natural	-3,1	-1,5	-3,7	-2,9	-6,9	-4,3	-11,3	-16,9
Pastoreo 1	-5,3	2,4	-9,0	-3,3	21,3	3,3	21,9	33,7
Pastoreo 2	-6,5	-6,9	-10,3	-3,1	-15,7	-6,1	14,2	34,9
Labranza 1	-73,6	-98,6	-98,7	-24,6	-99,9	-99,9	-98,5	-98,4
Labranza 2	-62,3	-93,4	-88,8	-7,7	-99,4	-98,9	-95,6	-95,8
<b>Llanuras bien drenadas (LVp)</b>								
Potencial (g m <sup>-2</sup> )	3952	98	2271	1205	42	215	252	65
Natural	-3,8	-6,5	-3,8	-2,6	-24,5	-14,9	-10,7	-18,0
Pastoreo 1	-8,5	-2,9	-11,0	-3,7	-23,3	-12,3	-25,6	-36,0
Pastoreo 2	-11,7	-14,9	-14,8	-4,1	-48,9	-28,5	-30,0	-50,9
Labranza 1	-76,4	-97,9	-98,0	-27,1	-99,8	-99,7	-98,1	-98,6
Labranza 2	-64,2	-91,1	-87,4	-8,5	-99,4	-98,7	-94,3	-95,7
<b>Llanuras medianosas** (LTP)</b>								
Potencial (g m <sup>-2</sup> )	2426	60	1413	592	39	137	285	43
Natural	-4,8	-3,7	-4,5	-3,0	-19,7	-26,8	-14,7	-39,2
Pastoreo 1	-10,5	-18,5	-10,0	-3,3	-38,2	-29,5	-25,3	-35,6
Pastoreo 2	-11,5	-12,6	-13,4	-3,6	-34,9	-30,5	-22,4	-37,3
Labranza 1	-79,5	-98,8	-98,8	-19,6	-99,9	-99,8	-98,6	-99,3
Labranza 2	-67,3	-92,6	-84,2	-6,5	-99,6	-99,1	-96,3	-97,6

\*Comprende sólo a la fracción de residuos en superficie; \*\*Sector sudoeste



Más allá de las diferencias en el valor absoluto de C en cada componente, la variación frente a los planteos simulados tendió a ser similar para los tres sitios presentados en Tabla 7.7. Los cambios provocados por el pastoreo sobre la fracción edáfica activa y sobre los residuos aportados, sin embargo, fueron mayores para el sitio *LTp* (llanuras medianosas, sector sudoeste). Nótese que, por efecto de un mayor volumen de deyecciones, la fracción activa tiende a aumentar al aumentar la carga animal sobre el suelo arenoso del sitio *LTp* (*Pastoreo 1* vs. *Pastoreo 2*). El efecto de la labranza sobre la fracción orgánica pasiva o inerte varió entre 20 – 30% para los tres sitios cuando la misma comenzó a principios del siglo XX (*Labranza 1*).

Tabla 7.8: Sensibilidad parcial relativa del modelo para los principales componentes del C en el sistema suelo-residuos orgánicos. Resultados promedio de simulaciones durante 100 años en tres sitios provenientes de vegetación natural de tipo pastizal.

Sub-región (Sitio*)	Partición del C total**	Intensidad de Pastoreo		Tiempo bajo labranza	
		0,6 a 0,8 UG	0,8 a 1,2 UG	0 a 30 años	30 a 100 años
Llanuras mal drenadas ( <i>As1</i> )	SSRO	0,05	-0,03	-1,57	-0,13
	Fr. activa	-0,08	-0,18	-13,89	-0,34
	Fr. estable	0,12	-0,03	-7,60	-0,38
	Fr. pasiva	0,01	0,00	-0,05	-0,08
	BMS	-0,47	-0,61	-154,73	-0,38
	ROS	-0,15	-0,18	-86,78	-0,37
	ROP	-0,54	-0,13	-18,94	-0,28
	FMR	-0,76	0,02	-18,71	-0,27
Llanuras bien drenadas ( <i>LVp</i> )	SSRO	0,10	-0,07	-1,68	-0,15
	Fr. activa	-0,07	-0,25	-9,49	-0,33
	Fr. estable	0,16	-0,09	-6,63	-0,36
	Fr. pasiva	0,02	-0,01	-0,06	-0,09
	BMS	-0,03	-0,67	-121,35	-0,32
	ROS	-0,06	-0,37	-64,85	-0,32
	ROP	0,40	-0,12	-14,63	-0,29
	FMR	0,56	-0,47	-17,99	-0,29
Llanuras*** medianosas ( <i>LTp</i> )	SSRO	0,13	-0,02	-1,92	-0,16
	Fr. activa	0,36	0,14	-12,09	-0,36
	Fr. estable	0,12	-0,07	-5,06	-0,40
	Fr. pasiva	0,01	-0,01	-0,04	-0,06
	BMS	0,60	0,11	-227,13	-0,30
	ROS	0,08	-0,03	-81,26	-0,31
	ROP	0,28	0,08	-21,83	-0,27
	FMR	-0,11	-0,05	-24,75	-0,30

\*Código de sitio correspondiente a los presentados en Apéndice V – 3.

\*\*Suma del C orgánico edáfico (fr. Activa, estable y pasiva) más el correspondiente a residuos orgánicos; SSRO: subsistema suelo-residuos orgánicos; BMS: biomasa microbiana superficial; ROS: residuos orgánicos en superficie; ROP: residuos orgánicos en el perfil; FMR: fracción metabólica en los residuos (superficiales).

\*\*\*Sector sudoeste

Estos patrones de variación en los diferentes componentes del SSRO fueron confirmados al calcular su *Spr* frente a cambios en condiciones de manejo, que aparecen en Tabla 7.8 y en Apéndice IX, Tabla D, donde se han colocado signos negativos indicando el sentido de variación. Para los sitios provenientes de pastizal natural *Asl* y *LVp*, la fracción edáfica activa fue menos sensible al efecto de la carga animal entre 0,6 y 0,8 UG que para el rango 0,8-1,2, aunque no así para *LTP*, donde se produjo un aumento para dicha fracción en ambos casos, y que fue mayor en el rango 0,6-0,8. En los tres sitios la fracción estable aumentó entre 0,6 y 0,8, mientras que la fracción pasiva fue poco afectada por el planteo pastoril.

La *Spr* de las fracciones lábiles y de los aportes orgánicos al suelo frente a la variable número de años en rotación agrícola fue muy elevada durante los primeros 30 años, particularmente en el sitio *LTP* (Tabla 7.8). Las mismas resultaron mucho mayores aún para los sitios provenientes de monte (Apéndice IX, Tabla D – datos no mostrados). La *Spr* de los componentes del SSRO frente al efecto de las labranzas para el rango 30 a 70 años es la de mayor interés práctico, por cuanto la mayoría de los suelos de la región han sido labrados por períodos de tiempo comprendidos en éste rango o aún mayores.

Por último, se consideró la sensibilidad del modelo frente a cambios en las variables climáticas (Tabla 7.9), a fin de ilustrar la magnitud de las diferencias a esperar en el resultado de las simulaciones al utilizar diferentes series climáticas registradas dentro de la región. Este ejemplo fue realizado utilizando para las simulaciones datos correspondientes a un sitio hipotético cuya ocurrencia en la región resulta plausible (Capítulo 4). Las series de datos V. Mercedes 61-70 y V. Mackenna 94-99 difieren en el monto de la precipitación anual pero no así en la amplitud térmica media, mientras que V. Mackenna 94-99 y Laboulaye 61-80 presentan un promedio de lluvias similar pero diferente régimen térmico.

Tabla 7.9: Niveles simulados de C en el suelo para un sitio hipotético (Sitio B) en condición potencial y bajo dos historias de uso y manejo durante el siglo XX, utilizando en las simulaciones tres series climáticas diferentes.

Serie climática	Precipitación anual (mm)	Amplitud térmica (°C)	C del suelo (g m <sup>-2</sup> )		
			Potencial	Pastoreo I	Labranza I
Villa Mercedes 1961-70	539,7	16,8	2100	2040	490
V. Mackenna 1994-99	815,3	17,0	2900	2630	660
Laboulaye 1961-80	802,0	14,3	3000	2820	880

Más allá de la representatividad de estas series climáticas para los sitios en cuestión, las diferencias señaladas se tradujeron en distintos niveles potenciales de C en el suelo, que estuvieron fundamentalmente afectados por el régimen pluviométrico. La misma tendencia fue observada al simular el planteo de uso y manejo *Pastoreo I*. Sin embargo, la diferencia en el nivel final de C en el suelo se acentuó entre las simulaciones realizadas con las series V. Mackenna 94-99 y Laboulaye 61-80 al simular el planteo *Labranza I*, lo

que indicaría una mayor sensibilidad de esta variable al régimen térmico en los suelos labrados, que no fue observada en los casos anteriores.

No obstante, el efecto de las variables climáticas no se manifiesta sólo a través de las medias anuales sino que las desviaciones, así como la variabilidad intra-anual y la superposición de condiciones hídricas y térmicas conducentes o no para los procesos de la dinámica orgánica en el suelo (ambos determinan la temperatura edáfica conjuntamente) resultan sumamente determinantes, y no han sido considerados en forma explícita.

## 7.2 Aplicando CENTURY para el análisis de escenarios futuros

Un ejemplo de aplicación del modelo para el estudio de cambios en el uso de la tierra y su impacto sobre la sustentabilidad del agroecosistema es la simulación de rotaciones agrícolas de largo plazo. En un estudio de caso regional (Tittonell *et al.*, 2004) se consideró al incremento de la agrobiodiversidad espacio-temporal como una alternativa al uso actual de la tierra, evaluando su efecto sobre el contenido de materia orgánica del suelo mediante simulaciones de largo plazo (i.e. 50 años) para diferentes sitios dentro de la región. Tomando como ejemplo a dos sitios de simulación utilizados anteriormente en éste capítulo, correspondientes a las llanuras bien drenadas y medanosas (Las Selvas y Sarmiento, respectivamente), se simularon diferentes escenarios de uso de la tierra (histórico, actual y futuro). El análisis fue operado de la siguiente forma:

- 1- Simulación de largo plazo (más de 3000 años) para el nivel de carbono orgánico de equilibrio, en condiciones naturales; éste valor fue considerado como punto de partida para la simulación de uso de la tierra.
- 2- Reconstrucción de la historia de uso de la tierra más representativa para cada sitio y su simulación con el modelo para el período comprendido entre la colonización agrícola y la actualidad; éste valor fue contrastado con mediciones actuales y utilizado como punto de partida para la simulación de escenarios futuros.
- 3- Definición de escenarios de uso de la tierra: esquemas de rotación “actual” y “mejorado” (aumentando el número de cultivos involucrados, incorporando pasturas permanentes en la rotación y ajustando la carga animal); un tercer escenario, “abandono”, representó el caso en que las tierras dejarían de ser utilizadas, siendo reocupadas por la vegetación natural.
- 4- Simulación de tales escenarios para los próximos 50 años y análisis de los resultados, derivando otros indicadores de calidad del suelo mediante el uso de modelos empíricos ajustados regionalmente.

La Figura 7.12 ilustra los resultados de tales simulaciones. Las condiciones de sitio comparadas y las rotaciones simuladas pueden consultarse en Apéndice X – Tablas A y B. Estos resultados y su implicancia en términos prácticos han sido discutidos con mayor profundidad en la fuente citada anteriormente; su análisis escapa a los objetivos de esta tesis, aunque aplicaciones similares son estudiadas en un trabajo complementario (De Grazia, inédito). En principio, simulaciones de este tipo permiten inferir (i) la fragilidad o susceptibilidad de los suelos frente al uso y manejo convencionales, (ii) su capacidad de recuperación frente a diferentes esquemas de uso y manejo alternativos y (iii) su potencial

de recuperación (y/o resiliencia) en condiciones naturales. Este último punto resulta de gran interés: de acuerdo a las simulaciones realizadas con CENTURY, los niveles de C originales en los suelos de la región (i.e. de equilibrio), no son alcanzados ni aún al someter a las tierras degradadas a descansos de 50 años.

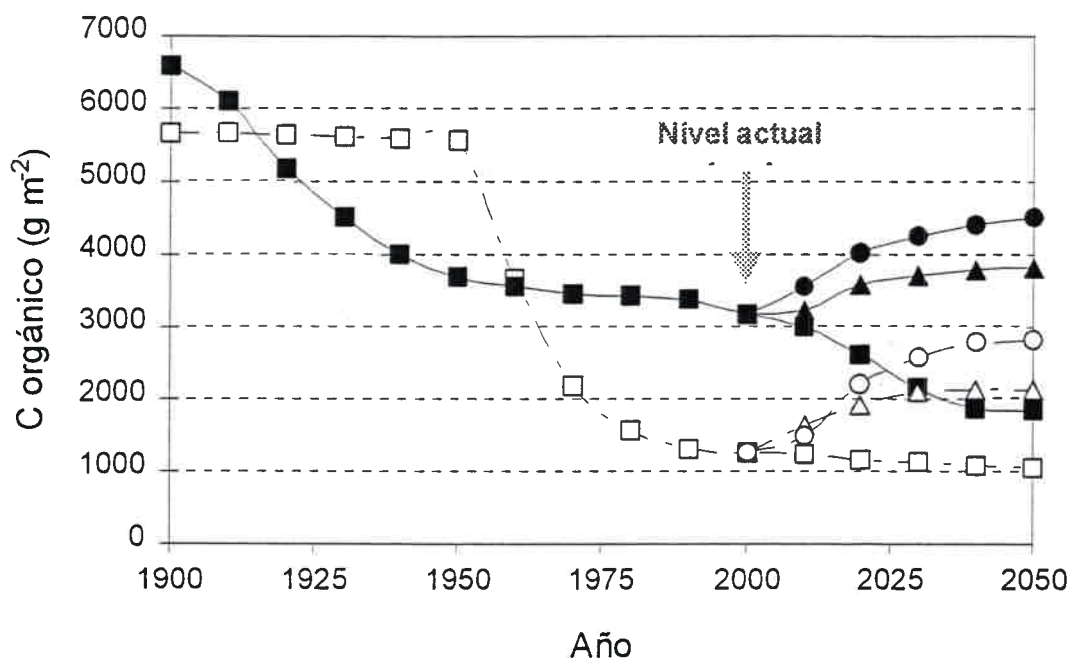


Figura 7.12: Simulación de la cantidad de carbono orgánico en el horizonte superficial (0 – 20 cm) de los suelos de Las Selvas (símbolos negros) y Sarmiento (símbolos blancos). Los símbolos cuadrados indican la evolución de C orgánico durante el siglo XX bajo las situaciones de uso y manejo histórico en cada sitio, y su posible evolución durante los próximos 50 años si las condiciones se mantienen invariables. Los símbolos redondos indican la posible evolución del C orgánico si las tierras son abandonadas. Los símbolos triangulares indican la evolución del C orgánico bajo esquemas de rotación “mejorados” (ver texto principal).

### 7.3 Observaciones finales

Esta forma de estudiar la “sensibilidad” del modelo a las condiciones regionales difiere de la que se sigue durante las etapas de desarrollo y calibración formal de un modelo de simulación (e.g. Leffelaar, 1993). Los análisis planteados en éste capítulo permitieron evaluar a esta herramienta de monitoreo para su posterior aplicación en el estudio de sistemas de uso y manejo de las tierras, destacando los mecanismos más sensibles y conceptualmente más importantes dentro de la estructura del modelo. La sensibilidad parcial relativa (*Spr*), normalmente utilizada para estudiar variaciones unitarias artificialmente introducidas, fue adoptada aquí para el análisis de variaciones complejas de uno o más factores, reflejando más fielmente lo que ocurre en condiciones reales. Así, en el caso del clima, no se trató de evaluar las *Spr* de diferentes variables de respuesta frente a cambios unitarios en e.g. el régimen pluviométrico (un paso metodológico de rutina en la calibración inicial del modelo), sino de ponderar el efecto de utilizar una u otra serie



climática en el planteo de las simulaciones. Frecuentemente, la ausencia de datos fehacientes o de series completas implica la necesidad de extrapolaciones de datos climáticos; de allí la importancia de conocer la sensibilidad del modelo en este punto.

El grado de ajuste entre los valores observados y aquellos simulados con CENTURY fue aceptablemente elevado para las condiciones zonales, al igual que en el caso de los modelos empíricos (Capítulo 5). Sin embargo, esto no implicó ausencia de sensibilidad frente a variaciones graduales dentro de los rangos zonales. Así, fue posible describir diferencias más o menos amplias entre los horizontes superficiales de los suelos dentro de una misma sub-región. Tales diferencias han sido reflejadas por los resultados de las simulaciones en ciertos casos, como al comparar la dinámica potencial del C en pastizales próximos entre sí (i.e. Las selvas y El Espinillar) pero con distinta textura superficial (Figuras 7.8 a 7.10). Debido básicamente a un porcentaje apenas mayor de limo y arcilla, la producción del pastizal simulada para el período septiembre – marzo fue 20% superior para Las Selvas.

Del mismo modo, la sensibilidad frente a cambios en el patrón de uso y manejo de las tierras resultó lo suficientemente elevada como para contar con una herramienta de monitoreo para estudios de largo plazo. Por ejemplo, la cantidad de C total en el subsistema suelo-residuos orgánicos (SSRO) mostró cambios del orden del 15 al 20 % por efecto de las labranzas continuas, lo que permitiría analizar diversos escenarios involucrando situaciones intermedias. Sin embargo, la *Spr* a la labranza también depende de si el sitio corresponde a una situación de pastizal original o si fue el resultado del desmonte, con lo que las conclusiones podrían variar. Por todo ello, la sensibilidad frente a cambios menores en el manejo debe ser estudiada con mayor profundidad: es posible suponer que cuando el contenido de carbono en el suelo se aproxima a un umbral mínimo asintótico o a un *plateau* de máxima, la sensibilidad del modelo tiende a disminuir. En tal caso, debería considerarse el uso complementario de CENTURY junto con otros modelos de la dinámica orgánica que sean más sensibles a simulaciones de corto plazo.

## 8 Discusión general y conclusiones

En el presente capítulo se discuten los resultados de los análisis presentados en los precedentes, contrastando con conocimiento y experiencias previas disponibles en diversas fuentes bibliográficas. El tratamiento de estos temas ha sido dividido en dos etapas: en primer lugar se discuten los mecanismos edáficos y los condicionantes ecológicos que afectan a los niveles de materia orgánica en los suelos, y que deben ser tenidos en cuenta para la determinación de rangos de valores referencia para calidad y salud de los suelos de la región. En segundo lugar, se discuten aspectos metodológicos relevantes a la hora de aplicar el modelo CENTURY como herramienta de evaluación y monitoreo de la sustentabilidad de los agroecosistemas regionales. Por último, se esbozan conclusiones y recomendaciones.

### 8.1 El carbono orgánico en los suelos del centro de Argentina

#### 8.1.1 Protección fisicoquímica del carbono en el suelo

La relación observada aquí entre los contenidos de materia orgánica y de la fracción arcilla+limo (cf. Fig. 5.1), aunque un tanto dispersa, confirma lo observado en un gran número de trabajos previos en diferentes regiones del mundo (e.g. Paul *et al.*, 2001, Feller & Beare, 1997; Ladd *et al.*, 1985; Merckx *et al.*, 1985, Sorensen, 1972), comprendiendo desde situaciones de agricultura tecnificada en climas templados hasta esquemas de bajos insumos externos en regiones tropicales. Inicialmente, esta relación fue explicada por el hecho de que mayores contenidos de materia orgánica implican una mayor humedad disponible en el suelo, menor sensibilidad a las sequías y una mayor fertilidad química, factores éstos que estimulan el crecimiento vegetal (Jenny, 1941). Luego fue demostrado que las tasas de transformación (descomposición) se hacen más lentas por efecto de la adsorción de enzimas y substratos orgánicos sobre las arcillas (Kortleven, 1963). Posteriormente, tres mecanismos de estabilización de la materia orgánica del suelo fueron propuestos: (1) estabilización química, (2) protección física y (3) estabilización bioquímica (Christensen, 1996; Stevenson, 1994), entre los cuales los dos primeros dependen en gran medida del tipo y contenido de arcillas. Finalmente, los postulados de Hassink (1997) establecieron que el carbono asociado a complejos organo-minerales primarios se encuentra químicamente protegido, y que el grado de protección aumenta con el incremento de la fracción arcilla+limo, lo cual fue corroborado además mediante estudios microbiológicos (Guggenberg *et al.*, 1999; Puget, *et al.*, 1999; Chantigny *et al.*, 1997).

Sin embargo, no todo el carbono orgánico del suelo es 'protegido' en igual grado. A partir de sus observaciones, Hassink (1997) definió la capacidad de los suelos para preservar carbono mediante su asociación con partículas de arcilla y limo (i.e. potencial de saturación), aunque no consideró al carbono asociado a la fracción arena, cuya correlación

con la textura fue muy débil. Six *et al.* (2002) propusieron un modelo conceptual que incluye, de menor a mayor contenido de carbono total en el suelo: (i) una fracción de carbono protegida por las partículas de arcilla y limo, (ii) otra protegida físicamente por los micro-agregados del suelo (ambas definen la *capacidad de protección* del C de un suelo), (iii) una tercer fracción protegida bioquímicamente (que define el *nivel de protección*) y por último (iv) una fracción no protegida, cuyo contenido definiría el *nivel de saturación* del suelo con C. Ellos indicaron además que la relación propuesta por Hassink (1997) varía de acuerdo al tipo de arcilla, al método de determinación de la fracción arcilla+limo (0 a 20  $\mu\text{m}$  vs. 0 a 50  $\mu\text{m}$ ) y de acuerdo al sistema de uso de la tierra, y que la cantidad de C asociada a esta fracción puede ser reducida por laboreo del suelo. En el presente trabajo, el modelo lineal desarrollado al considerar la fracción textural 0 – 20 $\mu\text{m}$  (Sección 5.1.5) fue algo más explicativo de la variabilidad regional en el contenido de materia orgánica que el desarrollado para la fracción 0 – 50 $\mu\text{m}$  (Sección 5.1.1). Esta última, sin embargo, ha sido determinada para la mayor parte de los suelos de la región, y no así la primera.

Las relaciones entre materia orgánica y textura halladas aquí (Fig. 5.1), que parecen mantenerse para suelos alterados antrópicamente (Fig. 5.2), concuerdan con lo observado por Feller (1995). Notablemente, este autor también ha indicado diferencias cercanas al 60% en el contenido de C entre situaciones naturales y alteradas, trabajando con suelos con contenidos de la fracción arcilla+limo (0 a 20 $\mu\text{m}$ ) entre 10 y 80% y cubriendo un amplio rango de precipitaciones (600 a 3000 mm anuales). Tales diferencias, derivadas del balance entre acumulación y pérdidas de C, resultan de las variaciones en los aportes de materia orgánica al suelo, en su actividad biológica, en la disponibilidad de sustratos para los microorganismos y en la erodabilidad del suelo por el uso (Feller & Beare, 1997). Las pérdidas de C por descomposición acelerada bajo condiciones de uso, y que son normalmente descriptas exponencialmente (e.g. CENTURY), alcanzan un nivel asintótico mínimo con el tiempo. Esta ‘caída’ en el nivel de C suele ser más lenta pero de mayor magnitud en suelos de textura fina, por lo explicado anteriormente, mientras que el nivel asintótico sería más cercano al original (i.e. situación natural) en suelos de textura gruesa (cf. Fig. 5.2 y 7.12). Esto presupone que la capacidad de recuperación de los suelos alterados antrópicamente es también dependiente de su textura, tal como fuera ilustrado mediante el uso del modelo en el Capítulo 7.

Los niveles de materia orgánica medidos en los suelos de las sierras presentaron un rango de variación relativamente estrecho (CV 23%, Tabla 5.1), frente a importantes variaciones del ambiente y de la textura. La fracción arcilla en los suelos de esta sub-región mostró un valor promedio cercano al 20%, similar al de algunos suelos de las llanuras (Apéndice V), y la relación MO/textura mostró incrementos decrecientes hasta un valor máximo correspondiente al 30% de arcilla (Fig. 5.15 B). Aún en condiciones (cuasi-) naturales y bajo ambos tipos de vegetación (i.e. monte y pastizal), el contenido de materia orgánica para los suelos de las llanuras no superó el 7,5%, ni aún para los suelos más finos (arcilla > 20%). Estos resultados parecerían indicar que, debido a un fuerte grado de determinación climática, los suelos de las sierras presentarían valores análogos al contenido de carbono de saturación propuesto por Six *et al.* (2002) y que, por lo tanto, parte ese carbono no estaría ‘protegido’ en el suelo. Esta fracción no protegida resulta

particularmente lábil frente al uso y manejo de las tierras; sin embargo, y aunque la evolución en el contenido de materia orgánica no ha sido informada, Cisneros *et al.* (2000) mostraron un escaso efecto del uso pastoril con cargas animales variables durante cuatro años sobre la densidad aparente, la resistencia a la penetración y la tasa de infiltración en suelos de los ambientes serranos. Los autores atribuyeron estos resultados a la existencia de mecanismos de recuperación de las condiciones físicas del suelo, asociados a las condiciones de alta resiliencia de los mismos – condiciones a menudo atribuidas al contenido de materia orgánica (cf. Tablas 1.1 y 1.2).

La mayor parte de los suelos de la región ha sido profundamente modificada por efecto antrópico desde la colonización agrícola, con importantes consecuencias sobre sus propiedades físicas y químicas (Bricchi, 1996; Moreno *et al.*, 1996; Cisneros *et al.*, 1999; González, 1999; De Prada *et al.*, 1994; Bricchi *et al.*, 2004). Como fuera sugerido en los párrafos introductorios (Cap. 1), la utilización como valores de referencia de las relaciones halladas aquí entre la fracción arcilla+limo y el contenido de materia orgánica para suelos en condiciones cercanas al equilibrio natural, redundaría en indicadores de salud y calidad de suelos ‘inalcanzables’ en muchos casos (ver luego: ejemplo en Sección 8.2.3). Por otra parte, la cantidad de C asociado a la fracción arcilla+limo nunca supera un máximo del 70% del C, aún en condiciones naturales (Feller, 1995). Esto implicaría que es prácticamente imposible explicar el 100% de la variabilidad en la fracción orgánica a partir de la textura. Sin embargo, cuando la textura fue considerada como variable de mayor determinación, fue posible ‘refinar’ o acotar la variabilidad de los resultados al analizar el grado de determinación de los factores ecológicos clima y bioma. Así, al estratificar a las observaciones por intervalos de clase para la fracción arcilla+limo (Tabla 5.4, Figs. 5.7 y 5.8), se obtuvieron relaciones entre las variables climáticas y el contenido de materia orgánica mucho más ajustadas (con valores de  $r^2$  de hasta 0.8).

### 8.1.2 Determinación ecológica de los niveles de materia orgánica en la región

Un componente ambiental sobresaliente, a la hora de analizar los gradientes ecológicos de la región central de Argentina, lo constituye la altitud; la presencia del sistema de Comechingones al noroeste de la región no sólo representa un gradiente en sí mismo, sino que ha influido (e influye) decisivamente sobre la dinámica geológica, hidrológica y climática de toda la región. La relación entre la altitud y el contenido de materia orgánica en el suelo, que puede ser atribuida a variaciones en los regímenes hídrico y térmico, ha sido demostrada en diferentes trabajos desde hace algún tiempo (e.g. Birch & Friend, 1956); en ciertos casos, las variaciones en altitud pueden estar también asociadas a importantes cambios en los materiales originarios del suelo, e.g. los de origen volcánico (Boudot *et al.*, 1988). Las observaciones analizadas aquí mostraron variaciones climáticas de importancia con la altitud, especialmente para las precipitaciones y la amplitud térmica (Fig. 5.5), mientras que los suelos (más allá del origen de los sedimentos) mostraron texturas algo más finas pero aun comparables con ciertos sectores de las llanuras (Tablas 5.1 y 5.5). En uno de sus trabajos clásicos, orientados a establecer las relaciones entre el ambiente y el contenido de materia orgánica en el suelo, Jenny (1965) aplicó el concepto



de 'vida media' para la reducción del contenido de materia orgánica al disminuir la altitud (o duplicación al ascender). Utilizando datos provenientes de los Estados Unidos, India y Colombia, este autor indicó que el contenido de materia orgánica se reduce a la mitad al descender 2763 m. Los datos analizados aquí mostraron (para situaciones de baja alteración antrópica) variaciones promedio cercanas a 8 puntos porcentuales para el contenido de materia orgánica de suelos de textura comparable, en un rango de altitudes entre 120 y 1600 msnm.

Debido a su efecto sobre los aportes de restos orgánicos al suelo, el componente vegetación debe ser incorporado en el análisis del efecto climático sobre la fracción orgánica edáfica, considerando a las precipitaciones [PP] en contraste con la evapotranspiración potencial [ETP] y la tasa de transpiración vegetal efectiva [TVE]. En el estudio de Jenny (1965) se demostró también una relación curvilínea (polinomio de segundo orden, término exponencial negativo) entre la 'precipitación efectiva' y el contenido de materia orgánica en suelos de bosque y en suelos agrícolas. La ordenada al origen fue similar en ambos casos aunque el máximo (saturación) fue casi el doble para suelos de bosque. Este autor definió a la precipitación efectiva como aquella infiltrada en el suelo (PP - escurrimiento) y disponible para el uso por la vegetación, utilizando un 'factor de humedad', i.e. la PP [mm año<sup>-1</sup>] dividida por la presión de vapor correspondiente al déficit de saturación atmosférica [mmHg] (a un mayor déficit, mayor evaporación directa y menor disponibilidad para la TVE). Mucho después Parton et al. (1987) incorporaron en el modelo CENTURY una relación lineal entre el cociente PP/ETP y un factor multiplicativo para representar el efecto hídrico sobre las tasas de transformación del C en el suelo (Capítulo 2 - Apéndice I); ésta relación alcanza un *plateau* a partir del valor 0,8 para PP/ETP. Este cociente fue utilizado aquí como variable explicativa para el contenido de materia orgánica en los suelos de la región (e.g. Figs. 5.6 F y 5.8), arrojando relaciones con buen ajuste lineal, especialmente para ciertos rangos de textura de suelos (Tabla 5.4).

El tipo de vegetación, por su parte, afectó también al contenido de materia orgánica tanto en condiciones alteradas como naturales, aunque en grado diferente para cada sub-región. Estos 'tipos' de vegetación, que han sido definidos aquí como monte y pastizal, inducen diferencias en el ciclaje del carbono en el ecosistema debido a las diferentes estrategias de acumulación de materia en los componentes aéreo y subterráneo (Odum, 1984, 1989). Trabajos clásicos en el estudio de los tipos (agro)ecológicos de humus han demostrado que, en general, el contenido de materia orgánica disminuye en la secuencia: pastizal - bosque - tierra de cultivo (Kononova, 1975). Para los ecosistemas regionales, la asociación entre la granulometría del suelo y la vegetación fue señalada en los trabajos de Anderson *et al.* (1970) y Cabrera (1976), quienes indicaron que las formaciones boscosas prosperan en sectores altos con suelos de textura gruesa, lo que no pudo ser corroborado aquí (Tabla 5.5). Los resultados analizados mostraron un mayor contenido de materia orgánica para los suelos de monte que para aquellos de pastizal (Figs. 5.9 y 5.10, Tabla 5.7). Más allá de que las diferencias cualitativas en los tipos de materia orgánica y en su distribución en el perfil del suelo bajo estos diferentes tipos de vegetación no han sido explícitamente consideradas, la tendencia observada tiene también su origen en ciertos aspectos metodológicos y en las definiciones adoptadas.

La definición de bosque actualmente aceptada (FAO, 2002) indica que los mismos deben presentar una superposición de copas superior al 25%, lo que no es factible de observar en los 'montes' de la región en todos los casos. Por otra parte, muchos de los 'pastizales' analizados aquí provienen de un desmonte antiguo, de manera que su asociación con las características del suelo no fue del todo relevante (Tablas 5.5 y 5.7). Del mismo modo, fue necesario incluir ciertos relictos de vegetación leñosa por ser los únicos disponibles en determinados sitios, aunque frecuentemente tales relictos se asocian con sectores de la explotación que por algún motivo no son aptos para su uso agrícola-ganadero, lo cual impone un fuerte cuestionamiento sobre su representatividad. En un establecimiento cercano a la localidad de General Cabrera, en la sub-región llanuras bien drenadas, se realizaron observaciones en un relicto de vegetación natural conteniendo montes y abras de monte con pastizal natural describiendo un patrón en parche, y donde no se ha practicado desmonte (cf. Imagen 2); el contenido de materia orgánica en este caso fue mayor para las muestras correspondientes al suelo del pastizal (Capítulo 4 – Tabla 4.1). Así, el efecto antrópico modificando a la vegetación original a través del uso de la tierra introduce desequilibrios entre los factores de control sobre la fracción orgánica, tal como fuera demostrado anteriormente (Collins *et al.*, 2000) y confirmado por los resultados de este trabajo (e.g. Fig. 5.10).

La vegetación puede ser también considerada como indicador de las condiciones de sitio, por cuanto sus características (desarrollo, cobertura, ciclo) están estrechamente asociadas a la dinámica del perfil de suelos (Barrios *et al.*, 2001). En tal sentido, las relaciones suelo-vegetación han sido estudiadas en detalle para la sub-región llanuras mal drenadas (Cantero *et al.*, 1998a, 1998b; Cisneros *et al.*, 1999), aunque el contenido de materia orgánica no apareció en ninguno de tales estudios como eje de ordenamiento para los censos de comunidades, y sí en cambio la salinidad o profundidad de la napa freática. Para todas las sub-regiones, el tipo de perfil de suelo desarrollado aparece como una variable integradora de los factores de control sobre la fracción orgánica, y pudo explicar en parte las diferencias en la cantidad de carbono acumulada en el epipedón para la región (Tabla 5.7). En general, los suelos con un desarrollo de mayor evolución (pedogénesis) presentan mayores niveles de materia orgánica (si las condiciones climáticas durante su evolución se mantienen invariables) debido a que la formación de complejos orgánicos-minerales es favorecida por las mismas condiciones que conducen el desarrollo del perfil del suelo (Smeck *et al.*, 1983). La interacción entre los factores que establecen estas condiciones y su efecto combinado sobre el contenido de materia orgánica en el suelo, pudieron ser descriptos e ilustrados mediante el uso de modelos empíricos basados en regresión lineal como marco referencial (Sección 5.1.5). Sin embargo, estos modelos sólo son aplicables al estudio del efecto de los factores zonales; las condiciones de intrazonalidad imponen la necesidad de considerar variables que operan a menor escala (Sección 5.2).

### 8.1.3 Conceptualización ecológica: los factores zonales y su interacción

El control que ejerce cada uno de los grupos de factores *zonales* analizados sobre el contenido de materia orgánica en los suelos de la región, su importancia o peso relativo en

cada sub-región y el grado de interacción entre los mismos fue ilustrado mediante los diagramas que aparecen en Figura 8.1. Otros grupos de factores importantes a diferentes escalas, como la topografía y el uso de la tierra, no han sido incluidos en estos diagramas a fin de simplificar su análisis. Los resultados analizados en los capítulos precedentes permiten indicar que para las llanuras bien drenadas, desde los sectores con relieve sub-normal hacia aquellos fuertemente ondulados, el factor de mayor peso relativo en la determinación del contenido de materia orgánica es la granulometría de la fracción inorgánica. Si bien existe un grado de interacción entre los factores clima y textura (i.e. en los sectores fuertemente ondulados, con suelos de origen loésico, se registran precipitaciones algo mayores), la mayor interacción fue observada entre ésta y la vegetación (e.g. Tablas 5.5 y 5.7). En esta sub-región, el factor uso de la tierra debería ser representado con un gran peso relativo en estos diagramas (cf. Figs. 5.2 y 5.10), mientras que el factor topográfico aparecería co-variando con la granulometría a escala de paisaje (cf. Fig. 5.17 – Distribución de los sedimentos en ambientes ondulados). La interacción clima x vegetación apareció fuertemente distorsionada en esta sub-región debido al efecto antrópico sobre la distribución de relictos de vegetación natural y al estrecho rango de variación climática.

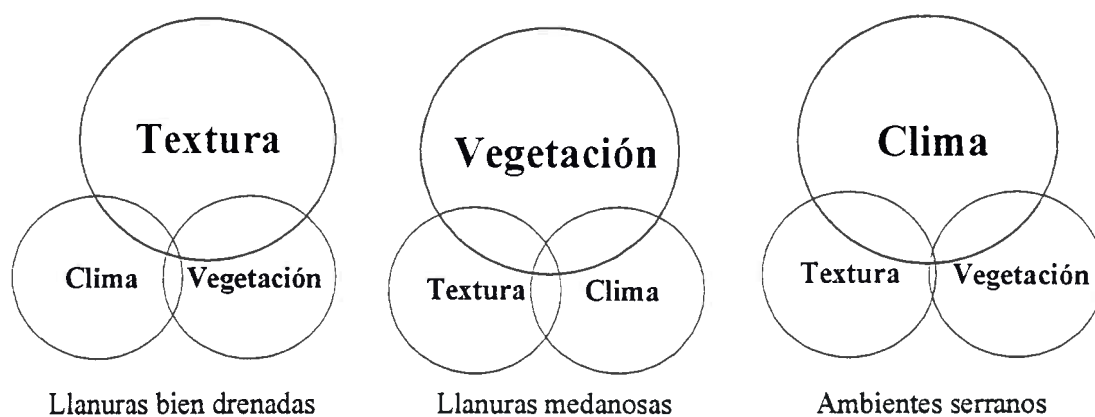


Figura 8.1: Representación de la importancia relativa de cada uno de los grupos de factores zonales de control sobre los niveles de materia orgánica mediante diagramas de Venn, para tres de las sub-regiones correspondientes a la región central de Argentina. La importancia relativa de cada conjunto de factores es representada por su tamaño, y el área compartida por dos conjuntos (intersección) ilustra el grado de interacción entre grupos de factores.

En las llanuras medanosas, donde la capacidad de preservar C de los suelos es baja debido a su textura y su clase natural de drenaje tiende a ser excesiva, el tipo de vegetación adquiere el mayor peso relativo en la determinación de su contenido de materia orgánica (Tablas 5.5 y 5.7; Figs. 5.9 y 5.18). El tipo de vegetación interactúa tanto con el clima como con la textura a escala sub-regional (NE – SO, Capítulo 3), y con la textura a escala de unidad de paisaje simple (Fig. 5.18). Existe además un grado de interacción clima-textura, por cuanto la granulometría presenta un gradiente de tamaños ascendente en sentido sudoeste, de signo contrario al gradiente pluviométrico en esta sub-región (Capítulo 3). Debido a éste último y a la clase natural de drenaje de estos suelos, el efecto



topográfico es menor que en el caso de las llanuras bien drenadas. El efecto del uso de la tierra sobre el contenido de materia orgánica aparece como un componente importante en esta sub-región, particularmente en los casos de desmonte e incorporación de las tierras a rotaciones agrícola-ganaderas (Fig. 5.18 – Influencia de la vegetación en el Caldenal); aunque las diferencias absolutas entre situaciones naturales y alteradas tienden a disminuir para texturas gruesas (Fig. 5.2).

El clima es, sin lugar a dudas, el grupo de factores zonales de mayor determinación sobre el contenido de materia orgánica de los suelos en los ambientes serranos (Tabla 5.1 y 5.5). Su interacción con la textura y la vegetación se manifiesta además a través del factor topográfico (e.g. co-variación entre la pendiente y la granulometría, presencia de gravas) o de la estructura del hábitat en que se desarrollan las comunidades vegetales (microclima, exposición). A partir de los resultados analizados aquí, el efecto de la interacción textura x vegetación en la determinación del contenido de materia orgánica en estos suelos fue prácticamente nulo, o fue sobrepasado en gran medida por el efecto climático. Del mismo modo, el factor uso de la tierra aparece con poco peso relativo en estos suelos altamente resilientes, sujetos a descansos anuales, y con contenidos de materia orgánica que representarían el nivel de *saturación* para los suelos de la región.

La confección de estos diagramas conceptuales para el caso de las llanuras mal drenadas resulta casi impracticable, debido a que sería necesario llevar la escala de análisis a la unidad de paisaje simple y diagramar las interacciones entre factores que tienen lugar en cada ambiente considerado (intrazonalidad). En principio, a escala sub-regional, se observó un importante efecto de la textura (cf. Tabla 5.5), que se mantiene a escala de paisaje (cf. Tabla 5.7, Fig. 5.13). Otros determinantes regionales aparecen vinculados a los factores geomorfológicos e hidrológicos, que afectan a la dinámica de agua y solutos (y sedimentos) en la sub-región – Apéndice II. El factor topográfico a escala de paisaje determina fuertes interacciones entre la textura y el (micro-)clima, y entre éstos con la vegetación; éstas interacciones, que conducen a las situaciones de equilibrio particulares para cada ambiente, se verán alteradas en diferente forma y grado a través del uso de la tierra.

## 8.2 Calidad y salud de los suelos: determinación, evaluación y monitoreo

### 8.2.1 Materia orgánica y fertilidad física y química del suelo

La relación entre el contenido de materia orgánica en el suelo y su “fertilidad” en sentido amplio ha sido frecuentemente categorizada para su estudio como fertilidad química y fertilidad física, o en algunos casos discriminando además una fertilidad “biológica” (FAO, 1997). Estos conceptos, sin embargo, son interdependientes: la fertilidad química hace referencia a la dotación de nutrientes en el suelo y a su disponibilidad para las plantas (capacidad e intensidad), al equilibrio químico en la solución edáfica, a las formas químicas en que predominan los nutrientes (potencial redox, quelatos) y a la actividad biológica necesaria para poner a disposición de las plantas aquellos nutrientes constitutivos de los restos orgánicos. La fertilidad física ha sido definida como la



capacidad del suelo para actuar como un medio para el desarrollo de las raíces y su habilidad para abastecer de agua y aire al medio radical (e.g. Janssen, 2002), de modo que la misma depende en forma directa de la estructura (i.e. del arreglo espacial de las partículas primarias y secundarias del suelo). La estructura genera el “escenario” donde tienen lugar los procesos de la fertilidad química-biológica y regula las condiciones en que los mismos ocurren debido a su influencia sobre la estática y dinámica de los fluidos (i.e. líquidos y gases) en el suelo (Ceriani, J.C. - comunicación personal). De esta forma, la fertilidad física aparece como un factor de gran autonomía en la determinación de la calidad<sup>9</sup> del suelo.

Es por ello que el principal efecto de la materia orgánica (MO) – más allá de su aporte de nutrientes ligados a los tejidos orgánicos, de cargas dependientes del pH y de la composición y actividad de su fracción activa (microorganismos, enzimas) – reside en la regulación de las propiedades físicas del suelo, particularmente en suelos con bajos contenidos de coloides inorgánicos (cf. Capítulo 6). Experiencias regionales mostraron reacciones diferenciales de los suelos frente a diversas prácticas de manejo (de los residuos de cosecha, de las labranzas) respecto de su condición física, en función de su contenido de MO (Bricchi *et al.*, 2004). Por otra parte, la literatura ofrece abundante evidencia para afirmar que el contenido de MO del suelo constituye un condicionante de primer orden para la ocurrencia de procesos que conducen al éxito de distintas intervenciones tecnológicas; e.g. respuesta de los cultivos a la fertilización química (Vanlauwe *et al.*, 2001), respuesta de las leguminosas a la inoculación con *Rhizobium* y fijación de nitrógeno (Giller, 2001), descomposición de abonos orgánicos incorporados al suelo en sincronía con la demanda de los cultivos (Palm *et al.*, 1998), comportamiento de fertilizantes orgánicos (*Nostoc*, *Azospirillum*) y micorrización (Blaine-Metting, 1992; Rogers and Burns, 1994), etc. El mantenimiento de niveles críticos de MO en el suelo resulta un desafío ineludible para preservar su calidad (como fue demostrado para los atributos retención hídrica y capacidad de intercambio – Cap. 6) y propender a la estabilidad físico-económica de los agroecosistemas.

*Porosidad y retención hídrica:* La asociación entre el contenido de MO y la capacidad de retención hídrica de los suelos de la región resultó en general bastante estrecha (cf. Sección 6.1.2). El modelo de Boekel (1986) que se utilizó para describir esta relación funcional fue concebido para su aplicación en suelos arenosos o en suelos con elevados contenidos de MO. Por tal motivo, y esperando diferencias importantes en el valor de los coeficientes, el análisis consideró a los suelos de los sectores serranos por separado (Fig. 6.10). A diferencia de lo observado por Boekel y por otros autores (Van Keulen, 1975; Probert *et al.*, 1998) la relaciones entre el contenido de MO del suelo (y/o de arcilla+limo) y las constantes hídricas (CC y CMP) fueron mejor descritas por relaciones lineales (Fig. 6.5) y no así por curvas de tipo saturación (e.g. cuadrática), ni se observó con claridad un *plateau* en el contenido de agua útil para suelos con elevados contenidos de MO (Fig. 6.6).

<sup>9</sup> Entre otras, ésta interdependencia es una de las razones por las cuales hoy se prefiere el término “calidad de suelo” en lugar de fertilidad, haciendo referencia a la capacidad del suelo para cumplir sus funciones, y a menudo se preserva el término “fertilidad” para referir fundamentalmente a la dotación de nutrientes del suelo.

De allí que los modelos empíricos ajustados a los datos disponibles mediante regresión múltiple (Tabla 6.1) produjeran predicciones más cercanas a la distribución de las observaciones (Fig. 6.7 y 6.8) y a los datos observados independientemente en la región (Fig. 6.9). Esta discrepancia pareció deberse a que (i) los datos provenían de fuentes heterogéneas con un nivel de error asociado no conocido y (ii) los suelos de texturas más finas de la región (15 a 20% de arcilla) presentarían una importante desviación respecto del modelo original. De hecho, la determinación del espacio poroso dependió mucho más de MO en los suelos de textura gruesa, con contenidos de arcilla+limo menores al 20% ( $r^2$ : 0,9 – cf. Sección 6.1.3), y de allí que las relaciones entre MO y las constantes hídricas fueran también más ajustadas en tales casos.

*Capacidad de intercambio catiónico:* Mediante la aplicación del modelo de Bennema (1966) – originalmente calibrado para los suelos de Brasil – a las observaciones regionales para el contenido de MO, arcilla y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se derivó la siguiente relación: por cada unidad porcentual de aumento en el valor de MO, el valor de la CIC aumenta aproximadamente en  $1 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$  (cf. Sección 6.1.1 – Figs. 6.2 y 6.3). En un estudio realizado mediante éste método para suelos arenosos (menos del 12% de arcilla) y en condiciones tropicales este valor fue de  $1,4 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$  (Janssen and Van der Weert, 1977); en suelos tropicales genéticamente ácidos el valor de CIC medido ( $\text{NH}_4$ ) tiende a sobrestimar al real, debido a que buena parte del complejo se encuentra saturada con Al. Utilizando los coeficientes derivados aquí para MO y para arcilla ( $\text{CIC}_{\text{MO}}$  y  $\text{CIC}_{\text{arcilla}}$ , respectivamente) se obtuvo una estimación aceptable ( $r^2$ : 0,81) de la CIC para suelos medidos independientemente dentro de la región (Fig. 6.4). Sin embargo, éste método opera sobre el supuesto de que no existe interacción entre ambas fracciones en la determinación de la CIC, a pesar de las complejas interrelaciones entre los coloides orgánicos e inorgánicos discutidas precedentemente (cf. Protección física y química del C). Este método tampoco considera diferencias en el tipo de arcillas involucradas (1:1 ó 2:1, expansibles o no), que pueden establecer diferentes categorías de complejos arcillo-húmicos (Hassink, 1997), afectando así a la CIC resultante. Por último, y como en todo método basado en regresiones, pequeños errores en la determinación del valor de  $\text{CIC}_{\text{MO}}$  pueden traducirse en relativamente grandes errores en la estimación final.

### 8.2.2 Variabilidad de la fracción orgánica: implicancias metodológicas

A la hora de emplear modelos para la evaluación y monitoreo de calidad de suelos y sustentabilidad de los agroecosistemas debe ponerse especial atención a la variabilidad espacio-temporal y cualitativa de la fracción orgánica – ecológica y antrópicamente mediada – en los suelos de la región. En tal sentido, existen fuentes de variabilidad de origen geo-ecológico que operan a escala regional y sub-regional (factores zonales – Cap. 5), a escala de unidad de paisaje (e.g. distribución de sedimentos, drenaje, comunidades vegetales) y aún dentro del perfil (distribución vertical, calidad y/o tipo de materia orgánica – fracciones, C:N – Cap. 6). A estas fuentes, deben agregarse aquellas de origen antrópico, que interactúan a diferentes escalas espaciales con las primeras y que imponen

una importante variabilidad temporal relacionada con el uso (largo plazo) y manejo (corto plazo) de las tierras. Los ejemplos regionales analizados en el Capítulo 5 han ilustrado el efecto que los factores de intrazonalidad pueden tener sobre la distribución del C del suelo en el paisaje. Es por ello que el uso de CENTURY como herramienta de evaluación y monitoreo de calidad de suelos debe limitarse lo más posible al estudio de la variabilidad de los factores *zonales*, a fin de evitar conclusiones erróneas. Como su nombre lo indica, el modelo CENTURY (del inglés: Siglo) ha sido originalmente concebido para simulaciones a través de escalas temporales de *largo plazo*, relacionadas con variaciones en el uso de la tierra – aunque sucesivas revisiones han incorporado modificaciones que permiten simular variaciones en el manejo (cf. Cap. 1 y 2). A partir de estos planteos surgen las siguientes consideraciones metodológicas:

1. Al trabajar en escalas de mayor detalle, involucrando variabilidad al nivel de la unidad de paisaje simple, se debe revalidar la sensibilidad del modelo con datos locales, específicos, y preferentemente provenientes de fuentes experimentales relevantes al objeto bajo estudio.
2. Para el estudiar el efecto de diferentes sistemas de manejo sobre las propiedades de calidad del suelo, debe complementarse el uso de éste modelo con el de otros más sensibles a la dinámica del C en el corto plazo (incluso modelos empíricos).

Por último, es necesario considerar las variaciones en los aspectos cualitativos de la materia orgánica del suelo y la información contenida en los resultados de las simulaciones con CENTURY en tal respecto. El ejemplo regional utilizado para ilustrar la variabilidad en la composición de la materia orgánica del suelo, en términos de su fraccionamiento físico (Sección 6.2), mostró la siguiente tendencia media: la fracción particulada (*Fp*: 53 – 2000  $\mu\text{m}$ ) representó en promedio ca. 60% del C total y dentro de ésta, las fracciones liviana (250 – 2000  $\mu\text{m}$ ) e intermedia (53 – 250  $\mu\text{m}$ ) se encontraron en una proporción aproximadamente 50:50 (cf. Fig. 6.17). Sin embargo, ésta distribución no se mantuvo en las observaciones correspondientes al suelo en condición (cuasi-)natural bajo monte (Apéndice VIII).

Niveles elevados de C estuvieron asociados a mayores proporciones de las fracciones menos estables, lo que fue confirmado además por la tendencia al aumento de la relación C:N a mayores niveles de MO en los suelos de la región (cf. Fig. 6.19). En un estudio sobre la composición de la fracción orgánica en suelos de bosque, de pastizales antrópicos (con y sin leguminosas) y de montes frutales Cadisch *et al.* (1996) mostraron (i) una reducción de hasta el 85% de la cantidad de C total superficial provocada por la deforestación luego de 18 años, similar a las pérdidas de C informadas por Bricchi *et al.* (2004) para suelos del sector fuertemente ondulado (llanuras bien drenadas), y (ii) una disminución de la *Fp* respecto del C total en la secuencia: bosque – pastizal – monte frutal, indicando que la misma estuvo influenciada no sólo por la cantidad sino por la calidad de los residuos orgánicos aportados al suelo. Estos autores indicaron también que la presencia de una leguminosa en la pastura (*Desmodium* sp.) indujo un aumento en la cantidad de N contenido en la *Fp*, llevando su relación C:N a 15 – 17:1 (calidad de los aportes orgánicos); sin embargo, la contribución de la *Fp* al total del N mineralizado fue mayor en el suelo de bosque no disturbado.



Las simulaciones con CENTURY para las condiciones naturales o de baja presión antrópica en suelos de la región (Sección 7.1.2) mostraron una proporción aproximadamente 70:30 para las “fracciones” conceptuales estable y pasiva definidas por el modelo (cf. Tablas 7.2 y 7.3). Esta proporción aproximada se mantuvo para suelos de diferente textura, evolucionados bajo monte o pastizal, y aún en aquellos de desmonte en que no se simularon labranzas. Desde un punto de vista metodológico, interesa saber cómo homologar el significado de estas “fracciones” con aquellas resultantes del fraccionamiento físico (granulometría) y/o químico (ácidos fúlvicos, húmicos, huminas) de la materia orgánica del suelo, con énfasis en la región bajo estudio. Una forma de hacerlo es adoptando los conceptos de protección fisicoquímica del C discutidos precedentemente (Sección 8.1.1) – particularmente el modelo conceptual de fraccionamiento propuesto por Six *et al.* (2002) – en un estudio regional (asistido por modelos) sobre la dinámica de las fracciones protegidas y la no protegida. La importancia de ésta última para evaluación y monitoreo de calidad de suelos reside (i) en su mayor fragilidad frente al uso, (ii) en que constituye una importante fuente de nutrientes para los cultivos, y (iii) en que representa al tipo principal de C comúnmente acumulado en el suelo como resultado de prácticas conservacionistas o tendientes a la recuperación de suelos, e.g. siembra directa (Palma *et al.*, 1997; Calegari *et al.*, 1998). El potencial de los suelos en su contribución a la dinámica de fijación/liberación de CO<sub>2</sub> (una aplicación corriente de los modelos de MO) depende también en gran medida de la dinámica de la fracción de C no protegida (Paustian *et al.*, 2000).

### 8.2.3 Conceptualización metodológica: evaluando sustentabilidad mediante el uso de modelos

Retomando las definiciones de calidad y salud del suelo adoptadas en este trabajo (cf. Fig. 1.1 y texto relacionado), la metodología propuesta aquí para el análisis de escenarios futuros – en términos de evaluar sustentabilidad a través de la componente edáfica de los sistemas productivos – hace uso de los diferentes elementos analizados en los capítulos y secciones precedentes. La misma ha sido esquematizada en la Figura 8.2, donde se ha representado la evolución de un cierto atributo de calidad del suelo desde la situación actual hacia una situación posible en el futuro. Considerando lo expuesto en Capítulo 1 (Sec. 1.4: *calidad inherente, percibida o transformada*), un indicador puntual de salud del suelo, en su forma más simple, debería expresar en términos relativos el estado actual (i.e. medido, observado) de tal atributo respecto de un valor ‘esperable’ o potencial. La designación ‘esperable’ se refiere a que, en vista de las grandes modificaciones de los ecosistemas originales provocadas por el hombre, la utilización como valor de referencia de aquellos correspondientes a la situación ‘original’ resultaría demasiado alejada de la realidad, generando indicadores de salud del suelo ‘inalcanzables’ (Secs. 7.2 y 8.1). Valores ‘esperables’ o potenciales pueden ser considerados aquellos a derivar con los modelos empíricos desarrollados a partir de los gradientes regionales para los factores zonales (Sec. 5.1). Los valores ‘futuros’ para la variable o atributo de salud del suelo en cuestión pueden ser obtenidos mediante la operación de modelos predictivos, tales como



CENTURY, cuya sensibilidad a los gradientes regionales ha sido estudiada aquí (Sec. 7.1).

Un ejemplo sobre la aplicación de ésta última etapa, de predicción y/o análisis de escenarios futuros, fue presentado en el capítulo precedente (Sec. 7.2). El ejemplo ilustra los límites máximos a esperar en los niveles de C en el suelo tras una clausura de 50 años (Fig. 7.12), los que difieren notablemente de los valores originales. En un estudio reciente sobre criterios para recuperación de tierras degradadas en la región, Leguía *et al.* (2004) proponen al bosque nativo (bosque de algarrobos) como referente para la evaluación del deterioro de los suelos agrícolas. Los autores comparan los atributos fisicoquímicos de los suelos del monte (SM) con aquellos de suelos en siembra directa (SD) y en labranza convencional (LC), e indican valores de materia orgánica (MO) de 6,7% para SM, 2,1% para SD y 2,0% para LC. Notablemente, éstas diferencias resultan similares a aquellas obtenidas para el suelo de Las Selvas (Gral. Deheza) mediante la simulación del escenario "actual" con CENTURY (MO bajo monte de algarrobos: ca. 6%; MO luego de 100 años de agricultura: ca. 2%). En el mismo ejemplo, el escenario de clausura simulado para 50 años muestra un valor de MO de ca. 3,5% para tal suelo (Fig. 7.12). Sin dudas, este valor resulta mucho más realista como referente para la recuperación del suelo que el correspondiente al monte, y puede ser utilizado en la construcción de indicadores de salud del suelo (Fig. 8.2). Del mismo modo, utilizando los modelos empíricos desarrollados en Capítulo 5 se obtuvieron valores de referencia entre 2,8 y 3,4% para MO.

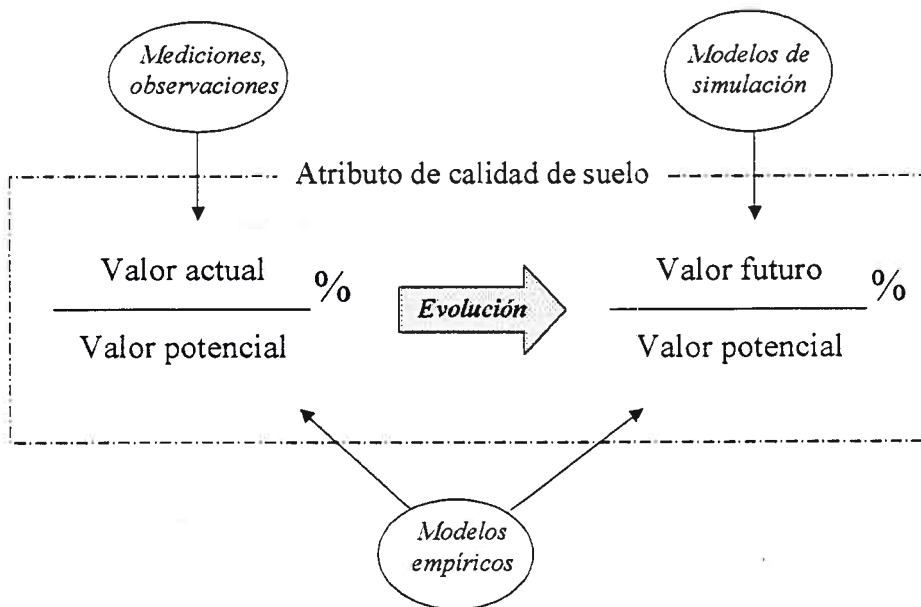


Figura 8.2: Esquema representando el marco conceptual metodológico para el estudio de la evolución de atributos de calidad del suelo y el análisis de escenarios futuros en términos de indicadores de salud de suelos.

Las diferencias discutidas arriba resultarán mucho mayores en suelos arenosos, donde los efectos del uso y manejo suelen ser más intensos y donde el tamaño de las explotaciones implica mayor variabilidad dentro de las unidades productivas (cf. Tablas 5.5 y 5.7; Fig.

5.18). Sin embargo, el nivel máximo de C que pueden alcanzar los suelos de la región será sin dudas aún mayor a los simulados en Fig. 7.12. En primer lugar, porque no se han simulado allí aplicaciones de fertilizantes y/o enmiendas orgánicas, cuyo efecto sobre la acumulación de materia orgánica en el largo plazo ha sido ampliamente documentado (Paustian *et al.*, 1992); ésta alternativa también puede ser simulada con CENTURY. Por otra parte, y de acuerdo a los resultados analizados en este estudio, los límites máximos *potenciales* para los niveles de MO en los suelos de la región estarían muy cercanos a los valores medidos en los suelos de las sierras (i.e. donde suelos con un 20% de arcilla alcanzan valores de hasta 30% de MO), con importantes cantidades de C no protegido, y que representarían niveles próximos a los de saturación para estas clases texturales. Por último, el escenario de clausura no contempla la reintroducción del componente leñoso al sistema, que permitiría alcanzar valores de C de equilibrio más elevados en el suelo, como ocurre en planteos agroforestales (Shepherd *et al.*, 1996). La calibración regional del modelo para simular la recuperación de los niveles de C en el suelo mediante forestación constituye aún una asignatura pendiente.

Un análisis integral de sustentabilidad debe contemplar al mismo tiempo a los aspectos ambientales, sociales y económicos del sistema bajo estudio (cf. Sec. 1.1). De allí que, para el análisis de escenarios futuros, es necesario además contar con modelos validados regionalmente que involucren tales aspectos y que puedan ser fácilmente vinculados con los resultados de CENTURY. Un intento en tal sentido es la vinculación del submodelo materia orgánica (Cap. 2) con los modelos de cultivo CERES y CROPGRO (Gijssman, *et al.*, 2002), a fin de contar con una herramienta de monitoreo para riesgos climáticos y estabilidad de rendimientos en el largo plazo. Del mismo modo, existen diversos modelos socioeconómicos (e.g. Schipper *et al.*, 1995) que pueden ser aplicados junto con CENTURY al estudio de la sustentabilidad de los agrosistemas a diferentes escalas (predio, explotación, región, etc.), o modelos de optimización para el uso de las tierras a escalas regionales de planificación (e.g. Van Ittersum *et al.*, 1998). Sin embargo, ciertos análisis físicos (balance de C) y/o económicos (margen bruto) relativamente simples, pueden ser llevados a cabo a partir de los resultados obtenidos mediante simulación para escenarios futuros, a fin de complementar su información en el monitoreo y evaluación de sustentabilidad. En todos los casos, una metodología para evaluación de sustentabilidad adecuada debe contemplar la perspectiva del usuario de sus resultados así como de los diversos actores involucrados en la problemática, particularmente en las etapas de definición de indicadores físicos y socioeconómicos para calidad de suelos (i.e. *calidad percibida* – cf. Fig. 1.1) y sustentabilidad del sistema.

### 8.3 Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo a los resultados analizados y discutidos en los capítulos y secciones precedentes, se desprenden las siguientes conclusiones:

1. El contenido de materia orgánica en equilibrio natural en los suelos de la región depende de la interacción de factores geo-ecológicos y de los mecanismos edáficos de protección y asociación del C a las partículas minerales. Para los primeros, existen

factores de variación zonal e intrazonal, cuya importancia relativa sobre el control de los niveles de materia orgánica varía para las diferentes sub-regiones: la textura aparece como el factor zonal de mayor determinación en las llanuras bien drenadas, la vegetación en las llanuras medanosas y el clima en los sectores serranos; en las llanuras mal drenadas, el efecto de los factores intrazonales (topografía-drenaje) supera al de los zonales.

2. Los rangos de valores de referencia para la construcción de indicadores de calidad y salud del suelo son afectados por los diferentes factores zonales de control sobre los niveles de materia orgánica edáfica; la intensidad de estos factores y su interacción aparecen integradas dentro de los Grandes Grupos de Suelos (GGS) que ocurren dentro de cada sub-región. La definición de valores de referencia específicos para cada GGS aparece como un enfoque apropiado en la evaluación y monitoreo de sustentabilidad.
3. El efecto antrópico, a través del sistema de uso histórico de la tierra, afecta a las relaciones entre los diferentes factores zonales de control y los contenidos de materia orgánica en los suelos, particularmente en el caso de la textura (fracción arcilla+limo). Es posible derivar modelos empíricos simples de alcance regional para una aproximación a los niveles de materia orgánica edáficos, considerando a la textura y a la relación entre precipitaciones y temperatura media (o evapotranspiración) como variables explicativas; los mismos presentarán diferentes coeficientes para suelos de monte, de pastizal o de uso agrícola-ganadero.
4. Diferentes propiedades que hacen a la calidad de los suelos de la región dependen directa o indirectamente de su contenido de materia orgánica, especialmente aquellas asociadas con la fertilidad física de los suelos (estructura-porosidad); rangos de valores de referencia regionales para la capacidad de retención hídrica como para la capacidad de intercambio catiónico en los horizontes superficiales pueden ser satisfactoriamente estimados mediante modelos empíricos (regresión lineal múltiple) que utilizan al contenido de materia orgánica y a la textura como variables explicativas.
5. La importancia relativa del contenido de materia orgánica sobre la determinación de propiedades que hacen a la calidad de los suelos aumenta con la clase textural desde granulometrías finas a gruesas; la magnitud de las pérdidas de C frente al uso, su ritmo, y su capacidad de recuperación varían también con la textura. Para cada clase textural, existe un nivel de C de *equilibrio* natural representado por los contenidos de materia orgánica en condiciones de monte y pastizal naturales, un nivel de  *saturación*  que implica acumulación de C no protegido y que podría corresponder a los niveles medidos en los suelos de las sierras, y un nivel asintótico *mínimo* o remanente que se alcanza luego de fuertes perturbaciones (e.g. labranza continua) durante períodos prolongados cuya duración depende de los mecanismos de resistencia y resiliencia del suelo. Estos niveles deben ser tenidos en cuenta para la construcción de indicadores de calidad y salud del suelo, evitando la adopción de índices frecuentemente inalcanzables (i.e. niveles de equilibrio natural) en términos prácticos.
6. El análisis de la sensibilidad del modelo CENTURY frente a los gradientes (biofísicos y socioeconómicos) de variación regionales indica que su utilización como

herramienta para evaluación y monitoreo de sustentabilidad debe limitarse al estudio de factores zonales de control (escala espacial) y su interacción con variables definidas por el patrón de uso de la tierra en el largo plazo (escala temporal). Estudios que involucren variaciones a escala de paisaje (intrazonal) y/o en el corto plazo (manejo) deben considerar una etapa de validación del modelo frente a datos locales y su uso complementario con otras herramientas predictivas de mayor sensibilidad.

7. Es posible utilizar el modelo CENTURY para estudios en la región central de Argentina que involucren, e.g. (i) el análisis de escenarios futuros en el patrón de uso de la tierra y su impacto sobre variables ambientales y económicas, (ii) la simulación de la dinámica de fijación/liberación de CO<sub>2</sub> a partir de balances de C de largo plazo para los diferentes agroecosistemas de la región (impactos de su transformación), (iii) estudios de estabilidad productiva y riesgos en el largo plazo, vinculando los resultados de las simulaciones con indicadores de eficiencia físico-económica y (iv) estudios exploratorios que permitan establecer valores potenciales de C edáfico, que puedan ser utilizados en la construcción de indicadores de calidad de suelos.

Aún resta conocer la relevancia de ciertos resultados de las simulaciones con CENTURY para su aplicación en estudios regionales. En tal sentido, es recomendable concentrar esfuerzos de investigación para comprender el significado práctico de las fracciones conceptuales de materia orgánica (activa, estable y pasiva) utilizadas por éste y por la mayor parte de los modelos de la dinámica del C del suelo, y su homologación con las fracciones físicas del C (sobre las que existe abundante información, especialmente sobre su comportamiento frente a diferentes sistemas de manejo). Es necesario contar con ejemplos regionales de aplicación de éste modelo en combinación con otros para el estudio de problemáticas de manejo concretas, de corto y mediano plazo, a fin de conocer la utilidad del modelo para el diseño de estrategias de manejo (e.g. rotaciones, sistemas de labranza, manejo de nutrientes). Del mismo modo, resulta interesante para la evaluación integral de sustentabilidad, contar con herramientas metodológicas que permitan evaluar los aspectos sociales y económicos de los agroecosistemas; es recomendable estudiar la forma de vincular los resultados de las simulaciones hechas con CENTURY con las necesidades de información de otras herramientas metodológicas de evaluación, ponderando su utilidad en tal contexto. Por último, es necesario integrar la visión de los diferentes actores involucrados en problemáticas de planificación regional (i.e. re-diseño de agroecosistemas), desde los productores hasta las esferas de decisión política, a fin de lograr definiciones integradas y consensuadas de indicadores de sustentabilidad, cuyos lineamientos puedan ser “bajados” a los conceptos más particulares que hacen a la definición de indicadores de calidad y salud de suelos.



## Referencias bibliográficas

- Acton, D.F., Padbury, G.A. 1993. A conceptual framework for soil quality assessment and monitoring. Pages 2-1 to 2-10 in A program to assess and monitor soil quality in Canada: soil quality evaluation summary. Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa, Ont., Canada.
- Alessandria, E., Leguía, H., Pietrarelli, L., Sánchez, J., Luque, S., Arborno, M., Zamar, J. L., Rubin, D. 2001. La agrodiversidad en sistemas extensivos. El caso de Córdoba. LEISA Vol 16: 10 - 11.
- Altieri, M. 1999. Applying agroecology to enhance productivity of peasant farming systems in Latin America. *Environment, Development and Sustainability* 1: 197 - 217.
- Alvarez, R., Santanatoglia, G.J., García R. 1995. Soil respiration and carbon input from crops in a wheat-soybean rotation under different tillage systems. *Soil use manag.* 11: 45-50.
- Anderson, D.L., Del Aguila, J.A., Bernardon, A.E. 1970. Las formaciones vegetales de la Provincia de San Luis. *Rev. Inv. Agrop. INTA Serie 2. Biol. y Prod. Veg.* 7: 153-183.
- Anderson, D.L., Oriente, E.L., Molinero, H.B. 1980. Determinación de la carga animal en tres áreas del pastizal natural de San Luis. EEA Villa Mercedes, INTA. 12 pp.
- Anderson, D.L. 1981. Receptividad del pastizal natural. Establecimiento "Aguada del Molle". Informe CREA El Morro II. Provincia de Córdoba. 3 pp.
- Andriulo, A. 1995. Modélisation de l'évolution des matières organiques des sols de la Pampa. Relation avec les systèmes de culture. Dr Thèse. INA-PG, 143 pp + annexes.
- Arshad, M. A., Martin, S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88 (2): 153 - 160.
- Barrios, E., Bekunda M., Delve, R. J., Esilaba, A., Mowo, J. 2001. Identifying and classifying local indicators of soil quality. Eastern Africa Version. Participatory Methods for Decision Making in Natural Resource Management. CIAT-SWNM-TSBF-AHI. Nairobi, Kenya.
- Becerra V., Cantero A., Piñeiro A., Bricchi E., Gil, H. 1981. Planificación del manejo conservacionista de una subcuenca de erosión hídrica del Depto Río Cuarto. Escuela para graduados UNRC, 19 pags.
- Becerra, V., Cantero, A., Piñeiro, A., Bricchi, E. 1983 Planeamiento del manejo conservacionista de una subcuenca de erosión hídrica del Depto. Río IV. I Jornadas Científico-Técnicas FAV Actas pag. 50.
- Bennema, J. 1966. Classification of Brazilian Soils. FAO, EPTA 2197.
- Bianco, A.B., Kraus, T.A., Anderson, D.L., Cantero, J.J. 1987. Formaciones vegetales del suroeste de la Provincia de Córdoba (Argentina). *Rev. Univ. Nac. Río Cuarto* 7: 5 - 66.
- Birch, H.F., Friend, M.T. 1956. The organic matter and nitrogen status of East African soils. *J. Soil Sci.* 7: 157-167.
- Blaine-Metting Jr., F. (Ed.). 1992. Soil microbial ecology. Applications in agricultural and environmental management. Marcel Dekker, New York, 648 pp.
- Boekel, P. 1986. Effect of organic matter on soil structure (In Dutch). Themadag "Organische stof in de akkerbouw", PAGV Lelystad, Themaboekje 7: 44-53.
- Bonadeo E., Bricchi, E. 1983. Caracterización física de los Udoles del oeste de Río Cuarto. I Jornadas Científico-Técnicas FAV Actas pag. 17.
- Bonadeo, E., Bricchi, E. 1991. Informe técnico: Contenido de materia orgánica, nitratos, P, Ca, Mg y K a la siembra de colza, en el área de Gral. Deheza y Santa Eufemia.
- Bosshard, A. 2000. A methodology and terminology of sustainability assessment and its perspectives for rural planning. *Agric. Ecosyst. Environ.* 77: 29 - 41.
- Boudot, J.P., Bel Hadi Brahim, A., Chone, T. 1988. Dependence of carbon and nitrogen mineralisation rates upon amorphous metallic constituents and allophanes in highland soils. *Geoderma* 42: 245-260.
- Bouma, J. 2002. Land quality indicators of sustainable land management across scales. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88 (2): 129 - 136.

- Bouma, J. 1997. Soil environmental quality: a European perspective. *J. Environ. Qual.* 26, pp. 26 - 31.
- Brailovsky, A.E., Foguelman, D. 1991. Memoria verde. Historia ecológica de la Argentina. Ed. Sudamericana, Buenos Aires, 350 pp.
- Bricchi, E. 1995. Condición física de los suelos del Centro de Córdoba RELATO. Reunión Nacional del Comité de Física de suelos de la Asoc. Argentina de la Ciencia del Suelo. Actas pag. 11-12.
- Bricchi, E. 1996. Relación entre la compactación, morfología y propiedades físicas de un Hapludol típico de Río Cuarto. Tesis de Maestría. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Bricchi, E., Formía, F., Espósito, G., Riberi, L., Aquino, H. 2004. The effect of topography, tillage and stubble grazing on soil structure and organic carbon levels. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2: 409 - 418.
- Bricchi, E., Cisneros, J., Formía, F., Uberto, M., Gimenez, M., Talano, P. 1999. Informe: Programa de evaluación de suelos en siembra directa: Caracterización de la condición química de los suelos en Estancia Las Lomas, Villa Valeria, Córdoba. 4 pp.
- Bricchi, E., Cantero, A., Bonadeo, E. 1991. Caracterización física de los principales subgrupos de suelos y su relación con cultivos y sistemas de labranzas en el suroeste de Córdoba. *Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*: 21-22.
- Cabrera, A.L. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. Tomo II, Fascículo 1. Ed. Acme, Buenos Aires.
- Cabrera, A.L. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. *Bol. Soc. Arg. Bot.* 14 (1-2): 1-42.
- Cadisch, G., Imhof, H., Urquiaga, S., Boddey, R.M., Giller, K.E. 1996. Carbon turnover ( $^{13}\text{C}$ ) and nitrogen mineralization potential of particulate light soil organic matter after rainforest clearing. *Soil Biology and Biochemistry* 28 (12): 1555-1567.
- Calegari, A., Darolt, M.R., Fero, M. 1998. Towards sustainable agriculture with a no-tillage system. *Advances in GeoEcology* 31: 1205-1209.
- Campbell, C.A. 1978. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. p. 173-272. In M. Schnitzer and S.U. Khan (Ed.) *Soil organic matter*. Elsevier Scientific Publ. Co. Amsterdam.
- Cantero, A., Cantú, M., Bricchi, E., Hampp, E., Becerra, V., Bonadeo, E., de Ponce, I. 1981. Principales asociaciones de suelos en la cuenca del sistema Arroyo Sta. Catalina-Del Gato- Laguna Tigre Muerto (600.000 has) Escuela de graduados UNRC, 50 pp. y una carta.
- Cantero, A., Bricchi, E., Hampp, E., Becerra, V., Cantú, M., De León, L., Moreno, I, Gil, H., Ponce, I. 1983. Estudio esquemático de los suelos de la región de Río Cuarto (2.000.000 has.) I Jornadas Científico-Técnicas FAV Actas pag. 14.
- Cantero, A., Bricchi, E., Becerra, V., Cisneros, J., Gil, H. 1984. Zonificación y descripción de tierras del Departamento Río Cuarto (Córdoba). Adhesión al bicentenario de la ciudad de Río Cuarto. Compaginación, diagramado e impresión en Talleres Gráficos de la UNRC. 80 pp.
- Cantero, A., Bricchi, E., Cisneros, J., Gil, H. 1987 a. Aplicación de un índice de aptitud relativo de las tierras del Depto Río Cuarto. II J. Científico Técnicas FAV Acta, pag. 143.
- Cantero, A., Bricchi, E., Bonadeo, E., Gallardo, R. 1987 b. Propiedades físicas de los principales subgrupos de suelos del centro suroeste de Córdoba II J. Científico-Técnicas FAV Acta, pag. 146.
- Cantero, A., Cantú, M., Cisneros, J.M., Cantero, J.J., Blarasin, M., Degioanni, A., González, J., Becerra, V., Gil, H., De Prada, J., Degioanni, S., Cholaky, C., Villegas, M., Cabrera, A., Eric, C. 1998. *Las tierras y aguas del sur de Córdoba. Propuestas para un manejo sustentable*. Universidad Nacional de Río Cuarto, 119 pp.
- Cantero, A., Bricchi, E., Becerra, V., Cisneros, J., Gil, H. 1999. Un índice de aptitud relativa de las tierras con fines catastrales. Aplicación al departamento Río Cuarto (Cba. Argentina). *Prod. Prot. Veg.* Vol. 14 (1), España.

- Cantero, A., Cantú, M. 1985. Manejo integrado de los recursos naturales para la optimización de su productividad en el centro sur de la Provincia de Córdoba (Argentina). *Rev. Univ. Nac. Rio Cuarto* 4: 173-175.
- Cantero J.J. 1993. La vegetación y su relación con factores ambientales en ambientes hidrohalmórficos. Tesis de Maestría, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Cantero, J.J., Bianco, C.A. 1986. Las plantas vasculares del suroeste de la Provincia de Córdoba. III. Catálogo preliminar de las especies. *Rev. Univ. Nac. Rio Cuarto* 6: 5 – 52.
- Cantero, J.J., León, R.J. 1996. Comparison of vegetation classifications from Argentine saltmarsh landscapes. *Abstracta Botánica* 20 (2): 69 – 83.
- Cantero, J.J., León, R.J. 1999. The vegetation of saltmarshes in central Argentina. *Beitr. Biol. Pflanzen* 71: 203 – 242.
- Cantero, J.J., Petryna, L. 1998. La vegetación de los saladares y humedales del centro de Argentina. *Itinera Geobotánica* 11: 173 – 193.
- Cantero, J.J., Cisneros, J.M., Zobel, M., Cantero, A. 1998 a. Environmental relationships of vegetation patterns in saltmarshes of central Argentina. *Folia Geobotanica* 33: 133 – 145.
- Cantero, J.J., Leon, R., Cisneros, J.M., Cantero, A. 1998 b. Habitat structure and vegetation relationships in central Argentina salt marsh landscapes. *Plant Ecology* 137: 79-100.
- Cantero, J.J., Nuñez, C., Geymonat, M., Chiacchiera, G. 1996. Zonificación y descripción de gramíneas de las sierras de Comechingones (Córdoba, Argentina) por caracteres morfológicos. *Revista Parodiana* 9 (1-2): 45-88.
- Cantú, M. 1998. Estudio geocientífico para la evaluación ambiental y la ordenación territorial de una cuenca pedemontana. Caso: cuenca del arroyo La Colacha, Córdoba. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- Cantú, M. P., Degiovanni, S. 1984. Geomorfología de la región centro-sur de la provincia de Córdoba. IX Congreso Geológico Argentino. Actas IV: 76 – 92. San Carlos de Bariloche.
- Cantú, M., Cantero, A. 1981. Carta de unidades fisiográficas de la cuenca del sistema arroyos Santa Catalina – El Gato – Laguna Tigre Muerto. Escuela de Graduados Universidad Nacional de Río Cuarto, 3 pp.
- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, J.W., Doran, J.W., Janzen, H.H., Pierce, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (eds.), *Soil quality for Crop Production and Ecosystem Health*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 1 – 19.
- Chantigny, M.H., Angers, D.A., Prévost, D., Vézina, L.P., Chalifour, F.P. 1997. Soil aggregation and fungal and bacterial biomass under annual and perennial cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 262-267.
- Christensen, B.T. 1996. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: M.R. Carter & B.A. Stewart (eds.) *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. pp 97-165. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- Cisneros, J.M. 1994. Caracterización del hidrohalmorfismo en ambientes representativos del centro-sur de Córdoba. Tesis de Maestría, Universidad de Buenos Aires.
- Cisneros, J.M., Cantero, J.J., Cantero, A. 1999. Vegetation, soil hydrophysical properties, and grazing relationships in saline-sodic soils of Central Argentina. *Can. J. Soil Sci.* 79: 399-409.
- Cisneros, J.M., Cholaky, C., González, J., Uberto, M., Cantero, J.J. 2000. Interacciones suelo-pastoreo en las sierras de Comechingones (Córdoba). XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, 4 pp., en CD.
- Collins, H.P., Elliott, E.T., Paustian, K., Bundy, L.G., Dick, W.A., Huggins, D.R., Smucker, A.J.M., Paul, E.A. 2000. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 157-168.
- Cooper, A.J. 1973. "Root Temperature and Plant Growth. A Review." *Commonwealth Agricultural Bureaux*, 73 pp.



- De Grazia, J. "El empleo de los modelos de materia orgánica en el monitoreo de la sustentabilidad de los agroecosistemas. II. Monitoreo del carbono edáfico en sistemas disturbados." Tesis de Maestría, Escuela de Posgraduación, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto. Inédito.
- De Prada, J.D., Boretto, J., Ferrando, M., García, A.A., Olmos, J., Sánchez, M. 1994. Proyecto de conservación y ordenamiento de tierras - General Deheza, Córdoba. Tomo I. Maestría en Formulación, Evaluación y Administración de Proyectos de Inversión. Universidad Nacional de Córdoba. 150 pp.
- De Wit, C.T. 1972. Resource use efficiency in agriculture. *Agricultural Systems* 40: 125 – 151
- Doran, J. W. 2001. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88 (2): 119 – 127.
- Doran, J.W., Sarrantonio, M., Liebig, M.A. 1996. Soil health and sustainability. In *Advances in Agronomy*, Vol. 56 D.L. Sparks (ed.). Academic Press, San Diego, CA, pp. 1-54.
- Doran, J.W., Parkin, T.B. 1994. Defining and assessing soil quality: In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, Madison, WI. Soil Sci. Soc. Am. 35, 3 – 21 (special publication).
- Dumanski, R. 1978. The Canada Soil Information System. Manual for describing soils in the field. Agriculture Canada, Ap. Ottawa, 92 pp.
- Eswaran, H. 1994. Soil resilience and sustainable land management in the context of AGENDA 21. p. 21-32. In: *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. D.J. Greenland and Szabolcs (Eds.). CAB Int., Wallingford, Oxon.UK.
- FAO, 2002. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2000 – Informe principal. Estudio FAO Montes No. 140. Roma, Italia. [Http: www.fao.org/ forestry](http://www.fao.org/forestry)
- FAO, 1997. Land quality indicators and their use in sustainable agriculture and rural development. FAO Land and Water Bulletin No. 5. FAO, Rome, 212 pp.
- FAO, 1993. FESLM: an international framework for evaluating sustainable land management. World Resource Report 73. FAO, Rome, Italy.
- Feller, C. 1995. La matière organique dans le sols tropicaux á argile 1:1. Recherche de é compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Collection TDM, no. 144, Orstom, Paris, 393 pp.
- Feller, C., Beare, M.H. 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79: 69 – 116.
- Gijsman, A., Hoogenboom, G., Parton, W.J., Kerridge, P.C. 2002. Modifying DSSAT Crop Models for Low-Input Agricultural Systems Using a Soil Organic Matter-Residue Module from CENTURY. *Agronomy Journal* 94: 462-474.
- Gil, H., Cantero, A., Becerra, V., Bricchi, E., Ponce, I., Moreno, I. 1983 a. Influencia de la Enmienda orgánica sobre las propiedades de Hapludoles y Argiudoles de Río Cuarto. I Jornadas Científico-Técnicas FAV Actas, pag. 51.
- Gil, H., Cantero, A., Becerra, V., Bricchi, E. 1983 b. Plan básico de conservación de suelos consorcio "Alto Lindo". I Jornadas Científico-Técnicas FAV Acta, pag. 54.
- Giller, K.E. 2001. Nitrogen fixation in tropical cropping systems. CABI Publishing, Wallingford, Oxon, UK. 423 pp.
- González, J. 1999. Sistemas de información geográfica (SIG) y modelos hidrológicos: articulación para el estudio de una cuenca representativa en Córdoba (Argentina). Tesis de Maestría Universidad Nacional del Comahue, Neuquén. 188 pp.
- González, J., Piazza, M., Cantú, M. 1996. Caracterización de las tierras en la cuenca del arroyo Achiras como base para el ordenamiento territorial. Dpto. Río Cuarto, Córdoba. IV Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra (Chile), Actas pp. 96.
- González, O., Cantero, A., Cantú, M., Bricchi, E., Becerra, V. 1983. Plan básico de conservación de suelos "La Aguada Sur" I Jornadas Científico-Técnicas FAV Acta pag. 52.



- Gordillo, C., Lencinas, A. 1979. Las sierras pampeanas de Córdoba y San Luis. En: Simposio Geología Argentina. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba (Argentina), pp. 557-650.
- Gupta, S.C., Larson, W.E. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter content and bulk density. *Water Resource Research* 15(6): 1633-1635.
- Guggenberg, G, Frey S.D., Six, J., Paustian, K., Elliott, E.T. 1999. Bacterial and fungal cell-wall residues in conventional and no-tillage agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1188-1198.
- Hampp E., Cantero A., Bricchi, E. 1983. Relaciones entre algunas propiedades de los suelos y condiciones climáticas de la región de Río Cuarto. I Jornadas Científico-Técnicas FAV Actas, pag. 15.
- Hassink, J., Bouwman, L.A., Zwart, K.B., Bloem, J., Brussaard, L. 1993. Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralisation in grassland soils. *Geoderma* 57: 105 – 128.
- Hassink, J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil* 191: 77-87.
- Herrera, M.A., Beltrán de Solís, M.A., Galera, F.M., Luti, R., Menghi, M. 1978. Incendio y pastoreo en estepas de altura de las Sierras Chicas de Córdoba. *Ecología* 3: 95 – 99.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego, CA, USA. 771 pp.
- Holland, E.A., Parton, W.J., Detling, J.K., Coppock, D.L. 1992. Physiological responses of plant populations to herbivory and their consequences for ecosystem nutrient flows. *Am. Nat.* 140(4): 685-706.
- Holling, C. S. 2000. Theories for sustainable futures. *Conservation Ecology* 4 (2): 7.
- INTA – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 1998. Carta de Suelos y vegetación de la Provincia de San Luis. Escala 1:500000.
- INTA – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 1994 Atlas de Suelos de la República Argentina. Hoja 3366-18 Alpa Corral; Hoja 3366-12 Río de los Sauces. Escala 1:100000.
- INTA – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Provincia de Córdoba. Escala 1:500000.
- INTA – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 1986. Atlas de Suelos de la República Argentina. Hojas Laboulaye; General Viamonte; General Cabrera, Buena Esperanza. Escala 1:50000.
- Janssen, B. 2002. *Organic Matter and Soil Fertility*. Department of Environmental Sciences, sub-Department of Soil Quality. CM No. 06172101. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. 237 pp.
- Janssen, B., Van der Weert, R. 1977. The influence of fertilisers. Soil organic matter and soil compaction on maize yield on the Surinam “Zanderij” soils. *Plant Soil* 46: 445-458.
- Jenkinson, D.S., Rayner, J.H. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.* 123: 298-305.
- Jenkinson, D.S. 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen. *Philos. Trans. R. Soc. London B* 329: 361-368.
- Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill, New York. Pp. 104-196.
- Jenny, H. 1965. Soil nitrogen and its dependence on environmental factors. *Zeits. Pflanzenern. D. Bodenk.* 109: 97-112.
- Juma, N.C., Paul, E.A. 1981. Use of a tracer and computer simulation techniques to assess mineralization and immobilization of soil nitrogen. In: Frissel, M.J. & van Veen, J.A. (eds.) *Simulation of nitrogen behaviour of soil-plant systems*. Pp. 145 – 154, PUDOC, Wageningen.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Kline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4 – 10.

- Kelly, R.H., Parton, W.J., Crocker, G.J., Grace, P.R., Klir, J., Körschens, M., Poulton, P.R., Richter, D.D. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the CENTURY model. *Geoderma* 81: 75 - 90.
- Kononova, M.M. 1975. Humus of virgin and cultivated soils. In: Gieseking, J.E. (Ed.): *Soil Components. Vol. I. Organic Components*: 475-526.
- Kortleven, J. 1963. Quantitative aspects of humus accumulation and decomposition. *Landbk. Onderz.* 69. 1. Pudoc, Wageningen. 109 pp.
- Koslovski, F. 1972. Structural functional and mathematical model of migrational landscape geochemical processes. *Soviet Soil Sci.* 4 (2): 228 - 243.
- Ladd, J.N., Amato, M., Oades, J.M. 1985. Decomposition of plant material in Australian soils III. Residual organic and microbial biomass C and N from isotope-labelled legume material and soil organic matter, decomposing under field conditions. *Aust. J. Soil Res.* 23: 603-611.
- Lal, R. 1997. Sustainable Land Use Systems and Soil Resilience. In: Greenland, D.J., Szabolcs, L. (eds.) *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. pp. 41 - 67.
- Larson, W.E., Pierce, F.J. 1994. Conservation and enhancement of soil quality. In *Evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol. 2: Technical papers. International Board for Research and Management, Bangkok, Thailand. IBSRAM Proceedings No. 12(2)*, pp. 175-203.
- Leffelaar, P. 1993. On system analysis and simulation of ecological processes, with examples in CSMP and FORTRAN. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 294 pp.
- Leguía, H., Pietarelli, L., Luque, S.M., Sánchez, J., Alessandria, E. Arborno, M., Zamar, J.L. 2004. El bosque nativo como referente del deterioro de los suelos agrícolas. *LEISA Vol. 19*: 28 - 31.
- León, R.J.C., Anderson, D.L. 1983. El límite occidental del pastizal pampeano. *Tuexenia* 3: 67 - 83.
- León, R.J.C., Rusch, G.M., Oesterheld, M., 1984. Pastizales pampeanos - impacto agropecuario. *Phytocoenología* 12, 201- 218.
- Linacre, E.T. 1977. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agric. Meteorol.* 18: 409-424.
- López-Ridaura, S., Maser, O., Astier, M. 2000. The MESMIS framework. *LEISA Vol. 16*: 28 - 30.
- Ludwig, D., Walker, B., Holling, C.S. 1997. Sustainability, stability and resilience. *Conserv. Ecol.* 1 (1): 7.
- Luti, R., Beltrán de Solís, M., Galera, M., Muller de Ferreira, N., Berzal, M., Nores, M., Herrera, M.A., Barrera, J.C. 1979. Vegetación. En: *Geografía física de la Provincia de Córdoba*. Vazquez, J.B., Miatello, R.A. y Roque, M.E. (Eds.) Ed. Bolt. Córdoba, Argentina.
- Merckx, R., Den Hartog, A., van Veen, J.A. 1985. Turnover of root-derived material and related microbial biomass formation in soils of different texture. *Soil Biology and Biochemistry* 17: 565-569.
- McGill, W.B., Cole, C.V. 1981. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma* 28: 267-286.
- Menghi, M., Beltrán de Solís, M., Galera, M., Herrera, M.A., Luti, R. 1978. Productividad primaria de los pastizales de altura de las Sierras Chicas de Córdoba. *Ecología* 3: 101 - 110.
- Metherell, A.K. 1992. Simulation of Soil Organic Matter Dynamics and Nutrient Cycling in Agroecosystems. Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins.
- Michelena, R.O., Ururtia, C.B., Pittaluga A., Vavruska, F. 1988. Degradación de los suelos en el sector norte de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 6: 60-66.
- Monteith, J.L. 1981. Climatic variation and the growth of crops. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* 107: 749-774.

- Moreno, C. Cholaki, C., Lesser, M., Marcos, J. 1996. Efecto de la labranza sobre el contenido de carbono orgánico y su implicancia en la estabilidad estructural. XV Congreso argentino de la ciencia del suelo. Santa Rosa, La Pampa, Argentina.
- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Methods of soil analysis, part 2. Chemical and microbiological properties. A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeny (Eds). Soc. of Am., Inc. Madison, Wisconsin, USA, pp. 539-577.
- Nortcliff, S. 2002. Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88 (2): 161 – 168.
- Odum, E. P. 1984. Properties of agroecosystems. In: Agricultural Ecosystems. Lowrance et al.,eds. New York: Wiley Interscience.
- Odum, E.P., 1989. Ecology and Our Endangered Life-Support Systems. Sinauer Association Incorporation. Sunderland, Massachusetts.
- Ojima, D.S., Parton, W.J., Schimel, D.S., Owensby, C.E. 1990. Simulated impacts of annual burning on prairie ecosystems. In: S.L. Collins and L. Wallance (eds.) Fire in North American Prairies. Univ. of Oklahoma Press, Norman, Oklahoma.
- Orquín, L.E., Gabutti, E.G., Ocaneo, E.N. 1985. Ecología y pastizales naturales – Guía de trabajos prácticos, Universidad Nacional de San Luis, 85 pp.
- Palm, C.A., Giller, K.E, Swift, M.J. 1998. Synchrony: an overview. The Biology and Fertility of Tropical Soils. Tropical Soil Biology and Fertility Program (TSBF) Report 1997 – 1998. World Agroforestry Centre, Nairobi, Kenia. 95 pp.
- Palma, R.M., Arrigo, N.M., Conti, M.E. 1997. Siembra directa y labranza convencional: cambios que produce a largo plazo la fertilización sobre las fracciones de carbono y nitrógeno del suelo. *Rev. Facultad de Agronomía* 17 (3): 313-317.
- Parr, J.F., Papendick, R.I., Hornick, S.B., Meyer, R.E. 1992. Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *Am. J. Alternative Agric.* 7: 5 – 11.
- Parodi, L.R. 1964. Regiones Fitogeográficas Argentinas. Enciclopedia de Agricultura y Jardinería. Tomo II. Ed. Acme. Buenos Aires (Argentina).
- Parton, W.J. 1984. Predicting soil temperatures in a shortgrass steppe. *Soil Sci.* 138:93-101.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V., Ojima, D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 51: 1173-1179.
- Parton, W.J., Stewart, J.W.B., Cole C.V. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biochemistry* 5: 109-131.
- Parton, W.J., McKeown, R., Kirchner, V., Ojima, D.S. 1992. Users guide for the CENTURY model. Soil Organic Matter Model Environment, Technical Documentation, Agroecosystem Version 4.0, Colorado State Univeristy, Fort Collins, CO 80523.
- Parton, W.J., Rasmussen, P.E. 1994. Long term effects of residue management in wheat-fallow: II CENTURY model simulations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 530-536.
- Paul, E.A., Collins, H.P. and Leavitt, S.W. 2001. Dynamisc of resistant soil carbon of Midwestern agricultural soils measured by naturally occurring <sup>14</sup>C abundance. *Geoderma* 104: 239-256.
- Paustian, K, Parton W.J., Person, J. 1992. Modelling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long term plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 476-488.
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E.T., Hunt, H.W. 2000. Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* 48: 147-163.
- Pengue, W.A. 2001. Impactos de la expansión de la soja en Argentina. Globalización, desarrollo agropecuario e ingeniería genética: un modelo para armar. *Biodiversidad* 29, 7 – 14.
- Peña Zubiate, C.A., Maldonado Pinedo, D., Martínez, H. Hevia, R. 1980. Suelos. En: Inventario Integrado de las Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. INTA – Gobierno de la Provincia de La Pampa. Un. Nac. de La Pampa (Eds.), Argentina.



- Pieri, C., Dumanski, J., Hamblin, A., Young, A. 1995. Land Quality Indicators. World Bank Discussion Papers 315. World Bank, Washington DC, USA.
- Powlson, D.S. 1996. Why evaluate soil organic matter models? In Powlson D.S. Smith, P and Jo.U. Smith (eds.) ONATO ASI Series, Vol I 38. Springer-Verlag. Berlin.U. Evaluation of soil organic matter models. pp.3-11.
- Probert, M.E., Dimes, J.P., Keating, B.A., Dalal, R.C., Strong, W.M. 1998. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. *Agricultural Systems* 56: 1-28.
- Probert, M.E., Keating, B.A., Thompson, J.P., Parton, W.J. 1995. Modelling water, nitrogen, and crop yield for a long-term fallow management experiment. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 35: 941-950.
- Puget, P., Angers, D.A., Chenu, C. 1999. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 55-63.
- Ragonese, A.E. 1967. Vegetación y ganadería en la República Argentina. Colec. Científica INTA No. 5, Buenos Aires (Argentina).
- Rasmussen, P.E., Parton, W.J. 1993. Long term effects of residue management in wheat-fallow: I Inputs, yield, and soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 523-530.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Saxton, K.E. 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*: 1316-1328.
- Rogers S., Burns, R.G. 1994. Changes in aggregate stability, nutrient status, indigenous microbial populations and seedling emergence following inoculation of soil with *Nostoc muscorum*. *Biology and Fertility of Soils* 18 (3): 209-215.
- Rovira, A.D. 1993. Sustainable farming systems in the cereal livestock areas of the Mediterranean region of Australia. Keynote paper at the Int. Conf. on Soil Management in Sustainable Agriculture. Wye College, UK., september 1993.
- Ryan, M.G. 1991. Effects of climate change on plant respiration. *Ecol. Appl.* 1: 157-167.
- Sala, O.E., Parton, W.J., Joyce, L.A., Lauenroth, W.K. 1988. Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology* 69:40-45.
- Sala, O.E., Oesteheld, M., León, R.J.C., Soriano, A. 1986. Grazing effects upon plant community structure in subhumid grasslands of Argentina. *Vegetatio* 67: 27-32.
- Sanford, Jr., R.L., Parton, W.J., Ojima, D.S., Lodge, D.J. 1991. Hurricane effects on soil organic matter dynamics and forest production in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico: Results of simulation modelling. *Biotropica* 23(4a): 364-372.
- Schipper, R. A., Jansen, H.G.P., Stoorvogel, J.J., Jansen, D.M. 1995. Evaluating policies for sustainable land use: a sub-regional model with farm types in Costa Rica. In: Bouma, J., Kuyvenhoven, A., Bouman, B.A.M, Luyten, J.C., Zandstra (eds.) *Eco-regional approaches for sustainable land use and food production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. Pp. 377 - 398.
- Selingman, N.G., Van Keulen, H. 1981. PAPRAN: a simulation model for annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. In: Frissel, M.J. & van Veen, J.A. (eds.) *Simulation of nitrogen behaviour of soil plant systems*. Pp 192 - 220, Wageningen, Pudoc.
- Serageldin, I. 2002. Nurturing and nourishing the world's poor: Important roles of horticulture in sustainable development. XXVI International Horticultural Congress, August 12 - 16, 2002, Toronto, Canada.
- Seybold, C.A., Herrick, J.E., Brejda, J.J. 1999. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. *Soil Science* 1644: 224-234.
- Shepherd, K.D., Ohlsson, E., Okalebo, J.R., Ndufa, J.K. 1996. Potential impact of agroforestry on soil nutrient balances at the farm scale in the East African Highlands. *Fertiliser Research* 44: 97 - 99.
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241: 155 - 176.
- Smeck, N.E., Runge, E.C.A., Mackintosh, E.E. 1983. Dynamics and genetic modelling of soil systems. In: Wilding, L.P., Smeck, N.E. & Hall, G.F. (Eds.) *Pedogenesis and Soil*



- Taxonomy. I. Concepts and Interactions. Developments in Soil Science 11A, Elsevier Science Publishers, Amsterdam. pp. 51-81.
- Smyth, A.J., Dumanski, J. 1995. A framework for evaluating sustainable land management. *Can. J. Soil. Sci.* 75: 401-406.
- Sorensen, L.H. 1972. Stabilization of newly formed amino acid metabolites in soil by clay minerals. *Soil Sci.* 114: 5-11.
- Soriano, A. 1991. Rio de la Plata grasslands. In: *Ecosystems of the world 8 A*, Ed. R.T.Copland. Elsevier Amsterdam, pp. 367-407.
- Spitters, C.J.T. 1990. Crop growth models: Their usefulness and limitations. *Acta Hort.* 267: 349 – 368.
- Stevenson, F.J. 1986. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur, micronutrients. John Wiley & Sons Inc. New York.
- Stevenson, F.J. 1994. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. John Wiley & Sons, New York. 496 pp.
- Thornley, J.H.M., Fowler, D., Cannell, M.G.R. 1991. Terrestrial carbon storage resulting from CO<sub>2</sub> and nitrogen fertilization in temperate grasslands. *Plant Cell and Environ.* 14: 1007-1011.
- Tisdale, J.M., Oades, J.M. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Tittonell, P., 2003. Soil fertility gradients in smallholder farms of western Kenya. Their origin, magnitude and importance. *Quantitative Approaches in Systems Analysis No. 25*, pp. 233. The C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology & Resource Conservation, in co-operation with the Tropical Soil Biology and Fertility Institute of the International Centre for Tropical Agriculture (TSBF-CIAT), United Nations Avenue, P.O. Box 30677, Nairobi, Kenya.
- Tittonell, P., De Grazia, J., De Hek, S., Bricchi, E. 2004. Exploring land use scenarios of increased agrodiversity by long-term simulation of soil organic matter in central Argentina. *Soil Use and Management*, submitted July 2004.
- Uberto, M., Cisneros, J.M., Viglioco, C., Cholaky, C., Pedelini, R. 2001. Recuperación de la productividad en tierras del area manicera nucleo I. *Propiedades físicas*. *Actas de XVI Jornadas Nacionales de Maní, Gral. Cabrera, Córdoba*, pp. 16-18.
- Valero, C., Degiovanni, S., Bricchi, E., Bonadeo, E. 1984. Estudio preliminar para el ordenamiento y mejor aprovechamiento del agua en el geosistema Arroyo Jaguales. *V Jor. Cientificas de la Fac Cs. Exactas U.N.R.C.*
- Van Heemst, H.D.J. 1986. Physiological principles. In: *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*. H. Van Keulen, J. Wolf (eds.) Pudoc Wageningen. 13-26.
- Van Ittersum, M.K., Rabbinge, R., Van Latesteijn, H.C. (1998) Exploratory land use studies and their role in strategic policy making. *Agricultural Systems* 58: 309 – 330.
- Van Keulen, H. 2001. (Tropical) soil organic matter modelling: problems and prospects. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61: 33 – 39.
- Van Keulen, H. 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen, The Netherlands, 184 pp.
- Vanlauwe, B., Wendt, J., Diels, J. 2001. Combined applications of organic matter and fertilisers. In: *Sustaining Soil Fertility in West Africa Vol. ASSA, SSSA, Madison, Wisconsin*, pp. 247 – 279.
- Van Veen, J.A., Paul, E.A. 1981. Organic C dynamics in grassland soils. I Background information and computer simulation. *Can. J. Soil Sci.* 61: 185-201.
- Van Wambeke, A., Scoppa, C.O. 1976. Los regímenes hídricos de los suelos argentinos, calculados sobre la base de los registros climáticos. *INTA – IDIA Supl.* 33: 388-401.
- Vazquez, M.E., Berasategui, L.A., Chamorro, E.R., Taquini L.A., Barberis, L.A. 1990. Evolución de la calidad estructural y diferentes propiedades químicas según el uso de los suelos en tres áreas de la pradera pampeana. *Ciencia del Suelo* 8: 203-210.
- Voroney, R.P., Van Veen J.A., Paul, E.A. 1981. Organic C dynamics in grassland soils.

- Warkentin, B.P. 1995. The changing concept of soil quality. *J. Soil Water Conserv.* 50: 226-228.
- Wosten, J.H.M., Van Genuchten, M.T. 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1762-1770.
- Yang, H.S. 1996. Modelling organic matter mineralization and exploring options for organic matter management in arable farming in Northern China. PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Yang, H.S., Janssen, B.H. 2000. A mono-component model of carbon mineralization with a dynamic rate constant. *European Journal of Soil Science* 51: 517 – 529.
- Zingore, S. 2002. Long-term soil organic matter dynamics studies in Zimbabwean soils using chronosequences of land clearance and simulation modelling. MSc Thesis, Department of Soil Science and Agricultural Engineering, University of Zimbabwe.

# Imágenes

## 1. Mapa original de Cantú y Degiovanni (1984)

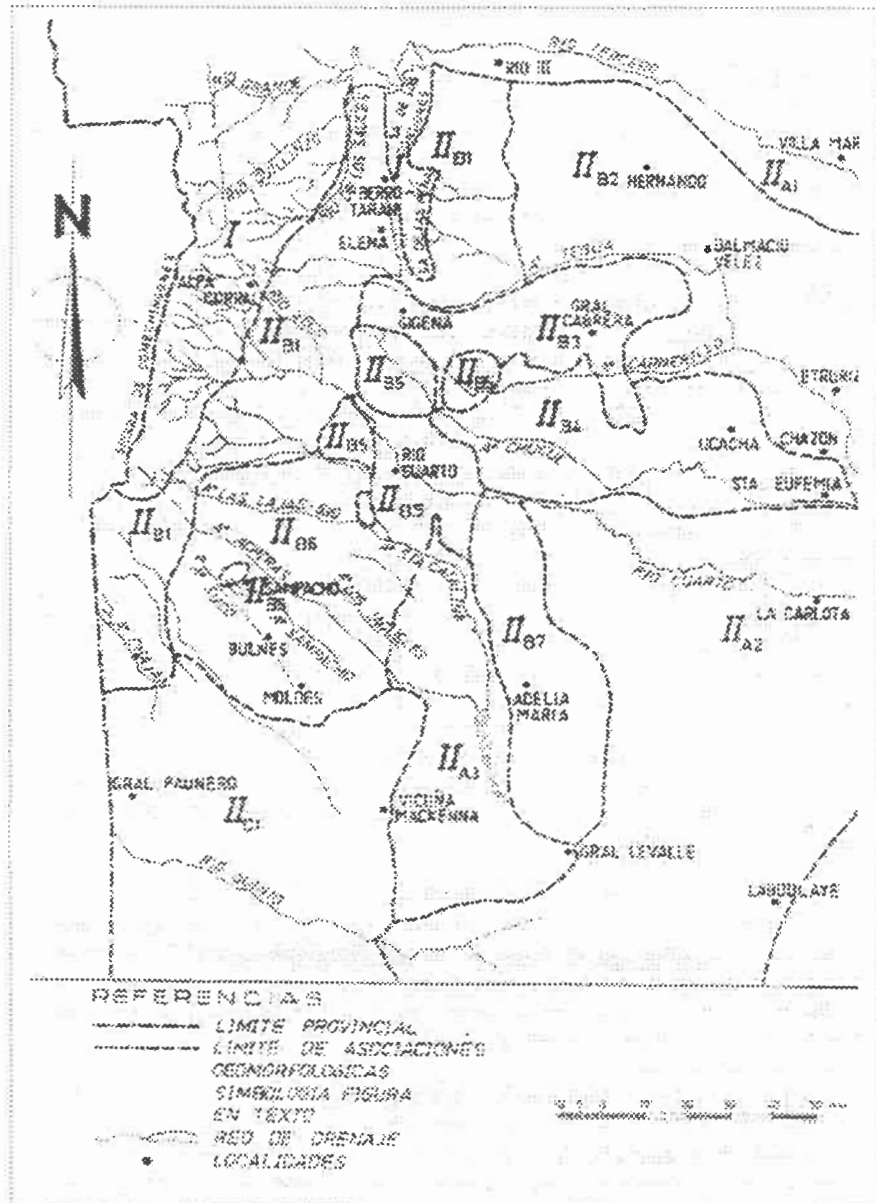


Imagen 1: Subdivisión regional por asociaciones geomorfológicas realizada por Cantú y Degiovanni (1984) para el sur de la provincia de Córdoba. I: Provincia geomorfológica Sierras pampeanas; II: Provincia geomorfológica Llanura chacopampeana (IIA: Región fluvial subhúmeda; IIB: Región eólica loésica subhúmeda; IIC: Región eólica arenosa subhúmeda transicional).



## Imágenes (cont.)

### 2. Llanuras bien drenadas

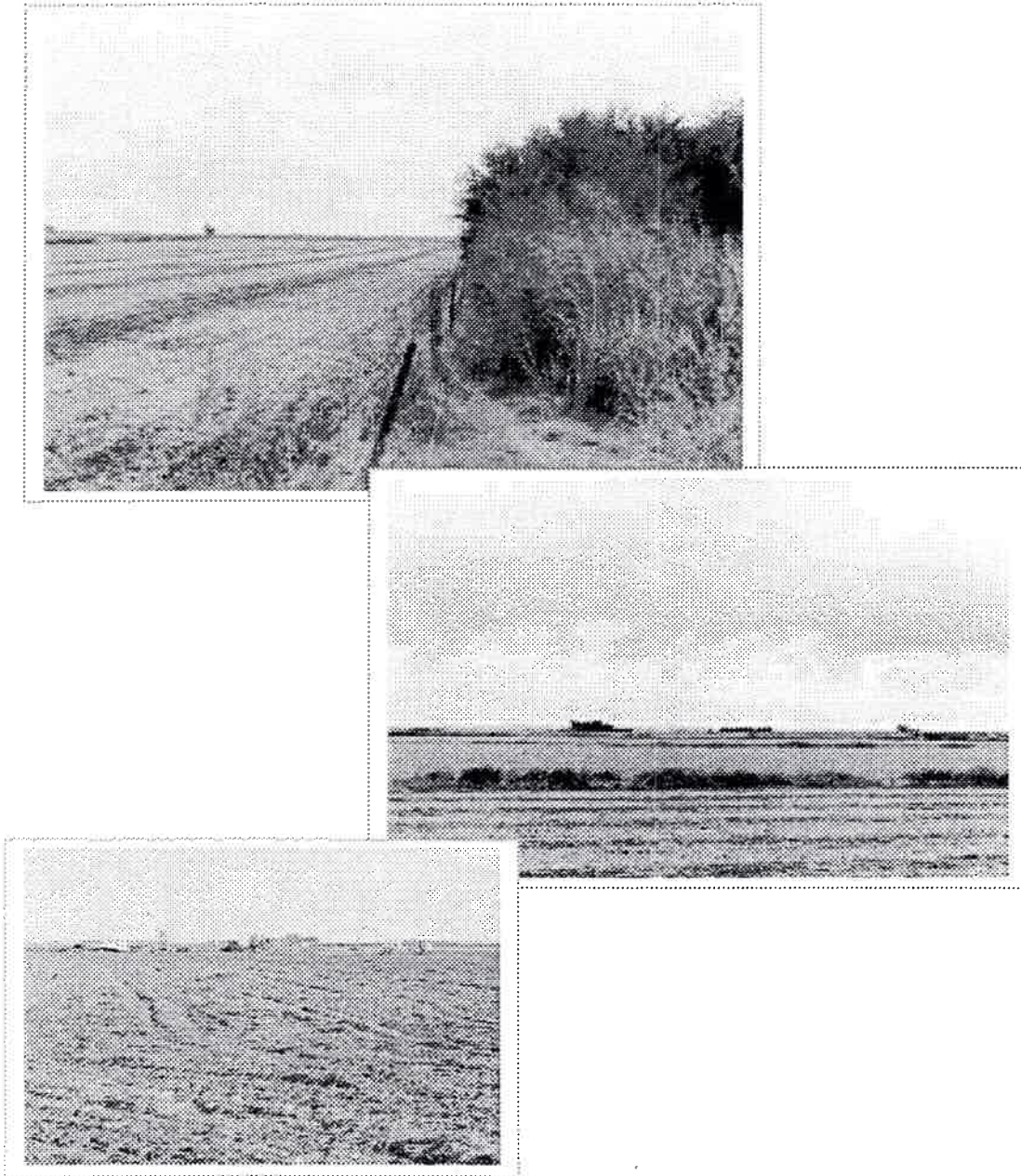


Imagen 2: (arriba) Situaciones contiguas de elevada y relativamente baja alteración antrópica; (centro) cultivo en franjas. Las fotografías fueron tomadas durante el relevamiento de un establecimiento ubicado 30 km al N de la localidad de Gral. Cabrera. (abajo) Cosecha de maní cerca de Chaján, Provincia de Córdoba.



## Imágenes (cont.)

### 3. Llanuras mal drenadas

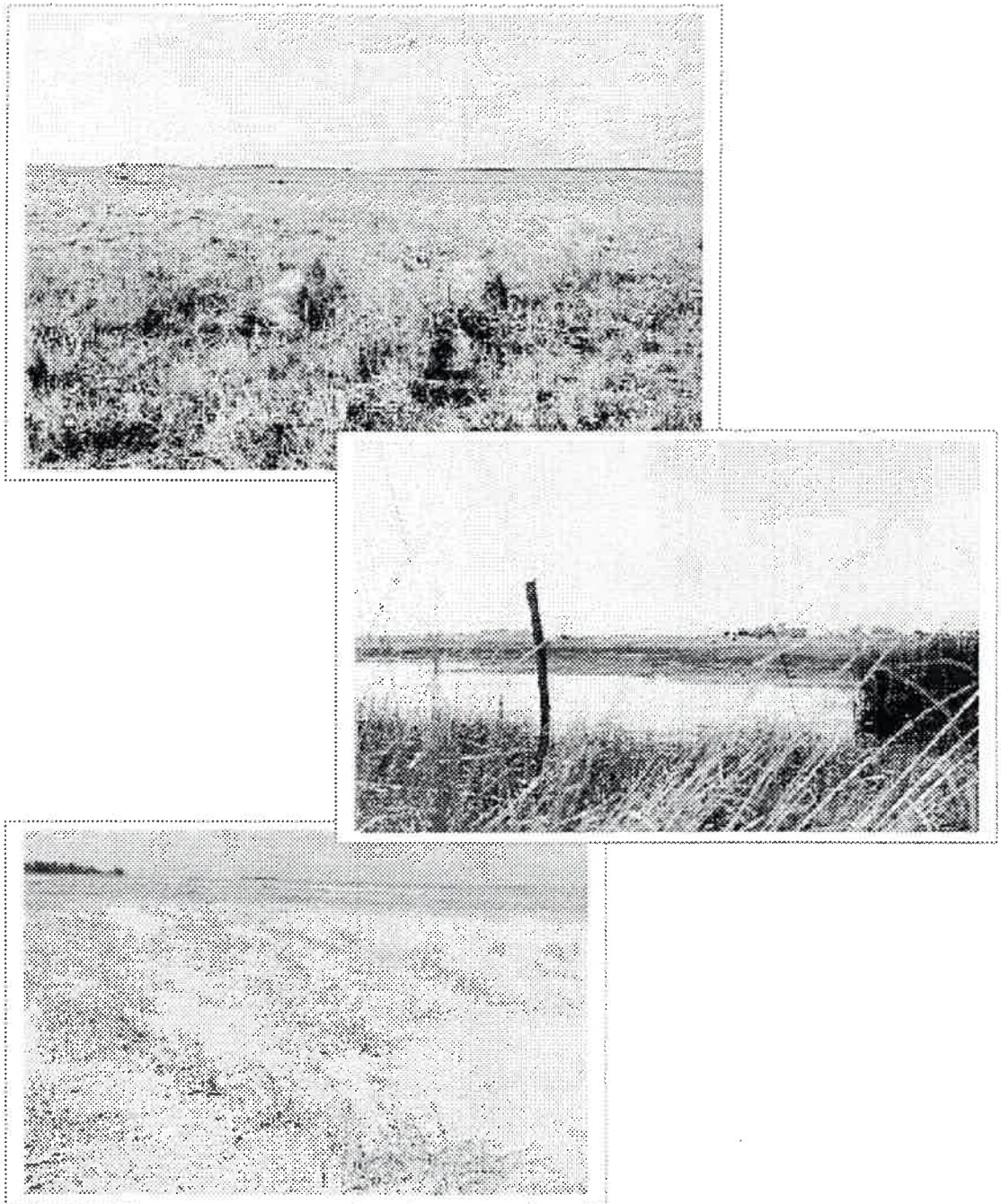


Imagen 3: (arriba) Aspecto general de las planicies mal drenadas; (centro) lagunas semipermanentes; (abajo) acumulación de sales en bordes de lagunas. Las fotografías fueron tomadas en un establecimiento ubicado sobre la ruta provincial N° 4 en las proximidades de la localidad de Laboulaye, Provincia de Córdoba.



## Imágenes (cont.)

### 4. Llanuras medanosas sector noreste

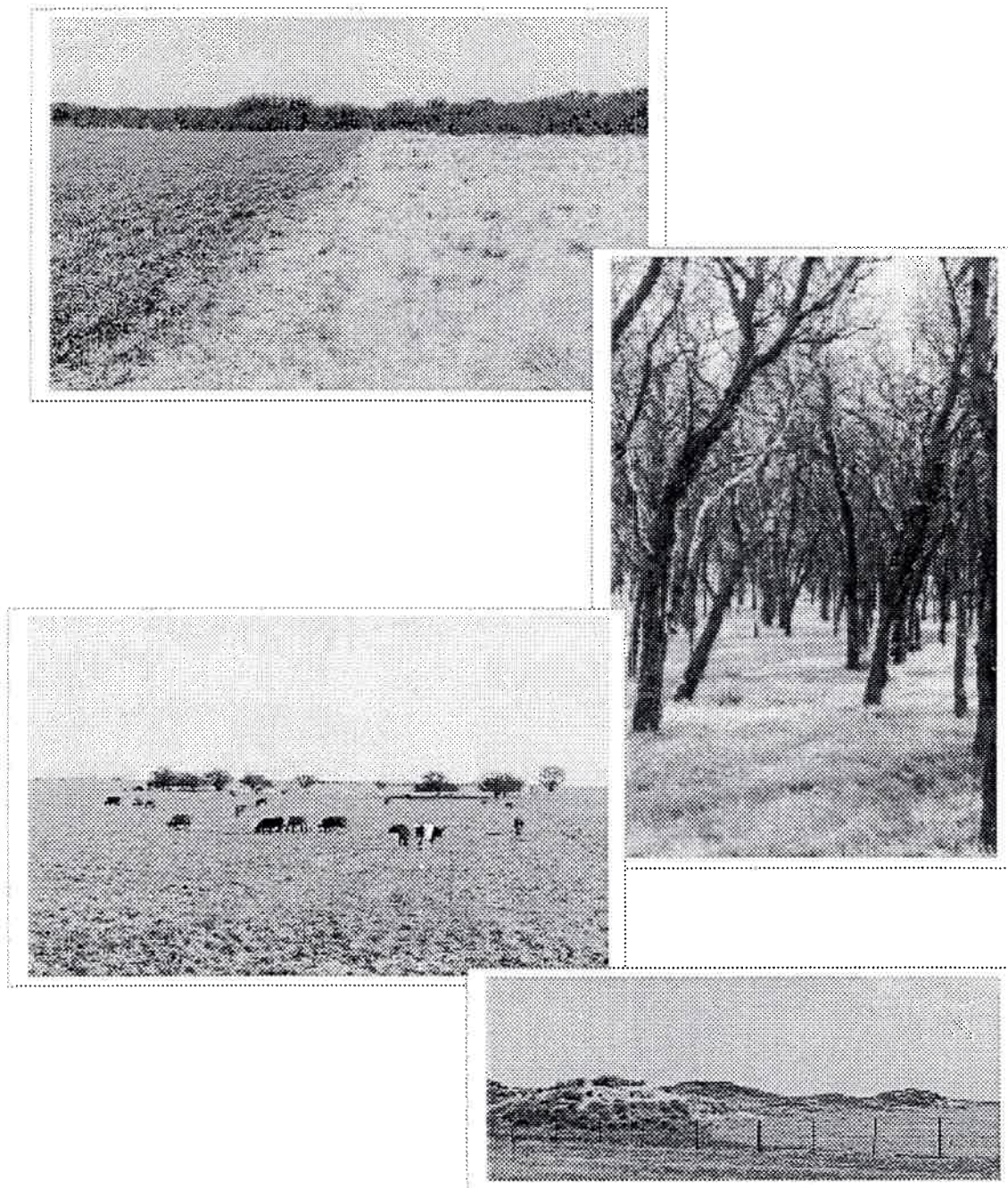


Imagen 4: (arriba) Verdeo de centeno, pastizal natural y monte de chañar; (centro) aspecto de un monte de chañar durante el invierno; (abajo izq.) engorde de ganado sobre verdeos anuales; (abajo der.) cordones medanosos no estabilizados. Las fotografías fueron tomadas durante el relevamiento de un establecimiento ubicado en Cnia. Sarmiento, próximo a la localidad de Vicuña Mackenna, Provincia de Córdoba.



## Imágenes (cont.)

### 5. Llanuras medanosas sectores sur y oeste

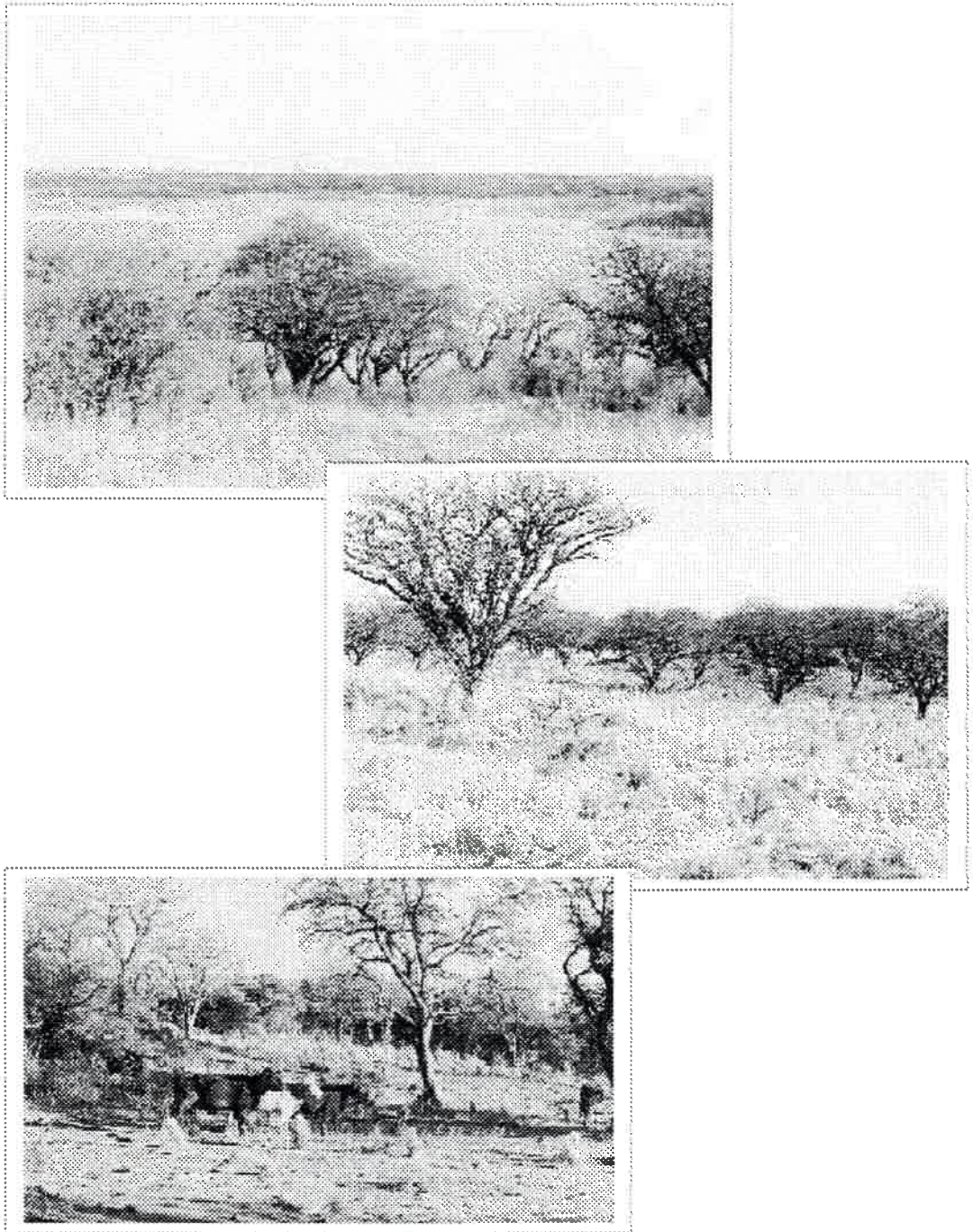


Imagen 5: (arriba) Aspecto general del sector medanoso con lagunas permanentes; imágenes del caldenal bajo fuerte presión antrópica: (centro) extracción de ejemplares dominantes y uso pastoril extensivo, (abajo) uso pastoril con alta carga animal. Las fotografías fueron tomadas a lo largo de una franja entre las localidades de Villa Mercedes al N y Buena Esperanza al S, Provincia de San Luís.



## Imágenes (cont.)

### 6. Sierras y pedemonte

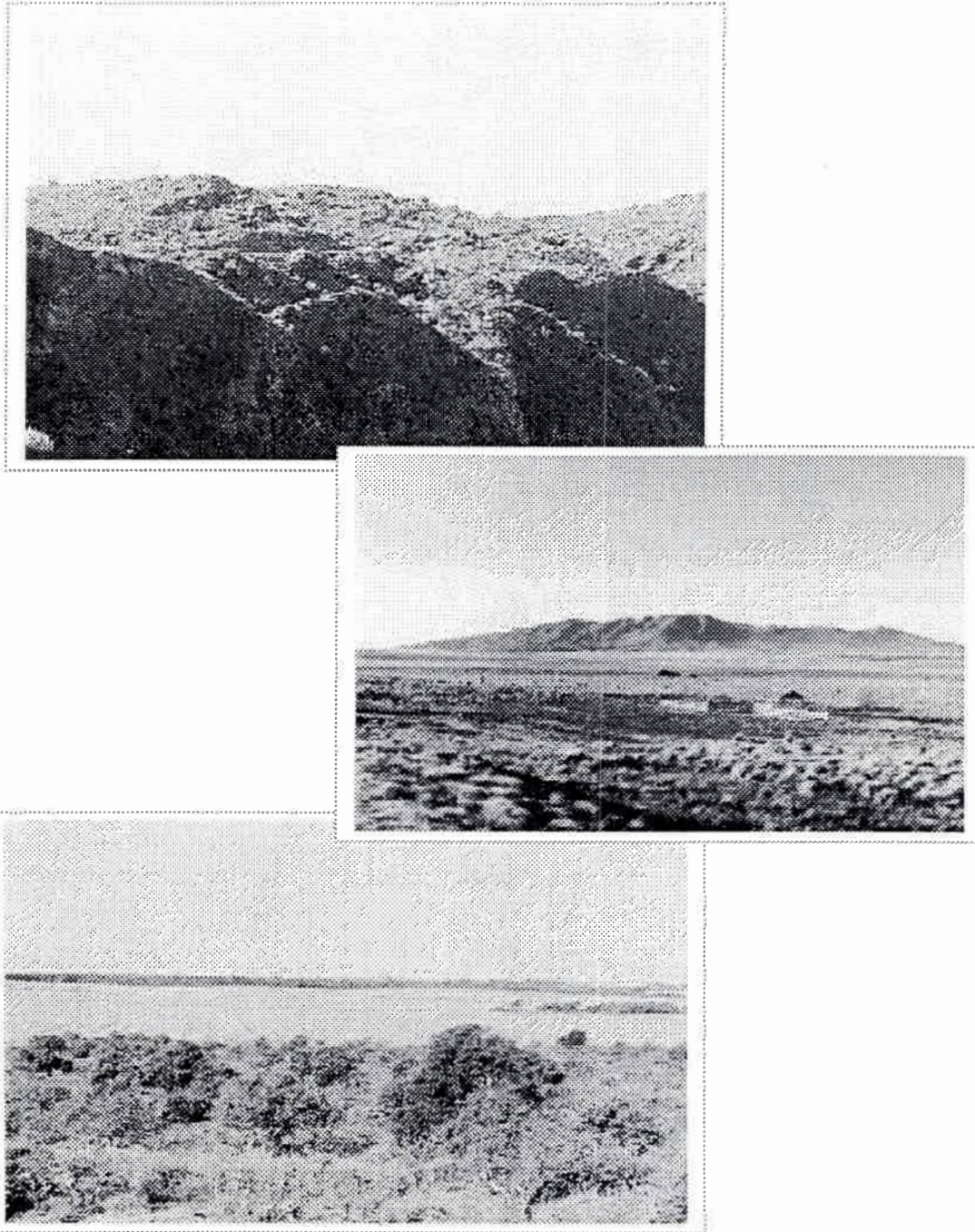


Imagen 6: (arriba) Aspecto general de las formaciones vegetales de altura con componente leñoso; actividades productivas en el pedemonte: (centro) ganadería en el sector austral; (abajo) agricultura en el sector oriental.



## Apéndice I – Parámetros y funciones del modelo

### Cálculo del Escurrimiento en CENTURY

El cálculo del agua de escurrimiento en CENTURY utiliza los parámetros de sitio de la Tabla 2.1 y la siguiente ecuación cuadrática:  $Escurrimiento = A w^2 + B w - C$ . La variable  $w$  representa el total de agua aportada al suelo, mientras que  $A$ ,  $B$  y  $C$  son los coeficientes descriptos en la Tabla A. Asignando el valor cero al coeficiente de segundo orden la ecuación se transforma en una expresión lineal. Si su resultado es negativo, el escurrimiento adquiere valor cero, lo cual provee un valor umbral para el aporte hídrico (ordenada al origen) por debajo del cual no existe escurrimiento.

**Tabla A:** Parámetros de sitio utilizados por defecto en Century para el cálculo del escurrimiento.

Parámetro de Sitio	Descripción	Valor por defecto
RUNOFF 1	Coficiente de segundo orden A (término no lineal)	0
RUNOFF 2	Coficiente de primer orden B (pendiente - linear)	0,55
RUNOFF 3	Constante C (ordenada al origen)	2,75

RUNOFF (\*): nombre dado en el modelo al parámetro de escurrimiento

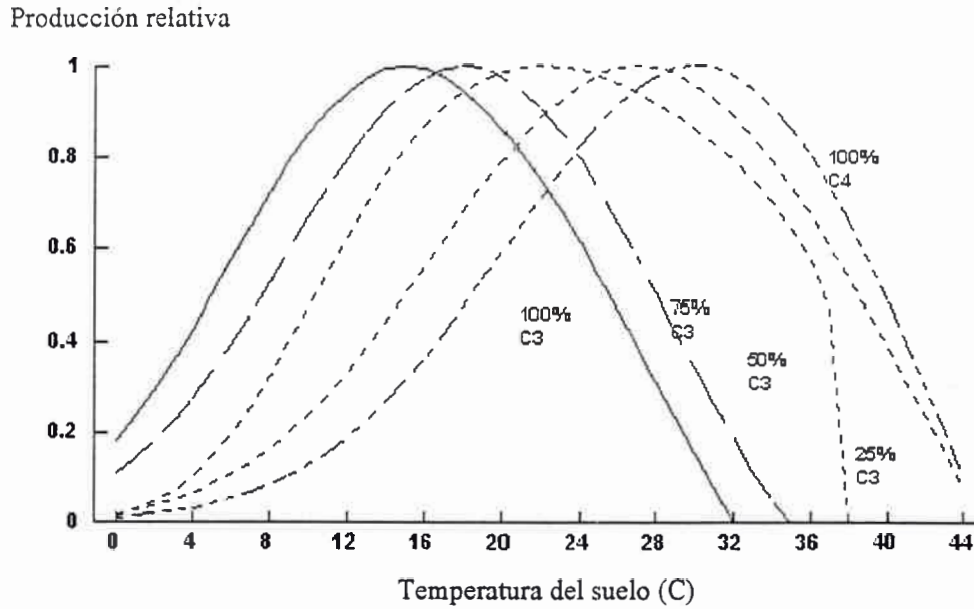
Si todos los parámetros de sitio (coeficientes) adquieren valor cero durante el diseño de la simulación, el modelo utiliza valores por defecto tomados de Probert *et al.* (1995) para parcelas sin cobertura de residuos vegetales. Para parcelas con cobertura de residuos el coeficiente B adquiere un valor de 0,41 y la constante C de 2,87. La versión Century 4.0 utiliza una relación lineal con  $B = 0,15$  y  $C = 1,2$ . Para la cuenca noroeste del río Mississippi se utilizaron relaciones no lineales derivadas de una curva ajustada con datos empíricos (Tabla B).

**Tabla B:** Valores alternativos para los parámetros de la ecuación de escurrimiento.

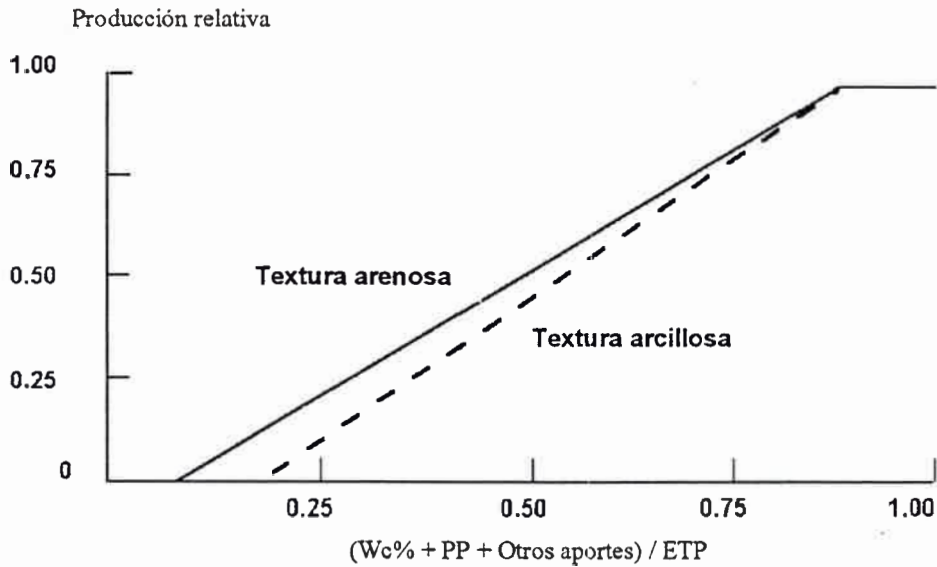
Fuente	A	B	C	Umbral de aporte hídrico (cm)
Valor por defecto sin cobertura	0	0,55	2,75	5,0
Con cobertura (Probert <i>et al.</i> , 1995)*	0	0,41	2,87	7,0
Century 4.0	0	0,15	1,2	8,0
Mississippi (Sharpe <i>et al.</i> , 1998)*	0,013	0,251	1,332	4,3

\*Citados en el original: Parton *et al.*, 1992.

## Apéndice I – Parámetros y funciones del modelo (cont.)

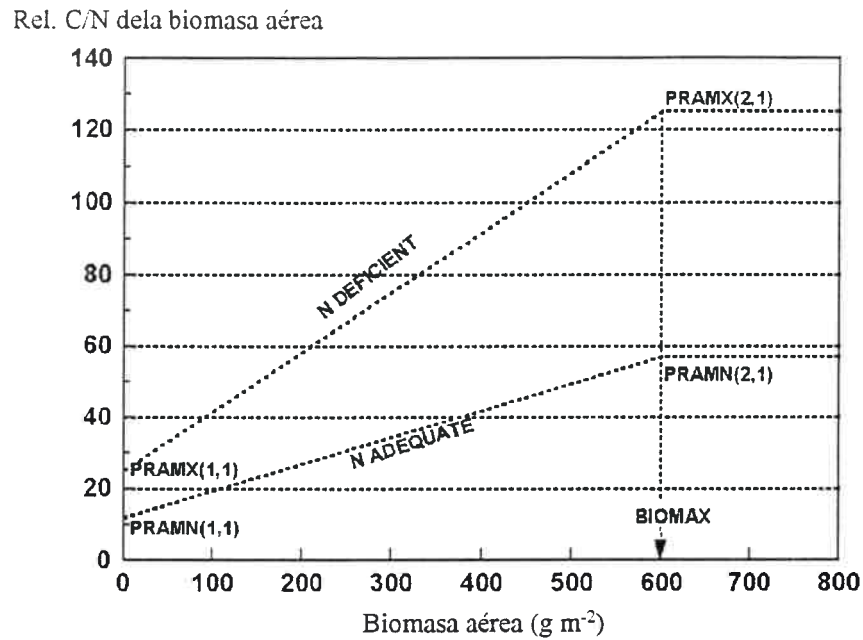


**Figura A:** Función de densidad de Poisson generalizada utilizada para generar los parámetros de respuesta de la tasa de desarrollo de diferentes cultivos a la temperatura.

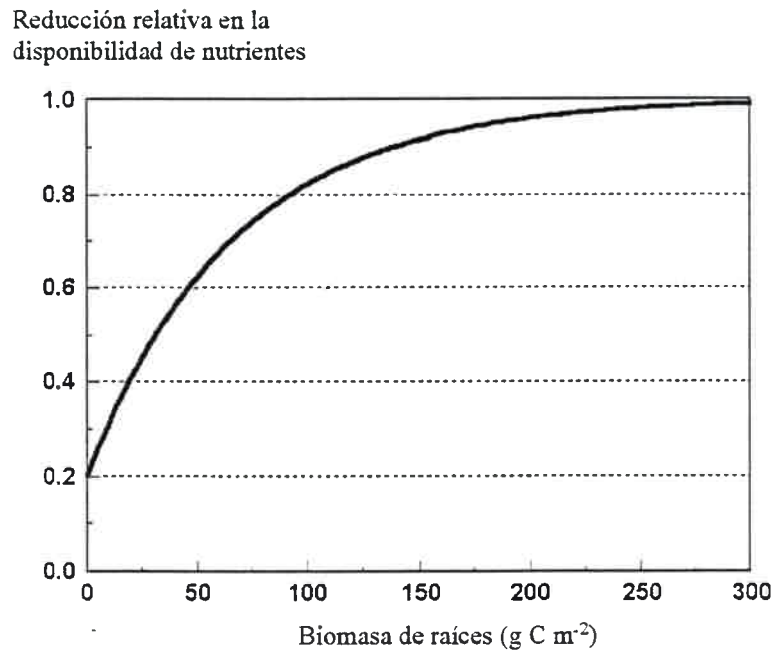


**Figura B:** Efecto de la disponibilidad hídrica sobre la producción potencial de biomasa para suelos de texturas contrastantes. Wc%: contenido hídrico del suelo, PP: precipitaciones, ETP: evapotranspiración potencial.

## Apéndice I – Parámetros y funciones del modelo (cont.)

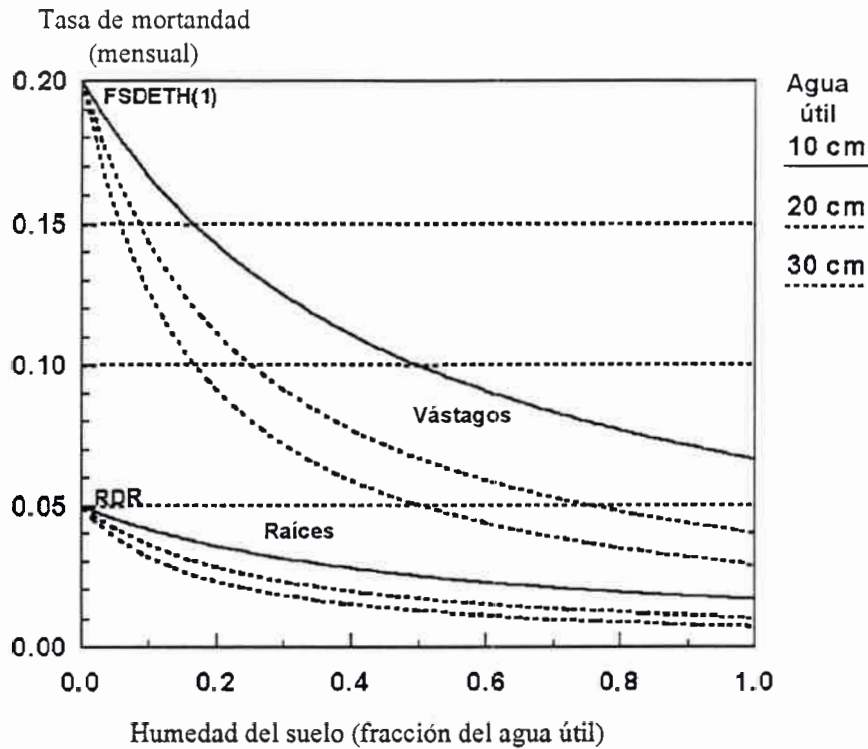


**Figura C:** Relación C/N de la biomasa aérea en función de la cantidad total de biomasa aérea producida para dos situaciones contrastantes (*N deficiente* y *N adecuada*) de disponibilidad de nitrógeno (tomado de Parton *et al.*, 1994). Las curvas encierran los límites que impone el modelo para la concentración de N en los tejidos aéreos. PRAMX (\*) y PRAMN (\*): máxima y mínima concentración tisular de nutrientes, respectivamente.

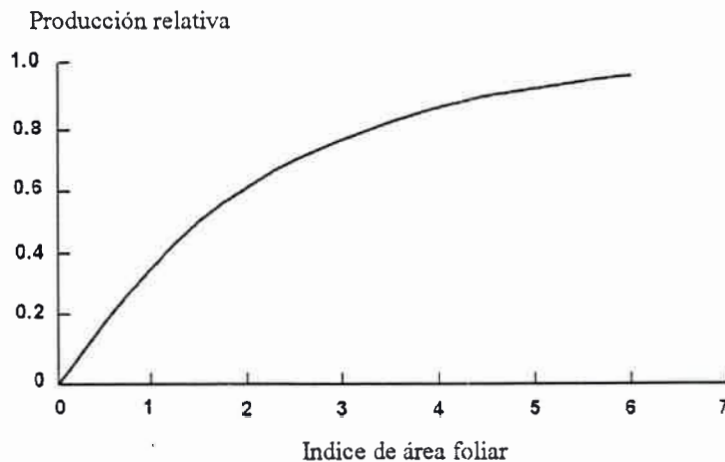


**Figura D:** Factor de reducción para la disponibilidad de nutrientes en función de la biomasa de raíces explorando el perfil (tomado de Parton *et al.*, 1994).

## Apéndice I – Parámetros y funciones del modelo (cont.)



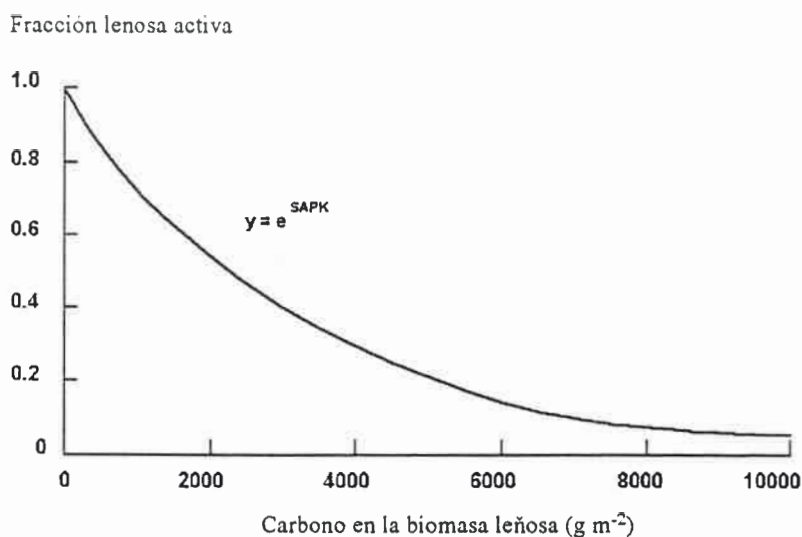
**Figura E:** Efecto de la disponibilidad de agua en el todo el perfil y en la zona radicular sobre la tasa de mortandad de vástagos y raíces, respectivamente, para tres suelos con diferente capacidad de retención hídrica (10, 20 y 30 cm de agua útil). FSDETH y RDR: tasa de mortandad máxima de vástagos y raíces, respectivamente (tomado de Parton *et al.*, 1994).



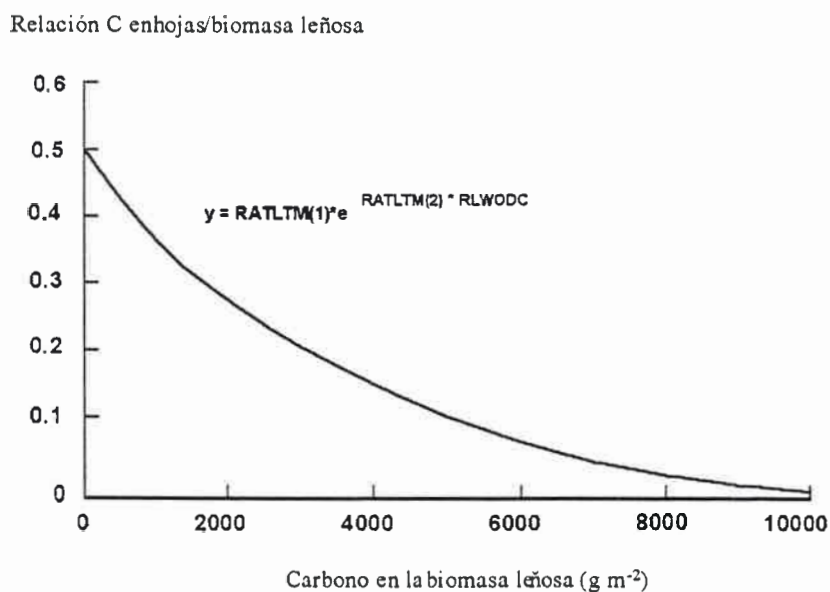
**Figura F:** Factor de reducción para la tasa máxima de producción de biomasa forestal en función del índice de área foliar (hojas activas).



## Apéndice I – Parámetros y funciones del modelo (cont.)

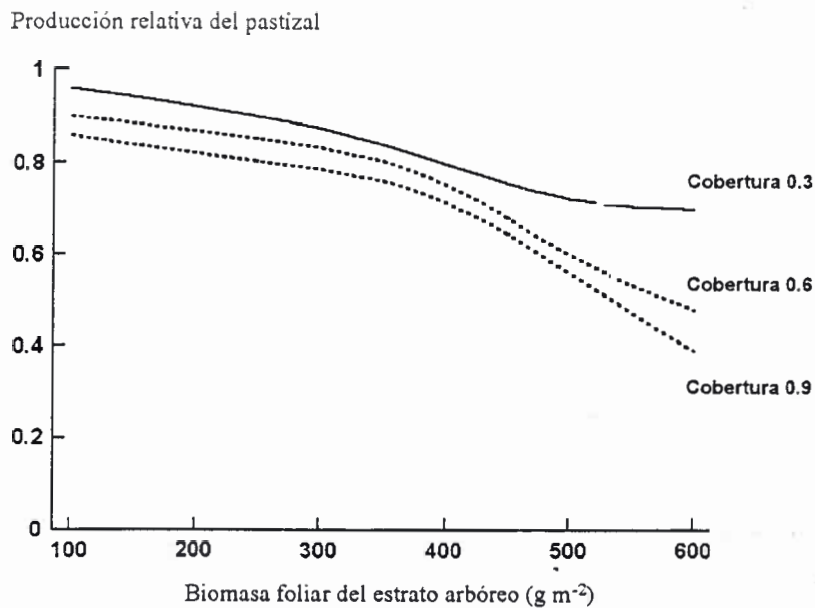


**Figura G:** Fracción lenosa activa en función de la biomasa leñosa total expresada en términos de C. SAPK: parámetro de partición del C entre las fracciones lenosas activa y no activa.

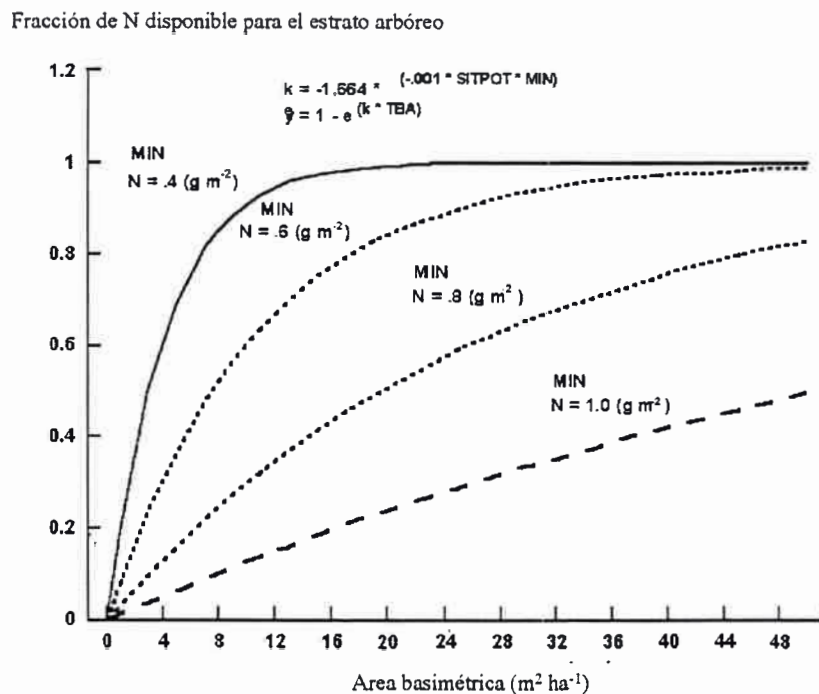


**Figura H:** Proporción de biomasa foliar en función de la biomasa leñosa total expresada en términos de C. RLWODC: C en la biomasa leñosa total; RATLTM: máxima proporción de C foliar en relación a biomasa leñosa activa.

## Apéndice I – Parámetros y funciones del modelo (cont.)



**Figura I:** Factor de reducción de la producción del pastizal en función de la cobertura y biomasa foliar del estrato arbóreo en ecosistemas de tipo sabana utilizado por Century.



**Figura J:** Fracción del N disponible para la absorción por el estrato arbóreo en función de su área basimétrica, para diferentes situaciones de disponibilidad de N. MIN: N mineral disponible ( $\text{g m}^{-2}$ ); TBA: área basimétrica ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ); SITPOT: factor del potencial de sitio forestal.

## Apéndice I – Parámetros y funciones del modelo (cont.)

**Tabla C:** Parámetros de vegetación utilizados por el modelo, correspondientes a un pastizal templado con predominio de gramíneas C3

<i>Descripción del parámetro</i>	<i>Código Century</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Unidad</i>
Producción potencial mensual de biomasa aérea	PRDX(1)	270	g m <sup>-2</sup>
Temperatura óptima parámetro de la distribución Poisson que simula el efecto de la temperatura sobre el crecimiento	PPDF(1)	18	C
Temperatura máxima, parámetro de la distribución Poisson que simula el efecto de la temperatura sobre el crecimiento	PPDF(2)	35	C
Nivel de biomasa muerta en pie al cual el crecimiento es reducido por obstrucción física	BIOK5	60	g m <sup>-2</sup>
Nivel de biomasa aérea que produce 100% de cobertura	FULCAN	100	g m <sup>-2</sup>
Máximo nivel de biomasa aérea a partir del cual la relación C:X* adquiere un valor constante (parámetros PRAMX)	BIOMAX	400	g m <sup>-2</sup>
Mínima relación C:N para la biomasa aérea inicial	PRAMN(1,1)	20	
Mínima relación C:N para la biomasa aérea cuando la misma alcanza biomax	PRAMN(1,2)	30	
Máxima relación C:N para la biomasa aérea inicial	PRAMX(1,1)	30	
Máxima relación C:N para la biomasa aérea cuando la misma alcanza biomax	PRAMX(1,2)	50	
Ordenada al origen para el cálculo de la relación C:N de la biomasa subterránea en función lineal de la precipitación anual	PRBMN(1,1)	50	
Pendiente de la función lineal entre la precipitación anual y la relación C:N de la biomasa subterránea	PRBMN(1,2)	0	
Ordenada al origen de la función lineal entre la precipitación anual y el contenido de lignina de la biomasa aérea	FLIGNI(1,1)	0,02	
Pendiente de la función lineal entre la precipitación anual y el contenido de lignina de la biomasa aérea	FLIGNI(2,1)	0,0012	
Máxima tasa de mortandad de vástagos en condiciones de bajo contenido hídrico del suelo	FSDETH(1)	0,2	
Fracción de vástagos que muere mensualmente durante los meses de senescencia del pastizal	FSDETH(2)	0,95	
Nivel de biomasa aérea por encima del cual el sombreado aumenta la tasa de senescencia	FSDETH(4)	150	g m <sup>-2</sup>
Fracción de vástagos muertos en pie que se incorpora mensualmente al suelo	FALLRT	0,15	
Máxima tasa de mortandad de raíces en condiciones de bajo contenido hídrico del suelo	RDR	0,12	
Umbral de temperatura para la muerte de raíces, afectando a la relación vástago raíz.	RTDTMP	2	C

\* Relación C:X indica en forma genérica C:N, C:P o C:S.

## Apéndice II – Aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos

### 1. Asociaciones geomorfológicas en la sub-región llanuras bien drenadas

#### *Llanuras bien drenadas fuertemente onduladas:*

Ocupan el sector oeste de la sub-región, limitando en forma difusa con el área pedemontana del faldeo oriental de las sierras de Comechingones. En la mayor parte del área afloran sedimentos de origen eólico, cuya granulometría varía entre arenas finas y limos finos. En el sector septentrional, hacia el sur del arroyo El Cano, dominan materiales finos aunque con algunos sectores asociados al abanico de los cauces, donde los materiales aluviales son más gruesos. Existe un gran desarrollo de laderas o vertientes a los cauces, determinando pendientes complejas de hasta el 15%, y es posible observar también áreas altas, planas, con escasa disección y cubierta eólica loésica (Cantú, 1998). En la cuenca del arroyo Cipión -el sector central de esta unidad- debido a la mayor granulometría de los materiales (arenosos finos) existe un menor desarrollo de laderas, la distribución de los arroyos presenta un marcado control estructural y el relieve es fuertemente ondulado, compuesto por lomas alargadas en el sentido de la pendiente regional y con laderas del 5 al 10%. Al sur, desde el arroyo Achiras hasta las proximidades de la localidad de Chaján, existe una red de drenaje bien desarrollada con pendiente sur-sudeste, implantada en un área de médanos longitudinales de dirección NNO-SSE producidos por vientos locales bajo el control de las sierras. La granulometría de los materiales varía desde arenosa gruesa, con gravillas dispersas, a arenosa fina al aumentar la distancia a las sierras (Cantú y Degiovanni, 1984).

#### *Llanuras bien drenadas moderado a suavemente onduladas*

Se desarrollan hacia el sur y el este de la sub-región, donde predominan materiales loessicos finos sobre los que se han desarrollado suelos profundos. Aisladamente aparece una cubierta eólica más reciente compuesta por materiales franco arenosos finos que constituyen las formas más prominentes del relieve, mientras que en ciertos sectores se observan además rasgos que corresponden a ciclos fluvio-lacustres antiguos. Las geoformas presentan marcadas diferencias de oeste a este de la unidad.

El sector noroeste -influenciado por las sierras- presenta un relieve moderado a suavemente ondulado, de acuerdo a la antigüedad de los ciclos eólicos involucrados. Las lomas más modernas se disponen en sentido de la pendiente regional, este y sudeste, con gradientes de hasta el 1% y pendientes locales complejas que alcanzan el 3% (Cantú y Degiovanni, 1984). El sector este y sur del área presenta la cubierta eólica antigua surcada por paleocauces -en la zona central- y afectada por derrames de arroyos -en su extremo oriental. Hacia el sudoeste el ciclo eólico está representado por médanos longitudinales aislados, algunos de los cuales se aproximan al cauce del río Cuarto. En general el relieve es subnormal con una pendiente general inferior al 0,5%, con ondulaciones locales muy suaves que sólo son alteradas por la presencia de médanos. Hacia el oeste de la localidad de Río Cuarto existen áreas hidrohalomórficas localizadas (Cantero *et al.*, 1986) tales como la depresión de Colonia El Carmen (Cantu, 1998), un área suavemente ondulada compuesta por una sucesión de médanos longitudinales y sectores bajos. En estos últimos aflora la freática con alta concentración de sales, originando costras superficiales, sobre suelos salino-sódicos. Esta depresión da origen a dos afluentes del arroyo Santa Catalina, y tal como otras frecuentes en la unidad, presenta un origen tectónico ligado a la presencia de fallas regionales (Cantu y Degiovanni, 1984).

#### *Llanuras bien drenadas con relieve subnormal*

Se desarrollan hacia el norte y el noreste de la sub-región, abarcando dos subunidades diferenciadas: hacia el norte el área plana y elevada que constituye la divisoria de aguas entre las



cuencas de los arroyos Tegua (N) y Carnerillo (S), y hacia el sur de este último y en dirección sudeste se diferencia un área caracterizada por la superposición de formas correspondientes a procesos genéticos diferentes, no coetáneos, aunque con rasgos eólicos predominantes.

La zona alledanea a las localidades de Gral. Cabrera - Gral. Deheza es una llanura muy tendida con materiales de origen eólico que presentan un gradiente granulométrico de oeste a este, desde predominio de arenas muy finas (El Espinillal) hacia una mayor frecuencia de limos finos (Las Perdices). Los procesos de acumulación-deflación determinan áreas localizadas con mesorelieves donde no se observan líneas de escurrimiento definidas. En forma periférica respecto de este área el relieve comienza a ondularse suavemente, mostrando pequeñas lomas sin orientación preferencial y depresiones poco marcadas.

Este tipo de transición se verifica en especial hacia el oeste (El Espinillal) y hacia el sur (Carnerillo), mientras que hacia el sudeste comienzan a observarse médanos longitudinales de generaciones diferentes -más o menos fijados por la vegetación natural- con distinto grado de desarrollo de suelos. Hacia el sur aparecen grandes lagunas interconectadas por el arroyo Chucul y separadas por médanos de rumbo NE-SW bien definidos, y en algunos sectores, pequeñas cubetas de deflación y lomas sin orientación definida (Cantu y Degiovanni, 1984).

## **2. Dinámica del agua y las sales en la sub-región llanuras mal drenadas**

Hacia el oeste del bloque Viamonte-Canals se desarrolla la faja más baja del sistema, poblada por sistemas de lagunas interconectadas -natural o artificialmente- que presentan una orientación NE-SO aproximada, y que ocupan una superficie de 21600 ha (Cantero et al., 1998). Las mismas presentan una profundidad variable (entre 0,4 y 2 m), con oscilaciones estacionales en el rango de los 0,5 m, con contenidos salinos de entre 2 y 40 dS.m-1 y, en la mayoría de los casos, los límites de las mismas no están claramente definidos o han sido superados (Cisneros *et al.*, 1999). Las lagunas de mayor importancia en este sistema son, de norte a sur, La Brava, Assunta, La Salada, Santana, Las Acollaradas, La Chanchera y El Siete.

Hidrologicamente esta sub-región constituye una área receptora de flujos superficiales y subterráneos que provienen de los sectores serranos, pedemontanos y de las llanuras bien drenadas (continuidad estructural y funcional), es decir, recibe y acumula entropía (agua, sales y sedimentos) desde las otras sub-regiones. En especial durante el ciclo estival, el carácter hídrico torrencial del sistema serrano que llena los cursos de agua, y el aporte de sedimentos por erosión de tierras agrícolas en el pedemonte y las llanuras bien drenadas, sumado a la erosión que este incremento de caudal provoca en márgenes y fondo de los cauces (Cisneros, 1994), generan los volúmenes de agua y sedimentos que finalmente adquieren una circulación mantiforme al acceder a las superficies geomorfológicas de baja energía de esta sub-región. El traslado y acumulación de sales en los acuíferos de esta sub-región responde principalmente a la dinámica de los flujos subterráneos regionales, y puede ser considerada como un área de descarga de freáticas. Su profundidad está en relación con a geoforma considerada y presenta una dinámica basada en recargas estivales y descargas invernales. El comportamiento geoquímico ligado a estos ciclos hidrológicos define la magnitud de las transferencias de iones dentro del perfil y entre unidades del paisaje relacionadas (Cisneros *et al.*, 1999); el agua como vehículo movilizador, así como también el viento durante el período seco, actúan conjuntamente en la distribución de sales.

## Apéndice II – Aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos

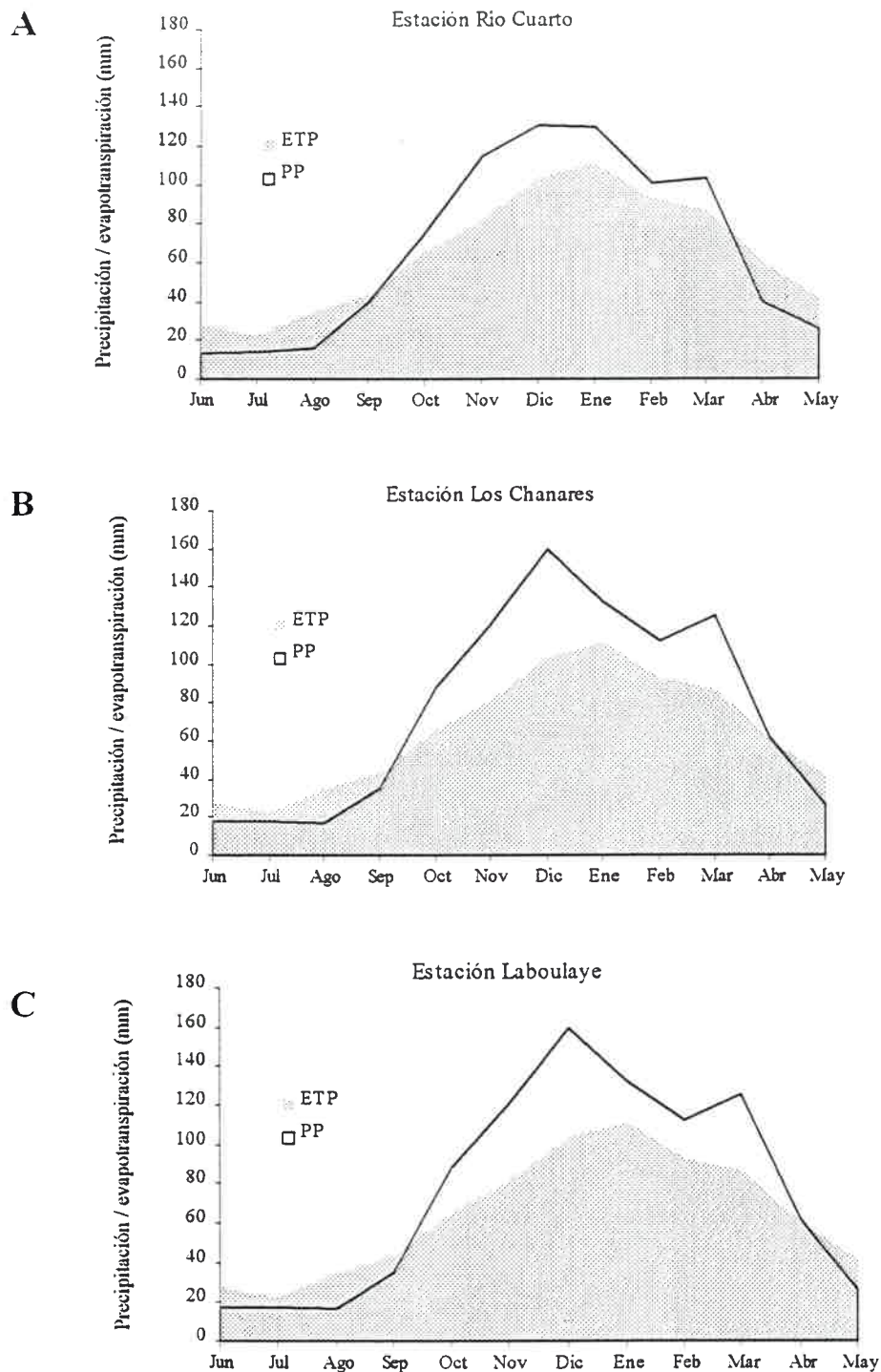
### 3. Origen y fisonomía de las formaciones medanosas

Hacia los sectores norte y este de la sub-región llanuras medanosas, la base medanosa antigua presenta formas longitudinales de orientación noreste sudoeste, en forma de lomadas suaves de baja altura, que presentan suelos poco desarrollados, más fácilmente discernibles en las fotografías aéreas que en el terreno. Hacia el sudoeste predomina un relieve de acumulación-deflación compuesto por lomas redondeadas y subredondeadas, de poca altura y de muy diverso tamaño. El patrón fotográfico presenta un aspecto de 'viruela' (Cantú y Degiovanni, 1984). Entre el río Quinto y la ruta nacional n 7 los médanos son más activos y de menor tamaño, recientes, y oscilan entre los 0,3 a 1,2 Km de ancho (NO-SE) y entre 0,5 a 2,2 Km de longitud, no muy elevados.

En el sector central del área y hacia el oeste son más abundantes los médanos modernos de mayor tamaño y desarrollados a partir de los materiales que componen el relieve descrito anteriormente. Varían entre 1,5 a 2,3 Km de ancho (NO-SE) y 3 a 6 Km de largo, con un desnivel general de 20 a 30 m respecto de la llanura circundante. Frecuentemente se encuentran asociadas áreas de intensa deflación que, cuando su profundidad llega hasta el nivel freático, dan lugar a la formación de lagunas que normalmente se ubican hacia el noreste. Este hecho, sumado a la disposición de las ondulaciones en la parte activa del médano indica que la dirección de los vientos actuantes es noreste, aunque la presencia en algunos médanos de lagunas en la parte central y oriental indican la acción conjunta de estos vientos con los del sudeste (Cantu y Degiovanni, 1984).

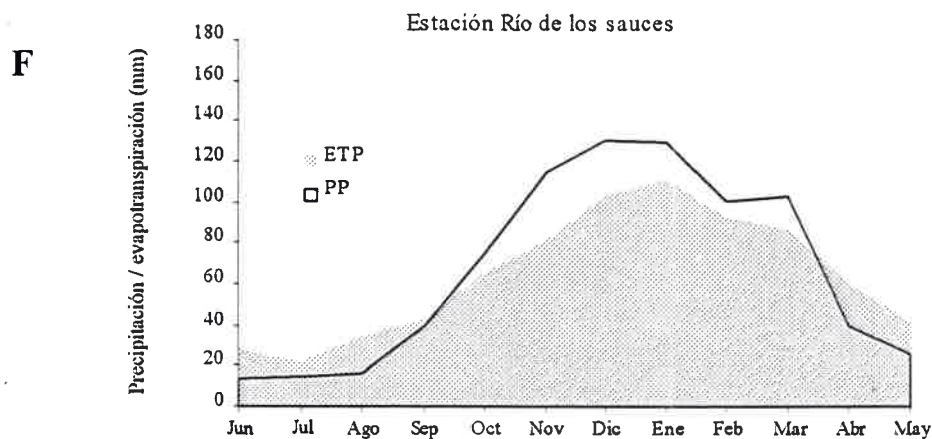
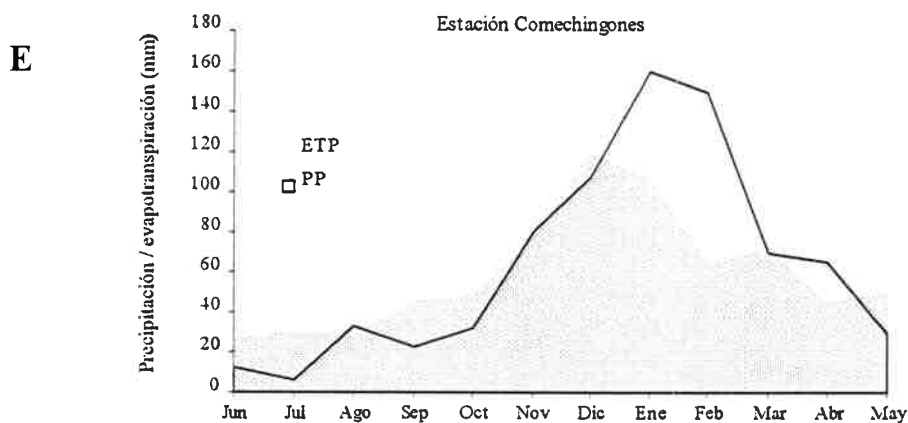
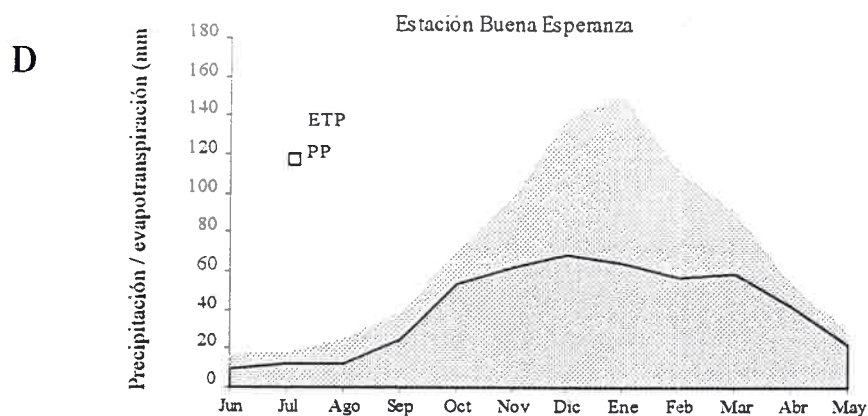
En el sector noroeste, entre Justo Daract y Villa Mercedes, y desde al Río Quinto hacia el norte, se extiende una llanura arenosa en parte loessica (Peña Zubiato, 1980) con médanos estabilizados, que incluye también áreas ligeramente deprimidas y fuertemente salinizadas. Su proyección hacia el oeste se torna en un relieve suavemente ondulado, mientras que hacia el sur predominan los médanos de origen antrópico (INTA, 1998). Se verifica en este sector el aporte reciente de cenizas volcánicas (1932) procedentes del sector andino y que predominan escasamente alterados por las condiciones de semiaridez. Se encuentra en muchos casos entremezclada con sedimentos actuales otorgando una coloración blanca a los primeros centímetros del suelo (Peña Zubiato y Strasser, inédito).

## Apéndice III – Información climática



Precipitaciones medias mensuales (PP) y evapotranspiración potencial (ETP) según Thornwaite (1967) en las estaciones meteorológicas de (A) Universidad Nacional de Río Cuarto (64 14'O; 32 07'S; 421 msnm), Pcia. Córdoba, período 1974 – 1993; (B) Los Chanares (64 43'O; 33 01'S; 775 msnm), Pcia. Córdoba, período 1941 – 1994 (para el cálculo de la ETP se utilizaron los registros de temperatura de la localidad de Río Cuarto) y (C) Laboulaye, Pcia. Córdoba (63 24'O; 34 08'S; 138 msnm), durante el período 1921 – 1956.

## Apéndice III – Información climática (cont.)

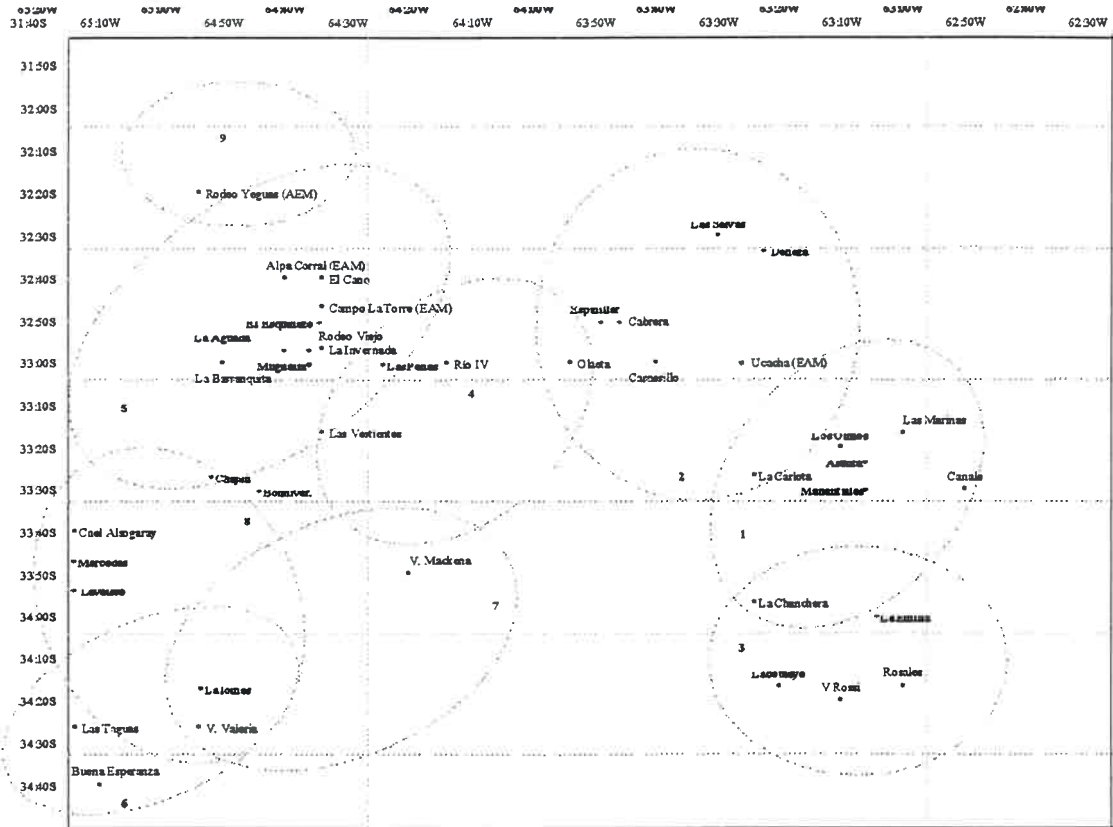


Precipitaciones medias mensuales (PP) y evapotranspiración potencial (ETP) según Thornwaite (1967) en las estaciones meteorológicas de (D) Buena Esperanza (65 18'O; 34 39' S; 320 msnm), Pcia. San Luis, período 1921 – 1950; (E) Comechingones (64 54'O; 32 41'S; 1420 msnm), Pcia. Córdoba, período 1994 – 1997; (F) Río de los Sauces (64 35'O; 32 32'S; 723 msnm), Pcia. Córdoba, para el período 1970 – 1992.



## Apéndice III – Información climática (cont.)

### Distribución de las observaciones



**Figura G:** Representación esquemática de la distribución de las observaciones y de las estaciones meteorológicas (y su zona de influencia) en el área de trabajo. El esquema carece de valor cartográfico y sólo indica tales distribuciones en un plano de coordenadas. 1: La Carlota; 2: Deheza cuenca media; 3: Laboulaye; 4: Río Cuarto; 5: Conjunto complejo de estaciones (La Aguada, Los Chanares, Campo La Torre, Comechingones, etc.); 6: Buena Esperanza; 7: Vicuña Mackenna; 8: Villa Mercedes; 9: Rodeo de Yeguas.

## Apéndice IV – Las formaciones vegetales de cada sub-región

### 1. Llanuras bien drenadas

#### *Estepa gramínea con isletas de quebracho blanco:*

Ocupa la porción oeste y es una continuación de la que Anderson *et al.* (1970) llamaron para San Luis 'Ecotono bosque de quebracho blanco y algarrobo - bosque de caldén'. El paisaje presenta afloramientos rocosos y lomas, con pendientes cortas de 7 a 10%, y el elemento leñoso característico es el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) acompañado por caldén (*Prosopis caldenia*), algarrobo negro (*Prosopis flexuosa*) y moradillo (*Schinus fasciculatus*). La composición florística de esta formación se describe en detalle para la sub-región Llanuras medanosas.

#### *Estepa gramínea* (Blanco *et al.*, 1987):

Abarca la mayor parte de la sub-región, y es la más modificada antrópicamente, presentando el menor porcentaje de vegetación nativa, la cual se manifiesta preferentemente en vías férreas, caminos vecinales, lotes abandonados y áreas con cárcavas profundas. El elemento leñoso ha desaparecido casi por completo, observándose ocasionalmente algarrobos o espinillos (*Acacia caven*) aislados. El aspecto fisonómico de la vegetación original era el de una sabana arbolada que rodeaba a otra formación gramínea, constituyendo bosques abiertos caducifolios y micrófilos, fragmentados internamente por pastizales. La comunidad predominante actual es el flechillar, donde son frecuentes las especies del género *Stipa*, cuya distribución responde en general al tipo de suelo: sobre texturas más finas habitan *Stipa brachychaeta*, *S. trichotoma*, *S. neesiana* y *S. papposa*, mientras que en suelos de texturas más gruesas son sustituidas por *S. eriostachya*, *S. tenuissima* y *Piptochaetium napostense*. Son frecuentes el pasto horqueta (*Paspalum notatum*) y la poa (*Poa ligularis*), ambas excelentes forrajeras, y en muy raras ocasiones es posible encontrar al pasto de vaca (*Sorghastrum pellitum*).

#### *Bosques marginales* (Blanco *et al.*, 1987):

Restringidos a las márgenes de los principales cursos de agua, se componen de especies típicas de la 'Provincia del espinal' y algunas pocas del 'Chaco serrano' que descienden por dichos cursos. El elemento leñoso está integrado por sauces (*Salix humboldtiana*) en los sectores más húmedos, mientras que en la parte superior de las barrancas habitan el tala (*Celtis tala*), el chañar (*Geoffroea decorticans*), y el espinillo (*Acacia caven*), entre otros.

## Apéndice IV – Las formaciones vegetales de cada sub-región

### 2. Llanuras mal drenadas

La comunidad de *Stipa tenuissima* - *Stipa papposa* (nodum A), un pastizal alto y cerrado, se ubica en las posiciones topográficas más elevadas, como lomas arenosas plano-conexas. Representa el extremo más seco y menos salino del gradiente fitosociológico. En situaciones con pendientes aun mayores al 0,5%, es posible encontrar a la comunidad de *Chloris canterai* (nodum B), en sitios sujetos a escurrimientos medios a rápidos y a condiciones de permeabilidad moderada a buena. Hacia las pendientes plano-convexas, con microrelieves irregulares y relativamente buen drenaje, aparece como un pastizal bajo y cerrado la comunidad de *Cynodon dactylon* (nodum C), con numerosas especies provenientes de las comunidades contiguas. La comunidad de *Geoffroea decorticans* - *Grabouwskia duplicata* (nodum D) es una formación leñosa con cobertura variable que se localiza en las posiciones topográficas más bajas, en antiguos albardones, y con frecuencia en costas de lagunas. Es un monte denso pluriestratificado con un estrato inferior herbáceo y los superiores leñosos (Cantero y Petryna, 1998). También en albardones arenosos rodeando lagunas permanentes o en paleocauces en posiciones intermedias, aparece como un pastizal alto la comunidad de *Pappophorum caespitosum* - *Muhlenbergia asperifolia* (nodum E), predominando la primera de las especies.

En áreas de recepción y tránsito de escurrimientos salinos aparece la comunidad de *Distichlis scoparia* (nodum F), un pastizal bajo y cerrado, que limita hacia posiciones periféricas más bajas con la de *Distichlis spicata* (nodum J), de cobertura más variable y ligado a relieves subnormales o cóncavos, con pendientes menores al 0,2%. La comunidad de *Spartina densiflora* (nodum L) es un pastizal alto, cerrado o abierto, que aparece en relieves cóncavos de baja permeabilidad, con la freática superficial y acumulación de escurrimientos salinos. Los límites entre las dos últimas comunidades presentan un carácter cíclico ligado a inundaciones. En ambientes algo más plano-convexos, con la freática desconectada de la fuente salina debido a discontinuidades litológicas, aparece como un pastizal alto y cerrado la comunidad de *Cyperus corymbosus* (nodum K). En ambientes con relieves muy suaves, en planos intermedios, paleocauces o áreas perilacunares, en albardones o elevaciones arenosas incipientes, es posible encontrar a las comunidades de *Atriplex undulata* (nodum G) y de *Salicornia ambigua* (nodum I), de notable similitud florística y ligadas a condiciones de elevada salinidad. Ambas presentan la fisonomía de arbustal, más alto y cerrado el primero, y con más suelo desnudo el segundo. La comunidad de *Heterostachys ritteriana* (nodum H) es un arbustal bajo que aparece limitando con las anteriores pero restringida dentro de áreas plano-cóncavas, con pendientes menores a 0,3% y sobre suelos de baja permeabilidad, con escurrimientos lentos, anegados o inundados. Las comunidades de *Schoenoplectus californicus* (nodum M) y de *Echinochloa helodes* (nodum N) aparecen como pastizales altos abiertos o cerrados en microdepresiones y cubetas, donde los aportes hídricos por escurrimiento superficial o hipodérmico presentan baja salinidad. La primera de ellas esta asociada a regímenes de inundación más prolongados que la segunda, o permanentes, provocados por napas locales.

## Apéndice IV – Las formaciones vegetales de cada sub-región

### 3. Llanuras medanosas

Distrito Psamofítico: en planicies intermedanasas aparecen caldenes (*Prosopis caldenia*) aislados, el alpataco (*Prosopis alpataco*), el peje (*Jodina rhombifolia*) y en sitios con mayor humedad edáfica aparece el tala (*Celtis tala*), entre las leñosas. El olivillo (*Hyalis aregentea*) -indicador de suelos degradados-, el romerillo (*Senecio subulatus*) y el piquillín de las víboras (*Lycium chilense*) son los arbustos mas comunes. La composición florística del estrato herbáceo es dominada por el pasto de vaca (*Sorghastrum pellitum*), acompañado por paja amarga (*Elyonorus muticus*), el pasto escoba (*Schizachyrium plumigerum*), el penacho blanco (*Bothriochloa springfieldii*) y el pasto ilusión (*Eragrostis lugens*): todas ellas gramíneas de muy buen valor forragero (Anderson, 1970). La composición florística de los pastizales hacia el este y el norte incluye en el estrato herbáceo a la paja vizcachera (*Stipa eriostachya*), la paja blanca (*Stipa tenuissima*), cortadera chica (*Pappophorum pappiferrum*), paja amarga, pata de gallo (*Chloris retusa*), flechilla negra (*Piptochaetium napostaense*) y la poa (*Poa ligularis*). En médanos en vías de fijación las pioneras más comunes son el ajo macho (*Panicum urvillanum*) y el unquillo (*Poa lanuginosa*) (Bianco *et al.*, 1987). En áreas que han sido sometidas a cultivo y luego abandonadas o en situaciones de degradación aparecen el cardo ruso (*Salsola kali*), la quinoa (*Chenopodium album*), el tupe (*Panicum urvilleanum*) y la saetilla (*Aristida adscencionis*), el olivillo y el chañar (Orquin *et al.*, 1985).

Bosque de Caldén: Aparece asociado a suelos franco arenosos, de pH ácido hacia el oeste de la sub-región (Orquin *et al.*, 1985) y en suelos con acumulaciones de calcáreo en el perfil o con afloramientos de tosca (Bianco *et al.*, 1987) hacia el sur. Se trata de un bosque abierto con árboles de 8 a 12 m de altura, con una distribución espacial que genera dos hábitats: el umbrófilo, determinado por la proyección vertical de las copas del caldén, algarrobo (*Prosopis flexuosa*), chañar, tala, con especies herbáceas adaptadas como el pasto puna (*Stipa brachichaeta*), la paja blanca, la paja vizcachera, la cola de zorro (*Setaria leiantha* y *S. leucophila*) y el palque (*Cestrum parqui*); el ambiente heliófilo correspondiente a las abras de monte ocupadas por flechilla negra, gramilla (*Cynodon hirsutus*), flechilla de invierno (*Stipa tenuis*), unquillo, poa, pasto plateado (*Digitaria californica*), entre otras. Otras arbóreas asociadas son el peje y el molle (*Schinus fasciculatus*), y los principales arbustos son el piquillín de las víboras, el atamisque (*Atamisquea emarginata*), y el piquillín (*Condalia microphylla*).

Ecotono 'Bosque de quebracho blanco y algarrobo -Bosque de caldén': Abarca el área noroeste de la sub-región, hacia el norte del río Quinto, siendo éste el límite austral de la distribución del quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*). El bosque es más bien bajo y abierto compuesto principalmente por las siguientes especies leñosas: caldén, algarrobo negro, peje, tala, alpataco, chanar, molle, abreboca (*Maytenus spinosa*), jarilla (*Larrea divaricata*), piquillín, etc. En el estrato herbáceo se agregan especies como la saetilla, la cebadilla pampeana (*Bromus brevis*), la pata de gallo (*Chloris ciliata*) el pasto pujante (*Diplachne dubia*) y el penacho blanco (*Bothriochloa barbinodis*) (Orquin *et al.*, 1985).



## Apéndice IV – Las formaciones vegetales de cada sub-región

### 4. Sierra y pedemonte

#### *Estepas gramíneas:*

Ocupan preferentemente las zonas llanas, 'pampas de altura', con suelos profundos, ricos en materia orgánica y con presencia de cárcavas de diferente magnitud. Desde el punto de vista ganadero son las más importantes, extendiéndose desde los 900 hasta los 2000 msnm. La fisonomía corresponde a la de una estepa, con predominio de 'pajas' y 'pastos puna' (*Festuca hieronymi*, *Stipa* sp. y *Aristida* sp.). Una variante fisonómica se presenta con la aparición de 'céspedes' que ocupan preferentemente los lugares húmedos, donde dominan la yerba de la oveja (*Alchemilla pinnata*), *Azorella biloba*, *Eryngium agavifolium* alternando con manchones de *Poa stuckerti*. La organización de la vegetación de las laderas, con suelo somero, afloramientos rocosos y material disperso en la superficie responde a un déficit hídrico permanente. La fisonomía corresponde a un pastizal bajo, estepario, predominando *Sorghastrum pellitum*. En los fondos de valles y mallines, ambientes receptores de flujos superficiales e hipodérmicos provenientes de geosistemas superiores, la vegetación presenta formas de vida adaptadas a condiciones de anegamiento e inundación. Estos sitios poseen la diversidad florística más baja y son dominados por las familias *Cyperaceae* y *Poaceae*, especies rizomatosas con presencia de tejidos aerenquimáticos (González, 1999).

#### *Arbustal o Romerillo:*

Se manifiesta a partir de los 800 msnm llegando a veces hasta las partes más altas del cordón serrano. Presenta el aspecto de un matorral bajo que aparece en forma continua o en manchones, o como mosaico dentro de la estepa de altura o en el bosque serrano (Bianco *et al.*, 1987), ocupando preferentemente sitios con rocas expuestas, laderas ventosas y secas, con suelos poco profundos o incipientes. Las especies dominantes son los romerillos (*Heterothalamus alienus* y *Eupatorium buniifolium*), en algunos sitios domina la carquejilla (*Baccharis articulata*).

#### *Bosque serrano:*

Ocupa preferentemente ambientes húmedos y protegidos de los vientos como márgenes de cursos de agua, quebradas profundas, y se caracteriza por ser en general un bosque muy abierto. La especie dominante es el molle de beber (*Lithraea ternifolia*) acompañado por ejemplares más o menos aislados de coco (*Fagaria coco*). El 'Monte' ocupa la parte basal del cordón serrano, presenta un grado variable de densidad, y la especie dominante es el espinillo (*Acacia caven*) de 1 a 3 m de altura, acompañado por otras especies lenosas tales como moradillo (*Schius fasciculatus*), tala (*Celtis tala*), coco, poleo (*Lipia turbinata*) y palo amarillo (*Aloysia gratissima*).

## Apéndice V – Caracterización de los sitios de simulación

### 1. Paisaje

**Tabla A:** Caracterización de los ambientes correspondientes a los sitios seleccionados para la sub-región Llanuras bien drenadas, situaciones con alteración antrópica leve a moderada. Drenaje: [bd] bien drenado; [mbd] moderadamente bien drenado; [aed] algo excesivamente drenado; [ed] excesivamente drenado; [id] imperfectamente drenado; [md] mal drenado.

Sitio	Código	Ambiente	Drenaje	Vegetación tipo		Ubicación geográfica
				Original	Actual	
<i>Llanuras bien drenadas con relieve suavemente ondulado</i>						
UNRC	<i>Unb</i>	Lomas	bd	Monte	Agrícola	33:07/64:18
Isleta	<i>Isl</i>	Lomas planas	mbd	Monte	Monte	33:07/64:18
Las Vertientes	<i>LV</i>	Lomas	bd	Pastizal	Pastizal	
Las Penas	<i>LP</i>	Albardones perilacunares	mbd	Pastizal	Pastizal	
<i>Llanuras bien drenadas con relieve fuertemente ondulado</i>						
La Aguada	<i>Lal</i>	Lomas	bd	Monte	Pastizal	32:55 / 64:43
	<i>Lab</i>	Bajos	mbd	Monte	Pastizal	32:55 / 64:43
	<i>Mug</i>	Lomas planas	bd	Pastizal	Agrícola	33:01 / 64:41
La Barranquita	<i>Lam</i>	Lomas	bd	Monte	Monte	32:55 / 64:43
	<i>Bbm</i>	Lomas	aed	Monte	Monte	n/d
	<i>Bam</i>	Lomas	aed	Pastizal	Pastizal	n/d
Bonnivardo	<i>Bop1</i>	Lomas medanosas	ed	Monte	Pasto llorón	n/d
	<i>Bom1</i>	Lomas medanosas	ed	Monte	Monte	n/d
	<i>Bom2</i>	Lomas medanosas	ed	Monte	Monte	n/d
El Esquinazo	<i>Esl</i>	Lomas pedemontanas	bd	Monte	Monte	n/d
	<i>Esm</i>	Laderas pedemontanas	aed	Monte	Monte	n/d
	<i>Esb</i>	Bajos cumúlicos	bd	Monte	Monte	n/d
<i>Llanuras bien drenadas con relieve subnormal</i>						
Las Selvas	LSm	Lomas planas	bd	Monte	Monte	32:44 / 63:43
	LSa (I)	Lomas planas	bd	Monte	Agrícola	32:44 / 63:43
Franza	<i>Fap</i>	Lomas planas	bd	Pastizal	Pastizal	32:49 / 63:51
	<i>Fbm</i>	Lomas planas	bd	Monte	Monte	32:49 / 63:51
El espinillar	<i>Esm</i>	Lomas arenosas	aed	Monte	Monte	33:01 / 63:56
Santa María	<i>SMp</i>	Lomas planas	bd	Monte	Pastizal	32:40 / 63:36

n/d: no disponible – no determinado

## Apéndice V – Caracterización de los sitios de simulación

### 1. Paisaje (cont.)

**Tabla B:** Caracterización de los ambientes correspondientes a los sitios seleccionados para la sub-región Llanuras mal drenadas, situaciones con alteración antrópica leve a moderada.

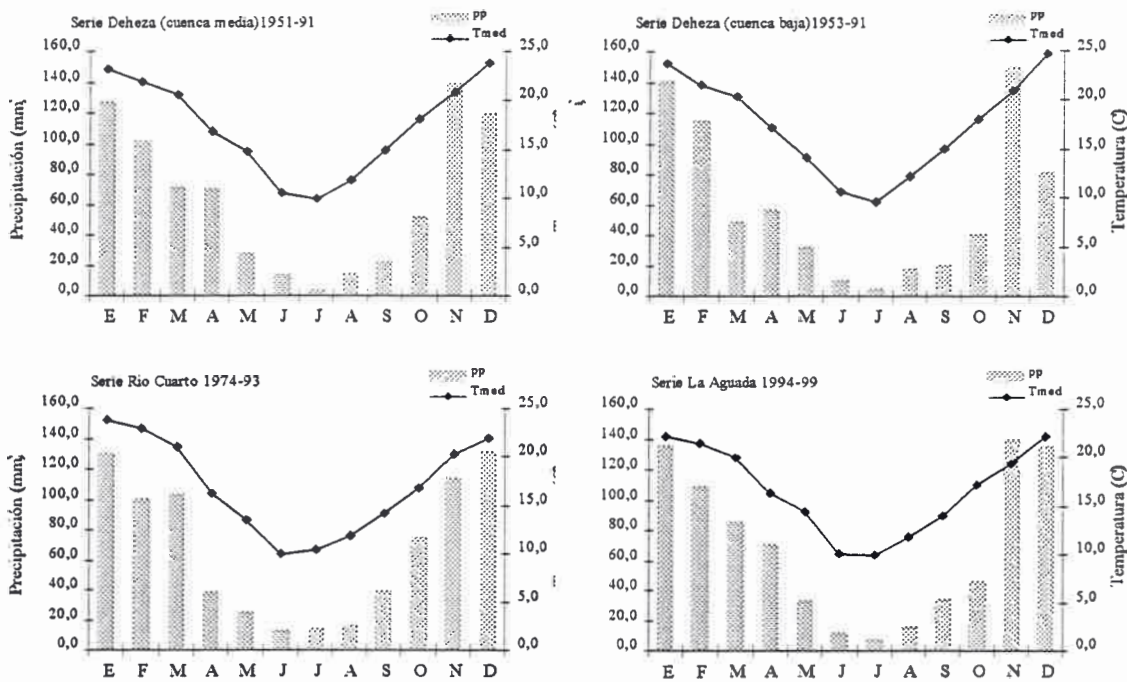
Sitio	Código	Ambiente	Drenaje	Vegetación tipo		Ubicación geográfica
				Original	Actual	
<i>Áreas positivas, lomas arenosas convexas</i>						
Assunta	<i>As1</i>	Lomas arenosas	aed	Pastizal	Pastizal	33:35 / 63:05
El Cruce	<i>EC1</i>	Lomas arenosas	aed	Pastizal	Pastizal	33:40 / 63:15
Los Tamariscos	<i>LT1</i>	Lomas convexas	bd	Pastizal	Pastizal	33:58 / 63:22
La Chanchera	<i>Ch1</i>	Albardones antiguos	bd	Pastizal	Pastizal	33:55 / 63:20
<i>Tendidos débilmente inclinados o a nivel</i>						
El Cruce	<i>EC2</i>	Laderas subnormales	mbd	Pastizal	Pastizal	33:40 / 63:15
	<i>EC3</i>	Planicies subnormales	id	Pastizal	Pastizal	33:40 / 63:15
Los Tamariscos	<i>LT2</i>	Tendidos fluviales	mbd	Pastizal	Pastizal	33:58 / 63:22
La Chanchera	<i>Ch2</i>	Tendidos fluviales	mbd	Pastizal	Pastizal	33:55 / 63:20
	<i>Ch4</i>	Bajos semicóncavos	id a md	Pastizal	Pastizal	33:55 / 63:20
	<i>Ch8</i>	Planicies aluviales y eólicas	id	Pastizal	Pastizal	33:55 / 63:20
<i>Áreas negativas, planicies subnormales – cóncavas</i>						
Los Tamariscos	<i>LT3</i>	Bajos cóncavos	ai	Pastizal	Pastizal	33:58 / 63:22
La Chanchera	<i>Ch3</i>	Planos bajos subnormales	ai	Pastizal	Pastizal	33:55 / 63:20

**Tabla C:** Caracterización de los ambientes correspondientes a los sitios seleccionados para la sub-región Llanuras medanosas, situaciones con alteración antrópica leve a moderada

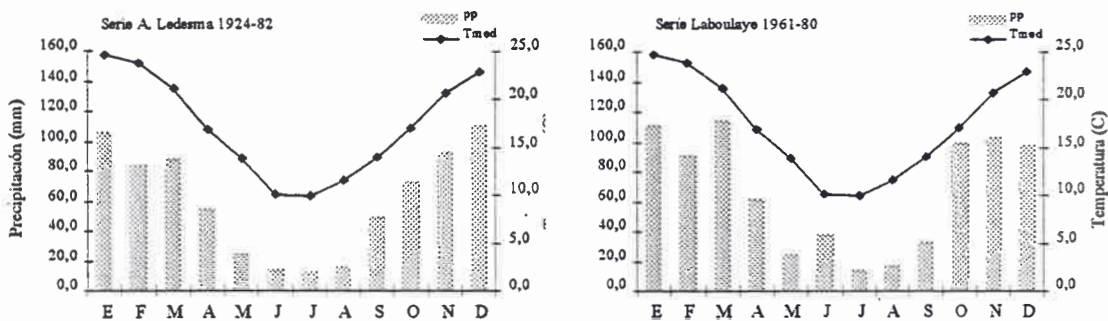
Sitio	Código	Ambiente	Drenaje	Vegetación tipo		Ubicación geográfica
				original	actual	
Las Lomas	<i>Vam</i>	Planicies medanosas	aed	Monte	Monte	34:25 / 64:55
Sarmiento	<i>Mkm</i>	Planicies intermedanosas	aed	Monte	Monte	n/d
	<i>Mkp</i>	Planicies intermedanosas	aed	Pastizal	Pastizal	n/d
Lavaisse	<i>Lvm</i>	Planicies intermedanosas	ed	Monte	Monte	33:49 / 65:16
Rodrigo	<i>Roc1</i>	Pie de loma medanosa	aed	Monte	Monte	33:44 / 65:23
	<i>Rom1</i>	Borde de loma medanosa	ed	Monte	Monte	33:44 / 65:23
Bogino	<i>Bgm1</i>	Lomas arenosas	ed	Monte	Monte	33:20 / 65:02
	<i>Bgm2</i>	Planicies intermedanosas	ed	Monte	Monte	33:20 / 65:02
Las Taguas	<i>LTm1</i>	Planicies intermedanosas	ed	Monte	Monte	34:39 / 65:18
	<i>LTm2</i>	Hoyas medanosas	ed	Monte	Monte	34:39 / 65:18
	<i>LTm3</i>	Lomas medanosas	ed	Monte	Monte	34:39 / 65:18

## Apéndice V – Caracterización de los sitios de simulación

### 2. Clima



**Figura A:** Precipitaciones medias mensuales y temperaturas medias mensuales en Gral Deheza (32:44 LS; 63:43 LW; 311 msnm), Río Cuarto (33:07LS; 64:14 LW; 421 msnm) y en La Aguada (32:55 LS; 64:43 LW; 535 msnm), utilizadas para el diseño de las simulaciones de los sitios correspondientes a la sub-región llanuras bien drenadas.



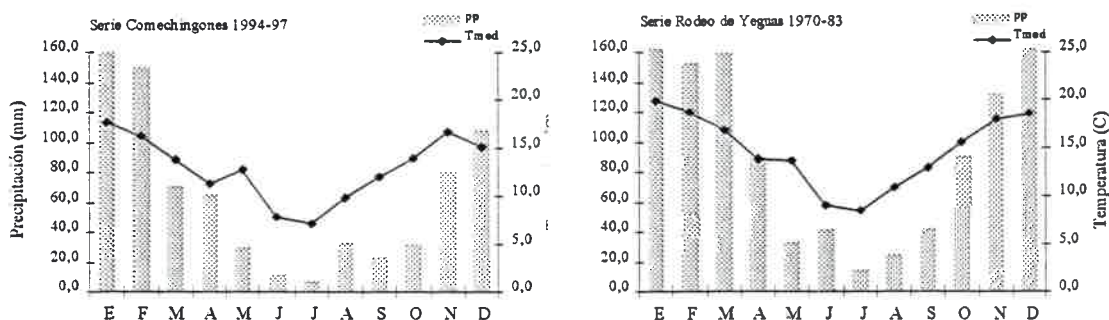
**Figura B:** Precipitaciones medias mensuales y temperaturas medias mensuales en A. Ledesma (33:20 LS; 63:42 LW; 129 msnm) y en Laboulaye (34:08 LS; 63:24 LW; 138 msnm), utilizadas para el diseño de las simulaciones de los sitios correspondientes a la sub-región llanuras mal drenadas.



## °Apéndice V – Caracterización de los sitios de simulación

### 2. Clima (cont.)

**Figura C:** Precipitaciones medias mensuales y temperaturas medias mensuales en Villa Mercedes (33:44 LS; 65:23 LW; 487 msnm), Vicuna Mackenna (lat lon), Buena Esperanza (lat lon completar) y en Villa Valeria (34:25 LS; 64:55 LW; obtenido por triangulación entre las anteriores), utilizadas para el diseño de las simulaciones de los sitios correspondientes a la sub-región llanuras medanosas.



**Figura D:** Precipitaciones medias mensuales y temperaturas medias mensuales en Comechingones (32:41 LS; 64:54 LW; 1420 msnm) y en Rodeo de Yeguas (32:32 LS; 64:40 LW; 1200 msnm), utilizadas para el diseño de las simulaciones de los sitios correspondientes a la sub-región serrana.

## Apéndice V – Caracterización de los sitios de simulación

### 3. Suelos

Tabla A: Principales características edáficas de los sitios seleccionados para las llanuras bien drenadas con relieve subnormal. Los símbolos utilizados se corresponden con los de las tablas previas.

Sitio	Código	Clasificación taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	Materia orgánica (%)
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)		
Situaciones con alteración antrópica leve a muy leve									
Las Selvas	<i>LSm</i>	Haplustol típico	0,78	0,18	48,1	39,4	12,5	1,11	5,76
Franza	<i>Fam</i>	Haplustol típico	0,46	0,21	55,5	33,3	11,3	1,10	2,45
	<i>Fbm</i>	Haplustol típico	0,54	0,21	55,5	33,3	11,3	1,03	3,21
El espinillar	<i>Esp</i>	Haplustol údico	0,72	0,28	68,1	22,7	9,2	1,20	4,52
Santa Maria	<i>SM</i>	Haplustol údico	0,77	0,26	53,8	34,6	11,6	1,29	3,38
Situaciones con alteración antrópica media a severa									
Las Selvas	<i>LSa1</i>	Haplustol típico	0,78	0,18	48,1	39,4	12,5	1,30	1,72
	<i>LSa2</i>	Haplustol típico	0,73	0,18	42,9	45,0	12,1	1,30	2,28
	<i>LSa3</i>	Haplustol típico	0,78	0,21	43,3	43,7	13,0	1,27	2,05
Franza	<i>Fal</i>	Haplustol típico	0,50	0,22	55,5	33,3	11,3	1,29	1,98
AEGD	<i>Dex</i>	Haplustol típico	0,82	0,20	48,5	39,0	12,5	1,35	1,27
El Espinillar	<i>Espa</i>	Haplustol éntico	0,65	0,16	68,1	22,7	9,2	1,36	1,04
Camerillo	<i>Car</i>	Haplustol éntico	0,74	0,19	72,5	20,6	6,9	1,25	1,45
Las Charras	<i>LCh</i>	Haplustol éntico	0,51	0,26	72,5	18,5	9,0	1,41	1,08
La Florida	<i>LFl</i>	Haplustol típico	0,63	0,22	43,3	43,7	13,0	1,26	2,13
Santa Eufemia	<i>SE1</i>	Haplustol típico	0,59	0,23	42,4	46,3	11,3	1,29	2,32
	<i>SE2</i>	Haplustol típico	0,61	0,20	36,0	48,6	15,4	1,32	2,52
Grosso	<i>Gro</i>	Haplustol típico	0,64	0,17	36,1	48,2	15,7	1,30	2,15
Cabrera	<i>Ces</i>	Haplustol éntico	0,50	0,21	50,2	39,2	10,6	1,28	1,37
Olaeta	<i>Oes</i>	Haplustol éntico	0,53	0,26	68,2	22,4	9,4	1,23	1,62
Deheza	<i>Des</i>	Haplustol típico	0,78	0,22	36,0	48,3	15,7	1,30	1,72

## Apéndice V – Caracterización de los sitios de simulación

### 3. Suelos (cont.)

Tabla B: Principales características de los suelos en los sitios seleccionados para las llanuras bien drenadas con relieve ondulado. Situaciones bajo degradación antrópica leve.

Sitio	Código	Clasificación taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad Aparente (g cm-3)	Materia orgánica (%)
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)		
UNRC	<i>Unb</i>	Hapludol típico	0,80	0,28	52,3	34,2	13,5	1,15	3,12
Isleta	<i>Isl</i>	Hapludol thapto petrocálcico	0,66	0,36	36,4	45,9	17,8	1,14	3,45
Las Vertientes	<i>LV</i>	Haplustol údico	0,81	0,18	53,3	33,8	13,0	1,12	5,03
Las Penas	<i>LP</i>	Hapludol éntico	0,77	0,25	73,9	19,9	6,2	1,24	1,402
La Barranquita	<i>Bbm</i>	Hapludol éntico	0,66	0,25	77,0	15,0	8,0	1,12	3,20
	<i>Bam</i>	Hapludol éntico	0,65	0,22	77,0	15,0	8,0	1,16	4,10
La Aguada	<i>Lal</i>	Hapludol típico	0,8	0,19	56,8	32,5	10,7	1,30	2,17
	<i>Lab</i>	Hapludol típico	0,9	0,17	36,7	43,6	19,7	1,19	4,90
	<i>Mug</i>	Hapludol típico	1,1	0,19	31,3	46,4	22,3	1,25	5,52
	<i>Lam</i>	Hapludol típico	0,9	0,2	26,5	51,9	21,6	1,22	7,00
El Esquinazo	<i>Esl</i>	Hapludol típico/lítico	0,65	0,25	60,3	29,7	10,0	1,31	3,35
	<i>Esm</i>	Hapludol lítico	0,25	0,18	71,8	17,2	11,0	1,30	3,51
	<i>Esb</i>	Hapludol típico/cumúfico	1,52	0,28	47,7	40,8	11,5	1,40	7,76
Bonnivardo	<i>Bop1</i>	Ustorthent típico	0,62	0,18	84,3	11,0	4,7	1,23	1,024
	<i>Bom1</i>	Ustorthent típico	0,57	0,18	79,0	16,3	4,7	1,16	1,695
	<i>Bom2</i>	Haplustol éntico	0,69	0,19	80,6	13,1	6,3	1,19	2,105
Chaján	<i>Chn1</i>	Ustorthent típico	0,8	0,26	85,1	9,8	5,1	1,24	1,33
	<i>Chn2</i>	Haplustol éntico	0,63	0,25	79,9	15,3	4,7	1,26	1,34

## Apéndice V – Caracterización de los sitios de simulación

### 3. Suelos (cont.)

Tabla C: Principales características de los suelos en los sitios seleccionados para las llanuras bien drenadas con relieve ondulado. Situaciones bajo degradación antrópica media a severa.

Sitio	Código	Clasificación taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad Aparente (g cm <sup>-3</sup> )	Materia orgánica (%)
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)		
UNRC	<i>Una</i>	Hapludol típico	0,80	0,25	52,3	34,2	13,5	1,44	1,19
Campus	<i>Cam</i>	Hapludol típico	0,76	0,19	53,5	33,6	13,0	1,49	1,14
La Barranquita	<i>LB1</i>	Hapludol éntico	0,7	0,23	76,8	15,0	8,2	1,54	1,92
	<i>LB2</i>	Hapludol éntico	0,68	0,2	77,0	15,0	8,0	1,40	1,52
	<i>LB3</i>	Hapludol éntico	0,7	0,25	76,8	15,0	8,2	1,32	1,20
La Aguada	<i>Laes</i>	Hapludol éntico	0,4	0,17	47,7	40,8	11,5	1,30	1,02
	<i>Latc</i>	Hapludol éntico	0,73	0,38	71,8	17,2	11,0	1,31	1,47
Spermanzonni	<i>Spi</i>	Hapludol típico	1,1	0,2	31,3	46,4	22,3	1,33	3,60
La Invernada	<i>Lin</i>	Hapludol típico	0,51	0,22	41,4	48,5	10,1	1,30	2,80
Rodeo Viejo	<i>RV1</i>	Hapludol típico	0,65	0,2	71,7	17,3	11,0	1,30	2,71
	<i>RV2</i>	Hapludol típico	0,63	0,28	72,1	16,7	11,2	1,28	2,67
	<i>RVes</i>	Haplustol éntico	0,77	0,2	44,5	43,8	10,4	1,36	1,40
Bonnivardo	<i>Bop2</i>	Haplustol éntico	0,81	0,2	77,7	16,3	6,0	1,34	0,86
	<i>Bom3</i>	Ustorthent típico	0,58	0,18	83,7	10,9	5,3	1,31	0,59
Chaján	<i>Cha1</i>	Haplustol éntico	0,72	0,23	76,5	17,2	6,3	1,32	1,20
	<i>Cha2</i>	Ustorthent típico	0,52	0,15	80,4	15,3	4,3	1,32	0,50
Suco	<i>Sua</i>	Haplustol típico	1,0	0,26	80,0	13,1	6,9	1,29	1,005



## Apéndice V – Caracterización de los sitios de simulación

### 3. Suelos (cont.)

Tabla D: Principales características edáficas de los sitios seleccionados para las llanuras mal drenadas (situaciones con alteración por pastoreo)

Sitio	Código	Clasificación taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad Aparente (g cm-3)	Materia orgánica (%)	Grado de alteración antrópica
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)			
<i>Áreas positivas, lomas arenosas convexas</i>										
Assunta	<i>As1</i>	Haplustol éntico	1,00	0,3	71,5	12,3	16,2	1,29	1,23	<i>medio</i>
El Cruce	<i>EC1</i>	Haplustol éntico	0,95	0,26	71,4	11,2	17,3	1,27	1,99	<i>leve</i>
Los Tamariscos	<i>LT1</i>	Haplustol éntico	0,74	0,21	70,1	15,0	14,9	1,32	2,35	<i>medio</i>
La Chanchera	<i>Ch1</i>	Haplustol típico	0,88	0,27	70,4	14,2	15,6	1,28	2,27	<i>medio</i>
<i>Tendidos débilmente inclinados o a nivel</i>										
Assunta	<i>As2</i>	Haplustol éntico thapto nátrico	1,15	0,24	70,5	18,5	11,0	1,30	1,27	<i>medio</i>
	<i>As3</i>	Haplacuo típico	1,10	0,22	61,2	23,6	15,2	1,42	1,57	<i>medio a severo</i>
El Cruce	<i>EC2</i>	Haplustol thapto nátrico	0,81	0,2	70,2	18,6	11,2	1,29	1,81	<i>leve a medio</i>
	<i>EC3</i>	Haplacuo thapto frágico	0,62	0,18	61,1	24,5	14,3	1,37	2,41	<i>medio</i>
Los Tamariscos	<i>LT2</i>	Duracualf típico	0,45	0,19	44,1	39,1	16,8	1,10	4,52	<i>leve</i>
La Chanchera	<i>Ch2</i>	Haplacuo thapto frágico	0,73	0,19	59,5	27,7	12,9	1,28	2,09	<i>medio</i>
	<i>Ch4</i>	Duracualf típico	0,40	0,21	43,9	40,0	16,1	1,07	2,27	<i>medio</i>
	<i>Ch5</i>	Natracualf típico	0,52	0,25	29,8	42,5	27,7	1,10	1,58	<i>medio</i>
	<i>Ch7</i>	Duracualf típico	0,79	0,15	50,7	31,9	17,5	1,27	1,84	<i>medio</i>
	<i>Ch8</i>	Haplacuo thapto frágico	0,80	0,28	49,1	32,0	18,9	1,38	2,09	<i>medio a severo</i>
<i>Áreas negativas, planicies subnormales - cóncavas</i>										
Assunta	<i>As4</i>	Natracualf típico	0,38	0,19	49,7	29,6	20,8	1,19	1,64	<i>medio</i>
Los Tamariscos	<i>LT3</i>	Natracualf típico	0,51	0,2	55,3	28,2	16,5	1,20	3,93	<i>leve</i>
La Chanchera	<i>Ch3</i>	Duracualf típico	0,43	0,17	42,2	37,7	20,2	1,22	3,04	<i>medio</i>
	<i>Ch6</i>	Duracualf típico	0,58	0,14	43,6	37,8	18,6	1,31	1,45	<i>medio</i>

Grado de alteración antrópica: calificación subjetiva (leve, medio o severo) de acuerdo a condición del pastizal, cobertura, presencia de costras y/o sellos, sal en superficie, erosión, etc.

## Apéndice V – Caracterización de los sitios de simulación

### 3. Suelos (cont.)

Tabla E: Principales características edáficas de los sitios seleccionados para las llanuras medanosas. Situaciones bajo alteración antrópica leve a muy leve

Sitio	Código	Clasificación taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad Aparente (g cm <sup>-3</sup> )	Materia orgánica (%)	Unidad
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)			
Las Lomas Sarmiento	<i>Vam</i>	Haplustol éntico	0,48	0,18	78,1	16,2	5,7	1,04	3,78	1
	<i>Mkm</i>	Ustorthent típico	0,44	0,22	78,7	15,4	5,9	1,23	4,38	1
	<i>Mkp</i>	Ustorthent típico	0,45	0,20	78,7	15,4	5,9	1,23	1,74	1
Lavaisse	<i>Lvm</i>	Ustipsament típico	0,51	0,20	82,5	12,4	5,1	1,10	3,98	2
Rodrigo	<i>Roc1</i>	Ustorthent típico	0,66	0,15	68,5	21,3	10,2	1,15	5,27	3
	<i>Rom1</i>	Ustorthent típico calcáreo	0,40	0,20	66,5	27,0	6,5	1,29	1,81	3
Bogino	<i>Bgm1</i>	Ustipsament típico	0,39	0,15	89,3	6,4	4,4	1,21	2,10	4
	<i>Bgm2</i>	Ustorthent típico	0,42	0,17	73,2	21,1	5,8	1,26	1,90	4
Las Taguas	<i>LTm1</i>	Ustipsament típico	0,48	0,24	82,5	12,4	5,1	1,30	2,17	5
	<i>LTm2</i>	Torripsament ústico	0,47	0,27	89,2	6,2	4,6	1,24	3,44	5
	<i>LTm3</i>	Torripsament ústico	0,48	0,07	91,3	6,1	2,6	1,23	2,57	5

Unidad: código que indica la unidad fisiográfica a la que pertenece el sitio; (1): Llanura medanosa, (2): Llanura medanosa con médanos antrópicos, (3): Planicie arenosa ondulada (no medanosa), (4): Llanura arenosa no medanosa (en parte loésica) y (5): Llanura medanosa con lagunas permanentes.

## Apéndice V – Caracterización de los sitios de simulación

### 3. Suelos (cont.)

Tabla F: Principales características edáficas de los sitios seleccionados para las llanuras medanosas. Situaciones bajo alteración antrópica media a severa.

Sitio	Código	Clasificación taxonómica	Profundidad		Textura			Densidad	Materia	Unidad
			Sólum (m)	Epipedón (m)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	Aparente (g cm <sup>-3</sup> )	orgánica (%)	
Las Lomas	<i>Vap</i>	Haplustol éntico	0,50	0,20	78,1	16,2	5,7	1,32	1,21	1
	<i>Var1</i>	Haplustol éntico	0,55	0,25	78,1	16,2	5,7	1,47	0,97	1
	<i>Var2</i>	Ustipsament típico	0,48	0,13	79,7	14,9	5,4	1,30	1,05	1
Sarimiento	<i>Mka1</i>	Ustorthent típico	0,48	0,19	78,7	15,4	5,9	1,36	1,01	1
	<i>Mka2</i>	Ustorthent típico	0,41	0,20	78,7	15,4	5,9	1,24	0,99	1
Lavaisse	<i>Lvp</i>	Ustipsament típico	0,49	0,16	82,5	12,4	5,1	1,35	0,97	2
Rodrigo	<i>Rom2</i>	Ustorthent típico calcáreo	0,60	0,22	66,5	27,0	6,5	1,31	1,65	3
	<i>Rom3</i>	Ustorthent típico calcáreo	0,34	0,10	66,5	27,0	6,5	1,33	1,02	3
	<i>Roc2</i>	Ustorthent típico	0,44	0,10	68,5	21,3	10,2	1,28	2,50	3
	<i>Roc3</i>	Ustorthent típico	0,45	0,28	68,5	21,3	10,2	1,15	5,31	3
Bogino	<i>Bga</i>	Ustorthent típico	0,57	0,20	73,2	21,1	5,8	1,38	0,78	4
	<i>Bgp1</i>	Ustipsament típico	0,38	0,18	89,3	6,4	4,4	1,36	1,04	4
	<i>Bgp2</i>	Ustipsament típico	0,47	0,17	89,3	6,4	4,4	1,38	1,03	4
Las Taguas	<i>L1p1</i>	Ustipsament típico	0,52	0,15	80,4	14,2	5,4	1,42	0,78	5
	<i>L1p2</i>	Ustipsament típico	0,52	0,28	80,4	14,2	5,4	1,32	0,94	5
	<i>LTa1</i>	Torripsament ústico	0,48	0,17	85,7	9,2	5,1	1,46	0,48	5
	<i>LTa2</i>	Ustipsament típico	0,48	0,24	82,5	12,4	5,1	1,30	0,95	5
Batavia	<i>Bacs</i>	Torripsament ústico	0,50	0,21	85,6	10,0	4,3	1,29	0,60	5
Buena Esperanza	<i>Becs</i>	Ustipsament típico	0,45	0,20	79,7	14,9	5,4	1,25	0,90	5

Unidad: código que indica la unidad fisiográfica a la que pertenece el sitio; (1): Llanura medanosa, (2): Llanura medanosa con médanos antrópicos, (3): Planicie arenosa ondulada (no medanosa), (4): Llanura arenosa no medanosa (en parte loésica) y (5): Llanura medanosa con lagunas permanentes.

## Apéndice V – Caracterización de los sitios de simulación

### 3. Suelos (cont.)

Tabla G: Principales características edáficas, altitud y pendiente de los sitios seleccionados para los ambientes serranos

Sitio	Código	Clasificación taxonómica	Altitud promedio (m)	Pendiente promedio (%)	Profundidad sólum (m)	Textura				Densidad aparente (g cm-3)	Materia orgánica (%)	Ecogrupo vegetación
						grava (%)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)			
Planicies altas, pendientes simples y largas												
Arroyo La Tapa	<i>Pam1</i>	Argiudol lítico	1680	4,4	0,63	8,19	41,3	28,1	22,4	0,55	11,70	<i>I</i>
	<i>Pam2</i>	Argiudol lítico	1551	7,2	0,49	5,309	45,5	27,3	21,9	1,20	12,75	<i>I</i>
	<i>Pap1</i>	Indeterminado	1265	13,3	0,56	15,544	46,4	20,9	17,1	1,00	9,66	<i>VI</i>
	<i>Pap2</i>	Indeterminado	1602	14,0	0,36	2,48	45,2	29,3	23,1	1,29	13,59	<i>I</i>
Laderas escarpadas, moderadas y suaves												
Arroyo La Tapa	<i>Lae1</i>	Indeterminado	1220	21,5	0,40	8,08	49,1	27,4	15,4	1,10	10,11	
	<i>Lae2</i>	Indeterminado	1350	25,0	0,05	40,45	50,1	7,8	1,6	1,00	5,19	
	<i>Lam1</i>	Indeterminado	1363	16,0	0,41	19,07	45,4	20,6	14,9	1,35	11,47	<i>V</i>
	<i>Lam2</i>	Udorthent lítico	1380	17,2	0,09	34,1	40,7	14,5	10,7	0,80	9,10	<i>V</i>
	<i>Lam3</i>	Udorthent lítico	1650	19,2	0,16	32	36,8	20,6	10,7	0,93	9,13	<i>nd</i>
	<i>Las1</i>	Indeterminado	1265	5,6	0,24	22,08	49,8	14,9	13,2	1,12	10,39	<i>VII</i>
	<i>Las1</i>	Indeterminado	1298	7,9	0,19	3,26	46,9	27,9	22,4	1,10	10,11	
	<i>Las2</i>	Indeterminado	1461	9,1	0,66	21,16	39,2	23,4	16,2	1,05	12,09	<i>V</i>
	<i>Las3</i>	Indeterminado	1440	13,5	0,08	8,96	33,4	31,4	26,3	0,99	8,13	<i>V</i>
Valles cóncavos, áreas de recepción y transmisión												
Arroyo La Tapa	<i>Vam1</i>	Indeterminado	1000	4,5	0,69	1,64	39,3	33,6	25,6	0,72	9,79	<i>III</i>
	<i>Vam2</i>	Indeterminado	1463	7,8	0,68	0,81	43,9	33,0	22,3	0,69	13,13	<i>III</i>
	<i>Vap1</i>	Indeterminado	1470	13,0	0,59	12,47	32,1	31,3	24,1	1,05	14,23	<i>IV</i>
	<i>Vap2</i>	Indeterminado	1408	14,3	0,63	20,3	39,3	20,8	19,6	1,22	12,73	
Mallines, áreas cóncavas de acumulación superficial e hipodérmica												
Arroyo La Tapa	<i>Mam1</i>	Indeterminado	1470	2,3	1,13	0	39,1	32,3	28,6	0,96	11,03	
	<i>Mam2</i>	Indeterminado	1360	2,8	0,75	0	29,3	38,9	31,7	0,80	14,53	<i>VIII</i>
	<i>Map1</i>	Indeterminado	1640	6,0	0,71	2,47	43,8	29,7	24,1	0,71	16,83	<i>VIII</i>

Ecogrupos de Vegetación: I a VII de acuerdo a Cantero *et al.* (1999), detallados en Sección 4. Nd: no disponible.



## Apéndice VI – Desarrollo y validación de los modelos empíricos

**Tabla A:** Series de suelo utilizadas para la validación de los modelos empíricos, con su valor correspondiente a la determinación de materia orgánica y las estimaciones realizadas mediante modelos empíricos, y valores medidos para la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la humedad equivalente.

Serie*	Gran grupo	Materia orgánica (g kg <sup>-1</sup> )			CIC cmol <sub>(c)</sub> kg <sup>-1</sup>	Humedad Equivalente (% v/v)
		Medida	Estimación (naturales)	Estimación (alteradas)		
Anchorena	Ustipsament típico	7,4	5,0	6,4	6,0	10,1
Arizona	Haplustol éntico	10,0	6,2	7,2	5,2	11,9
Cabrera	Haplustol éntico	13,7	23,0	15,1	13,0	18,6
El Cano	Haplustol típico	26,0	37,6	17,7	12,8	17,6
El Chacay	Hapludol éntico	29,0	24,1	13,5	11,9	13,3
El Gato	Haplustol éntico	33,0	58,1	26,9	20,6	25,1
Ingeniero Foster	Haplustol éntico	12,0	0,2	9,2	7,5	7,6
La Carlota	Haplustol éntico	20,0	11,7	11,9	13,1	16,7
La Esquina	Argiudol típico	34,0	56,5	24,7	22,1	24,8
La Payanca	Argiustol údico	24,8	16,7	17,6	14,4	19,0
Laboulaye	Haplustol típico	13,7	16,1	11,8	12,6	14,8
Las Marinas	Argialbol típico	21,0	18,1	17,6	13,2	17,6
Leguizamón	Haplustol éntico	28,9	20,5	18,1	14,8	19,0
Pascanas	Argialbol típico	34,0	23,8	22,8	15,0	21,8
Serie 3.3	Haplustol éntico	13,4	24,5	9,8	9,0	9,4
Serie 3.4	Ustorthent típico	5,0	24,1	9,4	8,7	11,2

\*Todas las series fueron tomadas de la Carta de Suelos de la República Argentina – INTA, salvo las dos últimas que fueron descriptas en el trabajo de zonificación realizado por la UNRC

## Apéndice VI – ANOVA de las regresiones y modelos empíricos

### 1. Algunas siglas utilizadas en los análisis con Genstat

AL	Suma de arcilla + limo, en %
altitud	Sobre el nivel del mar, en m
amplitud	Tmax – Tmin, en °C
arcilla	Contenido de arcilla, en %
CgKg	C orgánico en g por kg de suelo
Déficit	PP – ETP, en mm
DAP	Densidad aparente, en kg por m <sup>3</sup>
ETP	Evapotranspiración, en mm
Epip	Profundidad del epipedón, en m
indETP	PP / ETP
indTemp	PP / Tmed
MO	Materia orgánica, en %
PP	Precipitaciones, en mm
PP_desv	Desvío estándar de las precipitaciones, en mm
Solum	Profundidad del perfil, en m
Tmed, min, max	Temperaturas media, mínima o máxima, en °C

### 2. Situaciones con vegetación de tipo monte

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, AL

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	23221.	23220.6	25.38	<.001
Residual	35	32020.	914.8		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-1	-23221.	23220.6	25.38	<.001

Percentage variance accounted for 40.4

Standard error of observations is estimated to be 30.2

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	0.0	11.2	0.00	0.999
AL	1.441	0.286	5.04	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, Altitud

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	42244.	42244.2	113.77	<.001
Residual	35	12996.	371.3		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-1	-42244.	42244.2	113.77	<.001

Percentage variance accounted for 75.8

Standard error of observations is estimated to be 19.3

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	-4.23	6.06	-0.70	0.489
Altitud	0.08090	0.00758	10.67	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, Amplitud

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	23623.	23623.2	26.15	<.001
Residual	35	31617.	903.3		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-1	-23623.	23623.2	26.15	<.001

Percentage variance accounted for 41.1

Standard error of observations is estimated to be 30.1

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	-41.0	18.6	-2.20	0.034
Amplitud	5.51	1.08	5.11	<.001

## Apéndice VI – ANOVA de las regresiones y modelos empíricos

### 2. Situaciones con vegetación de tipo monte (cont.)

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, ETP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	35424.	35424.0	62.57	<.001
Residual	35	19816.	566.2		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-1	-35424.	35424.0	62.57	<.001

Percentage variance accounted for 63.1  
Standard error of observations is estimated to be 23.8

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	361.3	39.4	9.16	<.001
ETP	-0.3871	0.0489	-7.91	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, Epip

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	7878.	7878.	5.82	0.021
Residual	35	47363.	1353.		
Total	36	55240.	1534.		
Change	-1	-7878.	7878.	5.82	0.021

Percentage variance accounted for 11.8  
Standard error of observations is estimated to be 36.8

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	91.3	17.9	5.12	<.001
Epip	-215.7	89.4	-2.41	0.021

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, PP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	32159.	32158.9	48.76	<.001
Residual	35	23081.	659.5		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-1	-32159.	32158.9	48.76	<.001

Percentage variance accounted for 57.0  
Standard error of observations is estimated to be 25.7

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	-52.8	15.4	-3.42	0.002
PP	0.1342	0.0192	6.98	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, PP\_desv

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	23018.	23017.6	25.00	<.001
Residual	35	32223.	920.6		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-1	-23018.	23017.6	25.00	<.001

Percentage variance accounted for 40.0  
Standard error of observations is estimated to be 30.3

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	-17.2	14.5	-1.18	0.244
PP_desv	0.2282	0.0456	5.00	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, Tmed

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	19540.	19540.	19.16	<.001
Residual	35	35700.	1020.		
Total	36	55240.	1534.		
Change	-1	-19540.	19540.	19.16	<.001

Percentage variance accounted for 33.5  
Standard error of observations is estimated to be 31.9

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	251.4	46.1	5.45	<.001
Tmed	-12.48	2.85	-4.38	<.001

# Apéndice VI – ANOVA de las regresiones y modelos empíricos

## 2. Situaciones con vegetación de tipo monte (cont.)

Response variate: Cgkg  
Fitted terms: Constant, Tmin

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	22786.	22786.1	24.57	<.001
Residual	35	32454.	927.3		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-1	-22786.	22786.1	24.57	<.001

Percentage variance accounted for 39.6  
Standard error of observations is estimated to be 30.5

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	98.3	10.8	9.10	<.001
Tmin	-6.11	1.23	-4.96	<.001

Response variate: Cgkg  
Fitted terms: Constant, arcilla

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	40275.	40275.1	94.19	<.001
Residual	35	14965.	427.6		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-1	-40275.	40275.1	94.19	<.001

Percentage variance accounted for 72.1

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	-0.25	6.26	-0.04	0.969
arcilla	4.464	0.460	9.71	<.001

Response variate: Cgkg  
Fitted terms: Constant, deficit

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	36245.	36245.4	66.79	<.001
Residual	35	18995.	542.7		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-1	-36245.	36245.4	66.79	<.001

Percentage variance accounted for 64.6  
Standard error of observations is estimated to be 23.3

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	54.06	3.85	14.04	<.001
deficit	0.1094	0.0134	8.17	<.001

Response variate: Cgkg  
Fitted terms: Constant, indETP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	37256.	37256.1	72.51	<.001
Residual	35	17984.	513.8		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-1	-37256.	37256.1	72.51	<.001

Percentage variance accounted for 66.5

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	-29.2	10.1	-2.89	0.007
indETP	80.14	9.41	8.52	<.001

Response variate: Cgkg  
Fitted terms: Constant, indTemp

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	37980.	37979.7	77.01	<.001
Residual	35	17261.	493.2		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-1	-37980.	37979.7	77.01	<.001

Percentage variance accounted for 67.9  
Standard error of observations is estimated to be 22.2

	estimate	s.e.	t(35)	t pr.
Constant	-32.8	10.2	-3.21	0.003
indTemp	1.691	0.193	8.78	<.001



## Apéndice VI – ANOVA de las regresiones y modelos empíricos

### 3. Situaciones con vegetación de pastizal

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, arcilla

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	24776.	24776.	20.59	<.001
Residual	54	64985.	1203.		
Total	55	89760.	1632.		
Change	-1	-24776.	24776.	20.59	<.001

Percentage variance accounted for 26.3  
Standard error of observations is estimated to be 34.7

	estimate	s.e.	t(54)	t pr.
Constant	-7.4	11.1	-0.67	0.506
arcilla	3.302	0.728	4.54	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, Altitud

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	64783.	64782.5	140.06	<.001
Residual	54	24978.	462.5		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-1	-64783.	64782.5	140.06	<.001

Percentage variance accounted for 71.7  
Standard error of observations is estimated to be 21.5

	estimate	s.e.	t(54)	t pr.
Constant	-2.18	4.47	-0.49	0.627
Altitud	0.07074	0.00598	11.83	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, Amplitud

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	57155.	57155.4	94.66	<.001
Residual	54	32605.	603.8		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-1	-57155.	57155.4	94.66	<.001

Percentage variance accounted for 63.0

	estimate	s.e.	t(54)	t pr.
Constant	-87.3	13.3	-6.55	<.001
Amplitud	7.980	0.820	9.73	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, ETP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	41725.	41724.5	46.91	<.001
Residual	54	48036.	889.5		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-1	-41725.	41724.5	46.91	<.001

Percentage variance accounted for 45.5  
Standard error of observations is estimated to be 29.8

	estimate	s.e.	t(54)	t pr.
Constant	228.5	28.1	8.14	<.001
ETP	-0.2195	0.0321	-6.85	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, Epip

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	34734.	34734.	34.09	<.001
Residual	54	55026.	1019.		
Total	55	89760.	1632.		
Change	-1	-34734.	34734.	34.09	<.001

Percentage variance accounted for 37.6  
Standard error of observations is estimated to be 31.9

	estimate	s.e.	t(54)	t pr.
Constant	109.0	12.8	8.49	<.001
Epip	-372.9	63.9	-5.84	<.001

## Apéndice VI – ANOVA de las regresiones y modelos empíricos

### 3. Situaciones con vegetación de pastizal

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, PP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	59543.	59543.2	106.41	<.001
Residual	54	30217.	559.6		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-1	-59543.	59543.2	106.41	<.001

Percentage variance accounted for 65.7

	estimate	s.e.	t(54)	t pr.
Constant	-133.1	16.9	-7.87	<.001
PP	0.2107	0.0204	10.32	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, PP\_desv

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	31684.	31684.	29.46	<.001
Residual	54	58076.	1075.		
Total	55	89760.	1632.		
Change	-1	-31684.	31684.	29.46	<.001

Percentage variance accounted for 34.1

Standard error of observations is estimated to be 32.8

	estimate	s.e.	t(54)	t pr.
Constant	-34.7	14.1	-2.45	0.017
PP_desv	0.2602	0.0479	5.43	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, Tmed

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	47511.	47511.4	60.73	<.001
Residual	54	42249.	782.4		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-1	-47511.	47511.4	60.73	<.001

Percentage variance accounted for 52.1

Standard error of observations is estimated to be 28.0

	estimate	s.e.	t(54)	t pr.
Constant	319.8	36.3	8.81	<.001
Tmed	-17.32	2.22	-7.79	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, Tmin

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	57085.	57085.1	94.34	<.001
Residual	54	32675.	605.1		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-1	-57085.	57085.1	94.34	<.001

Percentage variance accounted for 62.9

Standard error of observations is estimated to be 24.6

	estimate	s.e.	t(54)	t pr.
Constant	107.66	7.86	13.69	<.001
Tmin	-8.289	0.853	-9.71	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, deficit

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	68160.	68160.2	170.40	<.001
Residual	54	21600.	400.0		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-1	-68160.	68160.2	170.40	<.001

Percentage variance accounted for 75.5

Standard error of observations is estimated to be 20.0

	estimate	s.e.	t(54)	t pr.
Constant	45.90	2.74	16.78	<.001
deficit	0.1442	0.0110	13.05	<.001

## Apéndice VI – ANOVA de las regresiones y modelos empíricos

### 3. Situaciones con vegetación de pastizal

Response variate: Cgkg  
 Fitted terms: Constant, indETP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	72364.	72364.1	224.63	<.001
Residual	54	17396.	322.2		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-1	-72364.	72364.1	224.63	<.001

Percentage variance accounted for 80.3  
 Standard error of observations is estimated to be 17.9

	estimate	s.e.	t(54)	t pr.
Constant	-71.39	7.70	-9.27	<.001
indETP	112.45	7.50	14.99	<.001

Response variate: Cgkg  
 Fitted terms: Constant, indTemp

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	73864.	73864.2	250.92	<.001
Residual	54	15896.	294.4		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-1	-73864.	73864.2	250.92	<.001

Percentage variance accounted for 82.0  
 Standard error of observations is estimated to be 17.2

	estimate	s.e.	t(54)	t pr.
Constant	-85.23	8.13	-10.49	<.001
indTemp	2.413	0.152	15.84	<.001

### 4. Situaciones bajo uso agrícola-ganadero

Response variate: Cgkg  
 Fitted terms: Constant, AL

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	304.6	304.56	22.85	<.001
Residual	27	359.9	13.33		
Total	28	664.4	23.73		
Change	-1	-304.6	304.56	22.85	<.001

Percentage variance accounted for 43.8  
 Standard error of observations is estimated to be 3.65

	estimate	s.e.	t(27)	t pr.
Constant	5.62	1.64	3.44	0.002
AL	0.2081	0.0435	4.78	<.001

Response variate: Cgkg  
 Fitted terms: Constant, Amplitud

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	1.9	1.94	0.08	0.781
Residual	27	662.5	24.54		
Total	28	664.4	23.73		
Change	-1	-1.9	1.94	0.08	0.781

Residual variance exceeds variance of Y variate  
 Standard error of observations is estimated to be 4.95

	estimate	s.e.	t(27)	t pr.
Constant	11.64	4.00	2.91	0.007
Amplitud	0.075	0.266	0.28	0.781

# Apéndice VI – ANOVA de las regresiones y modelos empíricos

## 4. Situaciones bajo uso agrícola-ganadero

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, PP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	110.9	110.86	5.41	0.028
Residual	27	553.6	20.50		
Total	28	664.4	23.73		
Change	-1	-110.9	110.86	5.41	0.028

Percentage variance accounted for 13.6  
 Standard error of observations is estimated to be 4.53

	estimate	s.e.	t(27)	t pr.
Constant	-0.01	5.54	0.00	0.999
PP	0.01683	0.00724	2.33	0.028

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, ETP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	84.6	84.59	3.94	0.057
Residual	27	579.8	21.48		
Total	28	664.4	23.73		
Change	-1	-84.6	84.59	3.94	0.057

Percentage variance accounted for 9.5  
 Standard error of observations is estimated to be 4.63

	estimate	s.e.	t(27)	t pr.
Constant	-11.2	12.1	-0.93	0.363
ETP	0.0281	0.0142	1.98	0.057

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, arcilla

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	322.3	322.27	25.43	<.001
Residual	27	342.2	12.67		
Total	28	664.4	23.73		
Change	-1	-322.3	322.27	25.43	<.001

Percentage variance accounted for 46.6  
 Standard error of observations is estimated to be 3.56

	estimate	s.e.	t(27)	t pr.
Constant	3.65	1.92	1.90	0.068
arcilla	1.022	0.203	5.04	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, indETP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	29.2	29.24	1.24	0.275
Residual	27	635.2	23.53		
Total	28	664.4	23.73		
Change	-1	-29.2	29.24	1.24	0.275

Percentage variance accounted for 0.9  
 Standard error of observations is estimated to be 4.85

	estimate	s.e.	t(27)	t pr.
Constant	7.06	5.17	1.37	0.183
indETP	6.33	5.68	1.11	0.275

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, indTemp

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	161.8	161.76	8.69	0.007
Residual	27	502.7	18.62		
Total	28	664.4	23.73		
Change	-1	-161.8	161.76	8.69	0.007

Percentage variance accounted for 21.5  
 Standard error of observations is estimated to be 4.31

	estimate	s.e.	t(27)	t pr.
Constant	-2.40	5.19	-0.46	0.648
indTemp	0.334	0.113	2.95	0.007





## Apéndice VI – ANOVA de las regresiones y modelos empíricos

### 5. Modelos empíricos para la variabilidad de la fracción orgánica (general)

Response variate: MO

Fitted terms: Constant, C\_org, AL, Altitud, Amplitud, DAP, ETP, Epip, Dvmes, Dvpro, PP, Solum, Tmed, Tmin, indETP, indTemp, arcilla

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	16	1478.7	92.422	44.91	<.001
Residual	101	207.9	2.058		
Total	117	1686.6	14.415		
Change	-16	-1478.7	92.422	44.91	<.001

Percentage variance accounted for 85.7

Standard error of observations is estimated to be 1.43

#### Estimates of regression coefficients

	estimate	s.e.	t(101)	t pr.
Constant	-21.57	7.53	-2.86	0.005
C_org	0.00001493	0.00000941	1.59	0.115
AL	-0.0145	0.0176	-0.82	0.412
Altitud	0.00280	0.00105	2.67	0.009
Amplitud	-0.256	0.541	-0.47	0.638
DAP	-0.0674	0.0225	-3.00	0.003
ETP	0.0294	0.0143	2.05	0.043
Epip	-9.80	3.04	-3.23	0.002
Dvmes	-1.13	1.01	-1.13	0.263
Dvpro	13.6	12.1	1.13	0.263
PP	-0.0063	0.0104	-0.61	0.545
Solum	1.220	0.806	1.51	0.133
Tmed	0.502	0.788	0.64	0.525
Tmin	-1.016	0.918	-1.11	0.271
indETP	27.4	13.8	1.99	0.049
indTemp	-0.373	0.259	-1.44	0.153
arcilla	0.1932	0.0591	3.27	0.001

#### Correlations between parameter estimates

estimate	ref	correlations								
Constant	1	1.000								
C_org	2	-0.009	1.000							
AL	3	-0.108	0.068	1.000						
Altitud	4	-0.304	-0.054	0.063	1.000					
Amplitud	5	-0.093	-0.027	-0.234	0.406	1.000				
DAP	6	-0.001	-0.767	-0.057	0.054	0.073	1.000			
ETP	7	-0.462	0.075	0.385	-0.056	-0.490	-0.206	1.000		
Epip	8	-0.289	-0.203	0.072	0.206	-0.079	0.217	0.117	1.000	
Dvmes	9	0.246	-0.029	-0.102	0.373	0.520	-0.159	-0.326	-0.201	
Dvpro	10	-0.244	0.029	0.104	-0.372	-0.522	0.159	0.326	0.200	
PP	11	0.119	-0.038	-0.258	0.197	0.446	-0.003	-0.314	0.109	
Solum	12	-0.216	0.043	0.025	0.117	-0.213	0.065	0.191	-0.193	
Tmed	13	-0.084	-0.031	-0.026	-0.272	-0.711	0.092	-0.053	0.149	
Tmin	14	0.028	-0.015	-0.227	0.359	0.967	0.067	-0.520	-0.160	
indETP	15	-0.240	0.062	0.435	-0.158	-0.546	-0.153	0.937	0.057	
indTemp	16	0.069	-0.034	-0.358	-0.018	0.338	0.160	-0.767	-0.091	
arcilla	17	0.341	-0.169	-0.777	-0.114	0.263	0.014	-0.465	-0.108	
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Dvmes	9	1.000								
Dvpro	10	-1.000	1.000							
PP	11	0.167	-0.169	1.000						
Solum	12	-0.187	0.188	-0.039	1.000					
Tmed	13	-0.462	0.463	-0.298	0.229	1.000				
Tmin	14	0.548	-0.550	0.281	-0.279	-0.736	1.000			
indETP	15	-0.310	0.312	-0.406	0.190	-0.068	-0.542	1.000		
indTemp	16	0.159	-0.162	-0.088	-0.201	0.257	0.410	-0.846	1.000	
arcilla	17	0.260	-0.261	0.192	-0.247	-0.077	0.295	-0.426	0.319	1.000
		9	10	11	12	13	14	15	16	17

## Apéndice VI – ANOVA de las regresiones y modelos empíricos

### 5. Modelos empíricos para la variabilidad de la fracción orgánica (montes)

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, Altitud, arcilla

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	2	47325.	23663.0	101.66	<.001
Residual	34	7914.	232.8		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-2	-47326.	23663.0	101.66	<.001

Percentage variance accounted for 84.8  
Standard error of observations is estimated to be 15.3

	estimate	s.e.	t(34)	t pr.
Constant	-10.10	4.96	-2.04	0.049
Altitud	0.04955	0.00900	5.50	<.001
arcilla	2.377	0.509	4.67	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, PP, Amplitud, arcilla

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	3	46217.	15405.5	56.34	<.001
Residual	33	9024.	273.4		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-3	-46217.	15405.5	56.34	<.001

Percentage variance accounted for 82.2  
Standard error of observations is estimated to be 16.5

	estimate	s.e.	t(33)	t pr.
Constant	-59.2	13.7	-4.34	<.001
PP	0.0525	0.0177	2.97	0.005
Amplitud	2.389	0.691	3.46	0.002
arcilla	2.592	0.563	4.61	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, PP, Tmed, arcilla

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	3	45517.	15172.4	51.50	<.001
Residual	33	9723.	294.6		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-3	-45517.	15172.4	51.50	<.001

Percentage variance accounted for 80.8  
Standard error of observations is estimated to be 17.2

	estimate	s.e.	t(33)	t pr.
Constant	61.2	32.6	1.88	0.069
PP	0.0511	0.0184	2.78	0.009
Tmed	-5.10	1.73	-2.95	0.006
arcilla	2.801	0.570	4.92	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, indETP, arcilla, Epip

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	3	48083.	16027.5	73.89	<.001
Residual	33	7158.	216.9		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-3	-48083.	16027.5	73.89	<.001

Percentage variance accounted for 85.9  
Standard error of observations is estimated to be 14.7

	estimate	s.e.	t(33)	t pr.
Constant	10.9	10.3	1.06	0.296
indETP	35.10	9.38	3.74	<.001
arcilla	2.908	0.499	5.83	<.001
Epip	-151.3	36.3	-4.17	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, indTemp, arcilla

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	2	44880.	22440.1	73.64	<.001
Residual	34	10360.	304.7		
Total	36	55240.	1534.4		
Change	-2	-44880.	22440.1	73.64	<.001

Percentage variance accounted for 80.1  
Standard error of observations is estimated to be 17.5

	estimate	s.e.	t(34)	t pr.
Constant	-24.60	8.20	-3.00	0.005
indTemp	0.884	0.227	3.89	<.001
arcilla	2.774	0.583	4.76	<.001

## Apéndice VI – ANOVA de las regresiones y modelos empíricos

### 5. Modelos empíricos para la variabilidad de la fracción orgánica (pastizales)

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, indTemp, AL					
	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	2	73878.	36938.9	123.27	<.001
Residual	53	15882.	299.7		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-2	-73878.	36938.9	123.27	<.001

Percentage variance accounted for 81.6

Standard error of observations is estimated to be 17.3

	estimate	s.e.	t(53)	t pr.
Constant	-85.95	8.86	-9.70	<.001
indTemp	2.403	0.161	14.94	<.001
AL	0.031	0.146	0.21	0.831

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, indETP, arcilla					
	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	2	74751.	37375.5	131.98	<.001
Residual	53	15009.	283.2		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-2	-74751.	37375.5	131.98	<.001

Percentage variance accounted for 82.6

Standard error of observations is estimated to be 16.8

	estimate	s.e.	t(53)	t pr.
Constant	-77.80	7.55	-10.30	<.001
indETP	102.99	7.75	13.28	<.001
arcilla	1.130	0.389	2.90	0.005

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, indETP, arcilla, Epip					
	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	3	78731.	26243.8	123.74	<.001
Residual	52	11029.	212.1		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-3	-78731.	26243.8	123.74	<.001

Percentage variance accounted for 87.0

Standard error of observations is estimated to be 14.6

	estimate	s.e.	t(52)	t pr.
Constant	-35.8	11.7	-3.07	0.003
indETP	87.27	7.63	11.44	<.001
arcilla	1.201	0.337	3.56	<.001
Epip	-145.7	33.6	-4.33	<.001

Response variate: Cgkg

Fitted terms: Constant, PP, Tmed, arcilla					
	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	3	73438.	24479.5	77.99	<.001
Residual	52	16322.	313.9		
Total	55	89760.	1632.0		
Change	-3	-73438.	24479.5	77.99	<.001

Percentage variance accounted for 80.8

Standard error of observations is estimated to be 17.7

	estimate	s.e.	t(52)	t pr.
Constant	85.3	35.2	2.43	0.019
PP	0.1468	0.0211	6.96	<.001
Tmed	-10.57	1.60	-6.63	<.001
arcilla	0.391	0.469	0.83	0.409

### 5. Modelos empíricos para la variabilidad de la fracción orgánica (agroganadero)

Response variate: Cgkg / Fitted terms: Constant, arcilla, indTemp

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	2	353.0	176.51	14.74	<.001
Residual	26	311.4	11.98		
Total	28	664.4	23.73		
Change	-2	-353.0	176.51	14.74	<.001

Percentage variance accounted for 49.5

Standard error of observations is estimated to be 3.46

	estimate	s.e.	t(25)	t pr.
Constant	-2.32	4.17	-0.56	0.582
arcilla	0.872	0.218	4.00	<.001
indTemp	0.161	0.101	1.60	0.121

## Apéndice VI (Cont.) – ANOVA de las regresiones lineales

### 6. Modelos para retención hídrica (RLS)

Siglas

A0_3	Capacidad de campo, en % v/v (CC)
A15	Capacidad a la marchitez permanente, en % v/v (CMP)
AU	Agua útil = CC - CMP

Response variate: A0\_3

Fitted terms: Constant, AL

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	3334.	3334.10	57.38	<.001
Residual	59	3428.	58.11		
Total	60	6762.	112.71		
Change	-1	-3334.	3334.10	57.38	<.001

Percentage variance accounted for 48.4

Standard error of observations is estimated to be 7.62

	estimate	s.e.	t(59)	t pr.
Constant	3.15	2.64	1.19	0.238
AL	0.4579	0.0605	7.57	<.001

Response variate: A0\_3

Fitted terms: Constant, C\_org

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	2834.	2834.05	42.56	<.001
Residual	59	3928.	66.58		
Total	60	6762.	112.71		
Change	-1	-2834.	2834.05	42.56	<.001

Percentage variance accounted for 40.9

Standard error of observations is estimated to be 8.16

	estimate	s.e.	t(59)	t pr.
Constant	14.61	1.51	9.65	<.001
C_org	0.2720	0.0417	6.52	<.001

Response variate: A0\_3

Fitted terms: Constant, DAP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	1960.	1960.07	24.08	<.001
Residual	59	4802.	81.40		
Total	60	6762.	112.71		
Change	-1	-1960.	1960.07	24.08	<.001

Percentage variance accounted for 27.8

Standard error of observations is estimated to be 9.02

	estimate	s.e.	t(59)	t pr.
Constant	68.33	9.56	7.15	<.001
DAP	-38.02	7.75	-4.91	<.001

Response variate: A0\_3

Fitted terms: Constant, arcilla

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	4875.	4875.49	152.45	<.001
Residual	59	1887.	31.98		
Total	60	6762.	112.71		
Change	-1	-4875.	4875.49	152.45	<.001

Percentage variance accounted for 71.6

Standard error of observations is estimated to be 5.66

	estimate	s.e.	t(59)	t pr.
Constant	4.14	1.60	2.59	0.012
arcilla	1.284	0.104	12.35	<.001

Response variate: A0\_3

Fitted terms: Constant, limo

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	1623.	1622.75	18.63	<.001
Residual	59	5140.	87.11		
Total	60	6762.	112.71		
Change	-1	-1623.	1622.75	18.63	<.001

Percentage variance accounted for 22.7

Standard error of observations is estimated to be 9.33

	estimate	s.e.	t(59)	t pr.
Constant	9.22	3.14	2.94	0.005
limo	0.466	0.108	4.32	<.001



## Apéndice VI (Cont.) – ANOVA de las regresiones lineales

### 6. Modelos para retención hídrica (RLS)

Response variate: A15

Fitted terms: Constant, C_org					
	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	1060.9	1060.87	46.16	<.001
Residual	39	896.3	22.98		
Total	40	1957.1	48.93		
Change	-1	-1060.9	1060.87	46.16	<.001
Percentage variance accounted for 53.0					
Standard error of observations is estimated to be 4.79					
	estimate	s.e.	t(39)	t pr.	
Constant	7.06	1.21	5.86	<.001	
C_org	0.1886	0.0278	6.79	<.001	

Response variate: A15

Fitted terms: Constant, DAP					
	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	759.	758.92	24.70	<.001
Residual	39	1198.	30.72		
Total	40	1957.	48.93		
Change	-1	-759.	758.92	24.70	<.001
Percentage variance accounted for 37.2					
Standard error of observations is estimated to be 5.54					
	estimate	s.e.	t(39)	t pr.	
Constant	43.92	6.19	7.10	<.001	
DAP	-25.36	5.10	-4.97	<.001	

Response variate: A15

Fitted terms: Constant, arcilla					
	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	1194.3	1194.34	61.06	<.001
Residual	39	762.8	19.56		
Total	40	1957.1	48.93		
Change	-1	-1194.3	1194.34	61.06	<.001
Percentage variance accounted for 60.0					
Standard error of observations is estimated to be 4.42					
	estimate	s.e.	t(39)	t pr.	
Constant	0.24	1.83	0.13	0.895	
arcilla	0.806	0.103	7.81	<.001	

Response variate: A15

Fitted terms: Constant, arena					
	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	898.	897.79	33.05	<.001
Residual	39	1059.	27.16		
Total	40	1957.	48.93		
Change	-1	-898.	897.79	33.05	<.001
Percentage variance accounted for 44.5					
Standard error of observations is estimated to be 5.21					
	estimate	s.e.	t(39)	t pr.	
Constant	30.11	3.00	10.02	<.001	
arena	-0.3260	0.0567	-5.75	<.001	

Response variate: AU

Fitted terms: Constant, arcilla					
	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	233.	233.18	11.58	0.001
Residual	59	1188.	20.14		
Total	60	1421.	23.69		
Change	-1	-233.	233.18	11.58	0.001
Percentage variance accounted for 15.0					
Standard error of observations is estimated to be 4.49					
	estimate	s.e.	t(59)	t pr.	
Constant	8.85	1.27	6.97	<.001	
arcilla	0.2807	0.0825	3.40	0.001	

## Apéndice VI (Cont.) – ANOVA de las regresiones lineales

### 6. Modelos para retención hídrica (RLS)

Response variate: AU

Fitted terms: Constant, arena

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	372.	372.21	20.93	<.001
Residual	59	1049.	17.78		
Total	60	1421.	23.69		

Change -1 -372. 372.21 20.93 <.001

Percentage variance accounted for 24.9

Standard error of observations is estimated to be 4.22

	estimate	s.e.	t(59)	t pr.
Constant	21.01	1.89	11.09	<.001
arena	-0.1484	0.0324	-4.58	<.001

Response variate: AU

Fitted terms: Constant, limo

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	518.2	518.19	33.85	<.001
Residual	59	903.1	15.31		
Total	60	1421.3	23.69		

Change -1 -518.2 518.19 33.85 <.001

Percentage variance accounted for 35.4

Standard error of observations is estimated to be 3.91

	estimate	s.e.	t(59)	t pr.
Constant	5.62	1.32	4.27	<.001
limo	0.2633	0.0453	5.82	<.001

Response variate: AU

Fitted terms: Constant, ARLIM

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	1	492.6	492.58	31.29	<.001
Residual	59	928.7	15.74		
Total	60	1421.3	23.69		

Change -1 -492.6 492.58 31.29 <.001

Percentage variance accounted for 33.6

Standard error of observations is estimated to be 3.97

	estimate	s.e.	t(59)	t pr.
Constant	5.55	1.38	4.03	<.001
ARLIM	0.1760	0.0315	5.59	<.001

### 7. Modelos para retención hídrica (RLM)

Response variate: A0\_3

Fitted terms: Constant, arcilla, C\_org

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	2	5077.	2538.51	87.36	<.001
Residual	58	1685.	29.06		
Total	60	6762.	112.71		

Change -2 -5077. 2538.51 87.36 <.001

Percentage variance accounted for 74.2

Standard error of observations is estimated to be 5.39

	estimate	s.e.	t(58)	t pr.
Constant	4.44	1.53	2.90	0.005
arcilla	1.088	0.124	8.79	<.001
C_org	0.0906	0.0344	2.63	0.011

1 2 3

## Apéndice VI (Cont.) – ANOVA de las regresiones lineales

### 7. Modelos para retención hídrica (RLM)

Response variate: A0\_3

Fitted terms: Constant, arcilla, DAP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	2	5120.	2559.88	90.39	<.001
Residual	58	1643.	28.32		
Total	60	6762.	112.71		
Change	-2	-5120.	2559.88	90.39	<.001

Percentage variance accounted for 74.9  
Standard error of observations is estimated to be 5.32

	estimate	s.e.	t(58)	t pr.
Constant	24.26	7.01	3.46	0.001
arcilla	1.146	0.108	10.56	<.001
DAP	-14.88	5.07	-2.94	0.005

Response variate: A0\_3

Fitted terms: Constant, arcilla, DAP, C\_org

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	3	5161.	1720.46	61.25	<.001
Residual	57	1601.	28.09		
Total	60	6762.	112.71		
Change	-3	-5161.	1720.46	61.25	<.001

Percentage variance accounted for 75.1  
Standard error of observations is estimated to be 5.30

	estimate	s.e.	t(57)	t pr.
Constant	18.68	8.35	2.24	0.029
arcilla	1.077	0.122	8.84	<.001
DAP	-10.63	6.14	-1.73	0.088
C_org	0.0501	0.0411	1.22	0.228

Response variate: A15

Fitted terms: Constant, arcilla, C\_org

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	2	1518.5	759.24	65.77	<.001
Residual	38	438.7	11.54		
Total	40	1957.1	48.93		
Change	-2	-1518.5	759.24	65.77	<.001

Percentage variance accounted for 76.4  
Standard error of observations is estimated to be 3.40

	estimate	s.e.	t(38)	t pr.
Constant	0.03	1.41	0.02	0.982
arcilla	0.5716	0.0908	6.30	<.001
C_org	0.1194	0.0225	5.30	<.001

Response variate: A15

Fitted terms: Constant, arcilla, DAP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	2	1412.5	706.24	49.27	<.001
Residual	38	544.7	14.33		
Total	40	1957.1	48.93		
Change	-2	-1412.5	706.24	49.27	<.001

Percentage variance accounted for 70.7  
Standard error of observations is estimated to be 3.79

	estimate	s.e.	t(38)	t pr.
Constant	20.63	5.45	3.78	<.001
arcilla	0.6528	0.0967	6.75	<.001
DAP	-14.89	3.82	-3.90	<.001

Response variate: A15

Fitted terms: Constant, arcilla, C\_org, DAP

	d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F pr.
Regression	3	1549.9	516.63	46.94	<.001
Residual	37	407.2	11.01		
Total	40	1957.1	48.93		
Change	-3	-1549.9	516.63	46.94	<.001

Percentage variance accounted for 77.5  
Standard error of observations is estimated to be 3.32

	estimate	s.e.	t(37)	t pr.
Constant	9.44	5.73	1.65	0.108
arcilla	0.5509	0.0895	6.16	<.001
C_org	0.0941	0.0266	3.53	0.001
DAP	-6.84	4.05	-1.69	0.100

## Apéndice VI (Cont.) – ANOVA de las regresiones no lineales

### LINEAR - LINEAR

Response variate: Ag\_03

Explanatory: MODAP

Fitted Curve:  $A + B/(1 + D*X)$

d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F	pr.
Regression	2	3277.	1638.65	34.09	<.001
Residual	58	2788.	48.07		
Total	60	6065.	101.09		
Change	2	-3277.	-1638.65	-34.09	<.001

Estimates of parameters:

	estimate	s.e.
D	-0.0187	0.0135
B	62.6	64.8
A	-47.0	65.7

### EXPO - LINEAR

Response variate: Ag\_03

Explanatory: MODAP

Fitted Curve:  $A + B*R**X + C*X$

Constraints:  $R < 1$

d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F	pr.
Regression	3	3553.	1184.32	26.87	<.001
Residual	57	2512.	44.08		
Total	60	6065.	101.09		
Change	3	-3553.	-1184.32	-26.87	<.001

Estimates of parameters:

	estimate	s.e.
R	0.135	0.184
B	-27.5	21.9
C	1.273	0.278
A	18.36	2.44

### QUADRATIC LINEAR

Response variate: Ag\_03

Explanatory: MODAP

Fitted Curve:  $A + B/(1 + D*X) + C*X$

d.f.	s.s.	m.s.	v.r.	F	pr.
Regression	3	3446.	1148.57	24.99	<.001
Residual	57	2620.	45.96		
Total	60	6065.	101.09		
Change	3	-3446.	-1148.57	-24.99	<.001

Estimates of parameters:

	estimate	s.e.
D	-37.	647.
B	170.	3200.
C	1.221	0.348
A	19.50	3.90



## Apéndice VII – Estudio de caso para la relación suelo-paisaje

Este apéndice presenta los resultados del relevamiento realizado durante el trabajo de campo en un establecimiento agrícola-ganadero ubicado en Las Taguas (sector llanuras medanosas con lagunas permanentes; provincia del espinal), 40 km N de la localidad de Buena Esperanza, Provincia de San Luís, a fin de complementar e ilustrar lo tratado en Sección 5.3 – Figura 5.18.

### *Caracterización de los ambientes:*

Los ambientes 1 y 2 representan lagunas permanentes de drenaje centrípeto asociadas a las formaciones medanosas, con salinización perilacunar, y las áreas periféricas a médanos poco a medianamente estabilizados. En estos ambientes se presentan pajonales -pastizales samm filos- e isletas de cha nar (*Geoffroea decortycans*). El ambiente 3 constituye el área de paleom danos estabilizados con un relieve suavizado, normal ondulado y con pendientes largas del 1 al 2%. El ambiente 4 corresponde a las planicies intermedanosas con un relieve plano a muy suavemente ondulado, con pendientes muy largas del orden de 0,5 a 1%. En estos ambientes aparecen bosques de Caldén (*Prosopis caldenia*) abierto con el pastizal graminoso asociado al mismo. En estas situaciones es posible identificar dos sub-ambientes característicos: el umbr filo, donde aparece Cebadilla (*Bromus brevis*) como la principal especie del estrato graminoso; el ambiente de “abra” presenta un pastizal con especies de buen valor forrajero como *Piptochaetium napostense*, *Poa sp.* y *Setaria sp.*. Ante la presencia de discontinuidades en las condiciones de sitio, aparecen isletas de cha nar. Esta fisionomía de la vegetación fue observada en el lote 1 del establecimiento, el cual se encontraba en un descanso anual bajo un esquema de pastoreo rotativo con alta carga animal, y en una situación geomorfológica similar al ambiente 3. Ante elevada presión de pastoreo el pastizal es dominado por la Paja de las viscacheras (*Stipa eryostachia*), de menor palatabilidad y preferencia animal. Cuando compactación del suelos es aún mayor aparece el Olivillo (*Hyalis argentea*) invadiendo el pastizal. Esta situación fue observada en el lote 6, donde se encuentra instalado un molino y una aguada, y donde la densidad de árboles es menor. El ambiente 5 representa áreas de mayor movimiento, constituyendo un relieve normal fuertemente ondulado, donde alternan lomas medanosas estabilizadas de pendientes cortas de 2 a 3% o mayores (bordos) con bajos cóncavos no muy extendidos, que constituyen ambientes cum licos y no presentan drenaje impedido. En estos ambientes aparece el bosque de Caldén semicerrado con su fisionomía característica aunque con un porte arbóreo algo mayor en las situaciones de bajo. Estas situaciones fueron relevadas en el lote 2 del establecimiento, el cual se encontraba en pastoreo, y donde se observó la presencia de *Schizachyrium plumigerum*, *Poa ligularis*, *Stipa eryostachia*, *Bromus brevis* y *Setaria leianta*.

### *Descripción de los perfiles observados (Tabla A):*

El suelo del lote 1, franco arenoso grueso, presenta un horizonte A de 24 cm, pardo oscuro, con una capa superficial de 10 cm de estructura granular asociada a la actividad biológica, una capa con estructura en bloques subangulares medios débiles, algo densificada. Un horizonte A/C entre los 24 y 48 cm, pardo, con muy débil estructuración en bloques subangulares que rompen a grano simple, y que constituye una transición muy gradual hacia el horizonte C, masivo, que aparece libre de carbonatos hasta los 80 cm. Taxonómicamente, este suelo corresponde a un *Ustipsament típico*. Variantes de este perfil bajo situación de desmonte y labranzas para implantación de pasturas y verdeos fueron descriptas en los lotes 11 y 14. Los suelos del lote 2 fueron estudiados en situación de bordo y de bajo. El suelo del bordo presenta características similares al descripto para el lote 1, aunque con menor desarrollo, de textura arenosa fina y excesivamente drenado de permeabilidad muy rápida, con baja capacidad de retención hídrica. La secuencia de horizontes es A/C - C, aunque aparece un Ap incipiente de 7 cm producto del pisoteo. Corresponde a un *Torripsament  stico*, sin presencia de carbonatos hasta 1,5 m de profundidad. El suelo de las posiciones de bajo presenta un desarrollo algo mayor. El horizonte A alcanza los 27 cm de profundidad, pardo oscuro,

con un Ap de 9 cm de estructura en bloques subangulares medios moderados, con signos de compactación leve entre los 5 y 9 cm de profundidad. Entre los 9 y 27 cm la estructura es en bloques subangulares medios débiles. Entre los 27 y los 47 cm se desarrolla un horizonte transicional A/C y luego un C libre de carbonatos hasta los 130 cm, donde comienza a observarse débil reacción al HCl. Los suelos del lote 6 presentan signos evidentes de compactación por pisoteo a pesar de su textura arenosa fina y un color claro desde la superficie que denota los bajos niveles de materia orgánica presentes. En la situación de abra -olivillar- aparece un horizonte Ap de 15 cm compactado, que se continúa a partir de un límite claro hasta los 33 cm, con una estructuración en bloques medios débiles. Por debajo se evidencia una transición (A/C) gradual hacia el C que comienza a los 52 cm, masivo y libre de carbonatos hasta los 85 cm, donde comienza una reacción muy débil. En la situación bajo monte se manifiesta un horizonte superficial de 2,5 cm con estructura granular débil y algo más oscuro, asociado a la actividad biológica. Por debajo, continúa a partir de un límite abrupto un horizonte Ap compactado, hasta los 10 cm, que presenta una estructura en bloques aplanados con tendencia laminar incipiente. Entre los 10 y los 28 cm continúa una capa con estructura en bloques medios moderados a débiles; entre los 28 y los 52 cm continúa un A/C débilmente estructurado y con características similares a lo descrito para el abra. Estos suelos corresponden a *Ustipsament típicos*.

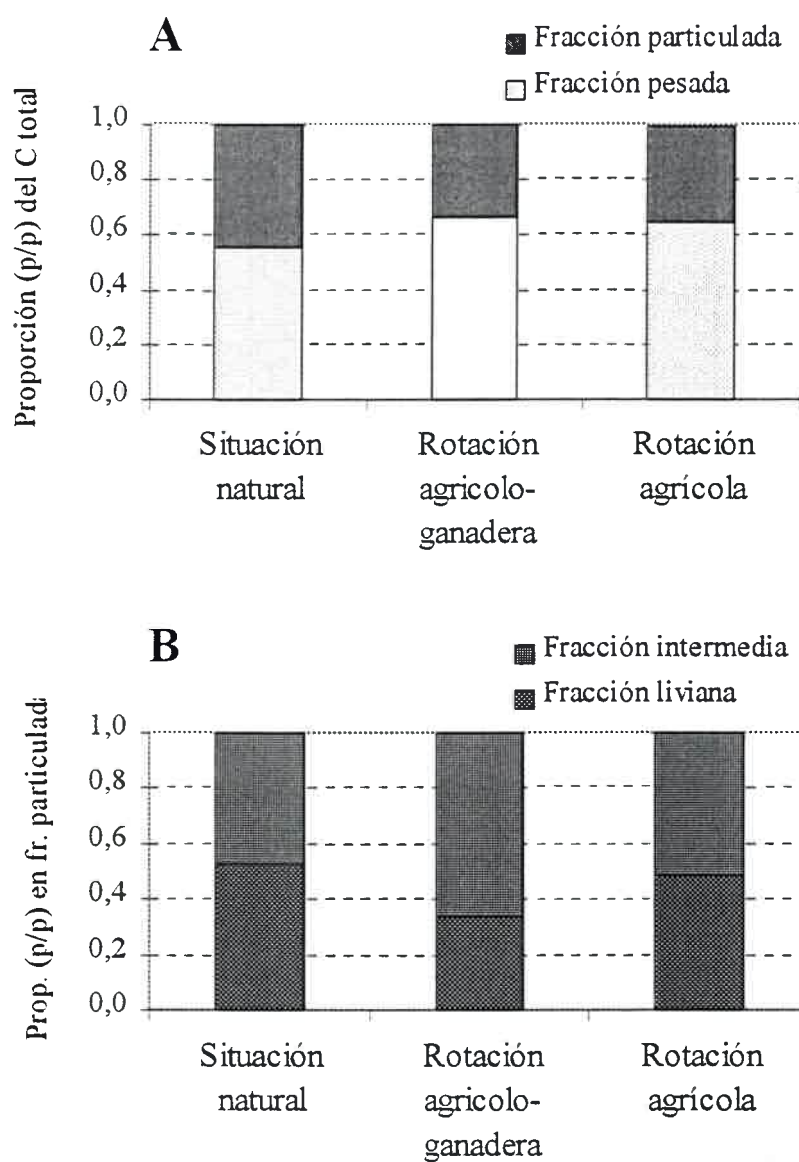
**Tabla A:** Perfiles observados en un establecimiento ubicado en Las Taguas, 40 km N de la localidad de Buena Esperanza, Provincia de San Luis. Los ambientes aparecen representados en Sección 5.3 – Fig. 5.18.

Ambiente/ ubicación	Ambiente	Perfil	Profundidad (cm)	Materia orgánica (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )
Lote 1	3	A1	0 a 10	2,17	5,1	12,4	82,5	1,22
		A2	10 a 24	0,47	5,1	9,5	85,5	1,20
		A/C	24 a 48	s/d	3,9	8,2	87,9	s/d
		C	48 a +	s/d	3,4	7,3	89,3	s/d
Lote 6 (abra)	4	Ap	0 a 15	0,78	5,4	14,2	80,4	1,39
		A	15 a 33	s/d	5,2	12,3	82,5	1,42
		A/C	33 a 52	s/d	3,6	8,9	87,5	s/d
		C	52 a 85	s/d	3,4	7,2	89,4	s/d
		Ck	85 a +	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d
Lote 6 (monte)	4	Ap	0 a 10	0,94	5,4	14,2	80,4	1,28
		A	10 a 28	s/d	5,2	12,3	82,5	1,32
		A/C	28 a 52	s/d	3,6	8,9	87,5	s/d
			52 a 86	s/d	3,4	7,2	89,4	s/d
		C	86 a +	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d
Lote 2 (bajo)	5	Ap	0 a 9	3,44	4,6	6,2	89,2	1,21
		A	9 a 27	1,17	4,1	6,1	89,9	1,24
		A/C	27 a 47	s/d	3,8	5,9	90,3	s/d
		C	47 a +	s/d	3,2	5,9	90,9	s/d
Lote 2 (loma)	5	Ap	0 a 7	2,57	2,6	6,1	91,3	1,28
		A/C	7 a 48	1,01	2,3	6,0	91,7	1,30
		C	48 a +	s/d	1,9	5,5	92,7	s/d
Lote 11	3	A	0 a 17	0,48	5,1	8,2	86,7	1,46
		A/C	17 a 48	s/d	3,9	8,2	87,9	s/d
		C	48 a +	s/d	3,4	7,3	89,3	s/d
Lote 14	3	A1	0 a 12	0,95	5,1	12,4	82,5	1,30
		A2	12 a 24	s/d	5,1	9,5	85,5	s/d
		A/C	24 a 48	s/d	3,9	8,2	87,9	s/d
		C	48 a +	s/d	3,4	7,3	89,3	s/d

Las texturas fueron tomadas de observaciones previas en suelos de similares características y ubicación

## Apéndice VIII – Composición de la fracción orgánica

Proporción relativa (p/p) de las diferentes fracciones físicas del carbono total contenido en suelos del sector fuertemente ondulado de las llanuras bien drenadas bajo diferentes situaciones de uso de la tierra.



Figuras: [A] Proporción de las fracciones pesada (0 – 53  $\mu\text{m}$ ) y particulada (53 – 2000  $\mu\text{m}$ ) en el carbono total; [B] Proporción de las fracciones intermedia (53-250  $\mu\text{m}$ ) y liviana (250-2000  $\mu\text{m}$ ) en el total de la fracción particulada.

## Apéndice IX – Análisis de sensibilidad

**Tabla A:** Valor potencial para el C total simulado por CENTURY para diferentes sitios provenientes de vegetación natural de tipo Monte, y variación porcentual en el nivel de C total simulado bajo diferentes situaciones de uso histórico de la tierra durante el siglo XX.

Sub-región	Sitio*	C total** potencial (g m-2)	Variación relativa del C total (%)						
			Natural	Pastoreo 1	Pastoreo 2	Desmonte 1	Desmonte 2	Labranza 1	Labranza 2
Llanuras bien drenadas	<i>Esp</i>	5872	-0,1	-0,7	-1,4	-38,5	-31,1	-79,7	-75,3
	<i>Fam</i>	6339	-0,9	-0,3	-0,6	-34,4	-27,5	-78,4	-73,6
	<i>LM</i>	6538	-0,8	-0,7	-1,9	-34,3	-28,0	-78,1	-73,2
	<i>LSm</i>	6619	-0,1	-0,2	-0,4	-32,8	-26,5	-77,9	-72,6
	<i>Lab</i>	8191	-0,4	-0,7	-0,8	-35,7	-29,3	-73,9	-67,5
	<i>Lal</i>	6847	0,2	-0,3	-0,2	-40,7	-33,7	-78,1	-72,9
	<i>Lam</i>	8758	-0,5	-0,7	-1,3	-33,8	-27,6	-73,0	-66,6
	<i>Mug</i>	8594	0,3	-0,3	-0,8	-33,9	-27,6	-72,6	-65,9
	<i>Unb</i>	6602	0,1	-0,3	-0,2	-36,0	-29,9	-77,0	-71,4
Llanuras medanosas	<i>Mkm</i>	5958	-4,9	-6,6	-6,0	-46,5	-39,1	-82,2	-78,2
	<i>Bgm1</i>	4010	-0,5	1,4	0,2	-35,8	-27,3	-81,6	-77,2
	<i>Lvm</i>	4086	0,9	2,1	2,5	-34,8	-26,9	-81,2	-76,7
	<i>Roc</i>	4644	0,4	2,5	2,1	-30,0	-22,2	-77,8	-72,5
	<i>Rom</i>	4540	0,0	2,2	1,1	-31,2	-23,1	-80,2	-74,8
	<i>LTm1</i>	4012	-0,1	-0,4	0,4	-28,9	-20,1	-79,9	-74,7
	<i>LTm2</i>	3893	-1,4	-1,7	-1,0	-31,1	-22,0	-80,7	-76,1
	<i>LTm3</i>	3779	-2,2	-0,6	-1,2	-31,5	-21,8	-81,7	-76,2

\*Código de sitio correspondiente a los presentados en Apéndice V – 3.

\*\*Suma del C orgánico edáfico (fr. Activa, estable y pasiva).



## Apéndice IX – Análisis de sensibilidad (cont.)

**Tabla B:** Sensibilidad parcial relativa (valor absoluto) del modelo para el valor de C en el suelo\*\* simulado frente a variaciones en variables de manejo del agrosistema. Resultados promedio de simulaciones durante 100 años en sitios provenientes de vegetación natural de tipo Monte.

Sub-región	Sitio*	Intensidad de Pastoreo		Tiempo desde el desmonte		Tiempo bajo labranza	
		0,6 a 0,8 UG	0,8 a 1,2 UG	0 a 50 años	50 a 100 años	0 a 30 años	30 a 100 años
Llanuras bien drenadas	<i>Esp</i>	0,01	0,01	0,45	0,11	3,05	0,18
	<i>Fam</i>	0,01	0,00	0,37	0,09	2,75	0,18
	<i>LM</i>	0,00	0,02	0,38	0,09	2,71	0,18
	<i>LSm</i>	0,00	0,00	0,36	0,09	2,65	0,19
	<i>Lab</i>	0,01	0,00	0,41	0,09	2,06	0,20
	<i>Lal</i>	0,01	0,00	0,51	0,10	2,69	0,19
	<i>Lam</i>	0,00	0,01	0,37	0,09	1,98	0,19
	<i>Mug</i>	0,01	0,01	0,38	0,09	1,94	0,20
	<i>Unb</i>	0,01	0,00	0,43	0,09	2,50	0,20
Llanuras medanosas	<i>Mkm</i>	0,04	0,01	0,56	0,12	3,37	0,18
	<i>Bgm1</i>	0,04	0,02	0,37	0,12	3,36	0,19
	<i>Lvm</i>	0,02	0,01	0,38	0,11	3,34	0,19
	<i>Roc</i>	0,04	0,01	0,29	0,10	2,65	0,19
	<i>Rom</i>	0,04	0,02	0,30	0,11	2,97	0,21
	<i>LTm1</i>	0,01	0,02	0,25	0,11	2,95	0,21
	<i>LTm2</i>	0,01	0,01	0,27	0,12	3,12	0,19
	<i>LTm3</i>	0,03	0,01	0,25	0,12	3,12	0,23

\*Código de sitio correspondiente a los presentados en Apéndice V – 3.

\*\*Suma del C orgánico edáfico (fr. Activa, estable y pasiva).

## Apéndice IX – Análisis de sensibilidad (cont.)

**Tabla C:** Valor potencial simulado por CENTURY para la cantidad de C total ( $\text{g m}^{-2}$ ) y su distribución en los diferentes compartimentos del subsistema suelo-residuos orgánicos para dos sitios provenientes de vegetación tipo Monte; variación relativa (%) en los principales componentes por efecto de la historia de uso y manejo de la tierra durante el siglo XX.

Sub-región/ Uso histórico de la tierra	C total en el subsistema	C en el suelo			Biomasa microbiana superficial	Residuos orgánicos		Fracción metabólica residual*
		Fr. activa	Fr. estable	Fr. pasiva		Superficial	Sub-superf.	
<b>Llanuras bien drenadas (LSm)</b>								
Potencial ( $\text{g m}^{-2}$ )	7225	147	4604	1868	86	411	302	57
Natural	-0,3	-1,3	0,0	-0,2	-2,1	-2,1	-5,7	23,1
Pastoreo 1	0,4	3,3	-0,3	0,0	1,2	-2,7	4,4	28,2
Pastoreo 2	-0,1	-1,1	-0,5	0,0	-1,9	4,5	1,6	22,4
Desmonte 1	-33,2	-23,9	-45,3	-2,8	-61,9	-53,0	-21,4	-31,7
Desmonte 2	-27,5	-18,3	-37,1	-0,9	-60,7	-55,9	-24,7	-40,3
Labranza 1	-79,7	-98,3	-98,8	-24,7	-100,0	-100,0	-99,1	-100,0
Labranza 2	-74,8	-96,6	-97,0	-10,7	-99,9	-99,8	-98,1	-100,0
<b>Llanuras medanosas** (Mkm)</b>								
Potencial ( $\text{g m}^{-2}$ )	6264	102	4184	1327	93	453	320	56
Natural	1,1	1,0	1,4	-0,3	-2,0	2,5	-5,5	76,8
Pastoreo 1	0,8	7,8	-1,3	0,0	7,7	-0,2	9,7	20,5
Pastoreo 2	0,5	0,7	-0,4	0,0	2,1	0,8	1,7	32,4
Desmonte 1	-42,8	-28,5	-56,1	-3,8	-62,0	-61,8	-29,7	-61,3
Desmonte 2	-34,7	-15,5	-46,8	-1,1	-48,8	-56,3	-16,7	-54,7
Labranza 1	-83,0	-98,9	-99,3	-22,5	-100,0	-100,0	-99,4	-100,0
Labranza 2	-79,2	-97,6	-97,7	-9,7	-99,9	-99,9	-98,7	-100,0

\*Comprende sólo a la fracción de residuos en superficie

\*\*Sector noreste

## Apéndice IX – Análisis de sensibilidad (cont.)

Tabla D: Sensibilidad parcial relativa del modelo para el valor de C total\*\* simulado frente a variaciones en variables de manejo del agrosistema. Resultados promedio de simulaciones durante 100 años en sitios provenientes de vegetación natural de tipo Monte.

Sub-región (sitio*)	Partición del C total*	Intensidad de Pastoreo		Tiempo desde el desmonte		Tiempo bajo labranza	
		0,6 a 0,8 UG	0,8 a 1,2 UG	0 a 50 años	50 a 100 años	0 a 30 años	30 a 100 años
Llanuras bien drenadas (LS)	SSRO	-0,01	-0,01	0,38	-0,08	2,96	-0,19
	Fr. activa	-0,08	-0,09	0,21	-0,07	28,39	-0,50
	Fr. estable	0,00	0,01	0,59	-0,13	32,11	-0,59
	Fr. pasiva	0,00	0,00	0,01	-0,02	0,12	-0,16
	BMS	-0,06	-0,07	1,49	-0,03	-	-0,80
	ROS	0,15	0,01	1,22	0,07	-	-0,77
	ROP	-0,05	-0,19	0,25	0,04	-	-0,51
	FMR	-0,09	-0,08	1,06	0,14	-	-0,43
Llanuras*** medanosas (Mk)	SSRO	-0,01	0,01	0,55	-0,12	3,86	-0,18
	Fr. activa	-0,13	-0,13	0,19	-0,15	40,26	-0,56
	Fr. estable	0,02	0,06	0,90	-0,18	42,36	-0,67
	Fr. pasiva	0,00	-0,01	0,01	-0,03	0,11	-0,14
	BMS	-0,10	-0,18	0,92	-0,26	-	-0,81
	ROS	0,02	0,05	1,35	-0,13	-	-0,70
	ROP	-0,15	-0,28	0,14	-0,16	-	-0,55
	FMR	0,20	0,93	2,90	-0,15	-	-0,63

\*Código de sitio correspondiente a los presentados en Apéndice V – 3.

\*\*Suma del C orgánico edáfico (fr. Activa, estable y pasiva) más el correspondiente a residuos orgánicos; SSRO: subsistema suelo-residuos orgánicos; BMS: biomasa microbiana superficial; ROS: residuos orgánicos en superficie; ROP: residuos orgánicos en el perfil; FMR: fracción metabólica en los residuos (superficiales).

\*\*\*Sector noreste

## Apéndice X – Ejemplo de aplicación regional<sup>10</sup>

**Tabla A**

Atributos del Sitio	Unidad	Las Selvas	Sarmiento
Arcilla	%	13,2	6,0
Arena	%	47,8	79,3
Profundidad epipedón	m	0,21	0,19
Materia orgánica <sup>a</sup>	g kg <sup>-1</sup>	21,0	10,2
Densidad aparente	kg m <sup>-3</sup>	1270	1310
Precipitaciones	mm	762	693
Temperatura media máxima	°C	24,7	25,8
Temperatura media mínima	°C	9,7	8,8

<sup>a</sup> Valor actual

**Tabla B**

Sitio	Escenario de uso y manejo simulado	
	Rotación actual	Rotación mejorada
Las Selvas	Maní-barbecho corto	Maíz-barbecho
	Trigo-Soja <sup>a</sup>	Girasol-barbecho
	Maíz-barbecho (pastoreo de rastrojos)	Trigo-Soja
		Barbecho-Centeno
	Cinco años pastura <sup>b</sup>	
Sarmiento	Maní-barbecho	Soja/Maní-barbecho
	Soja-barbecho	Trigo-barbecho
	Maíz-barbecho (pastoreo de rastrojos)	Maíz-barbecho
	Centeno-pastura (3 años)	Centeno-pastura (6 años)

<sup>a</sup> Su frecuencia en la simulación fue incrementada a partir de 1990.

<sup>b</sup> Carga animal 1.2 y 0.9 unidades ganaderas por ha para Las Selvas y Sarmiento, respectivamente.

<sup>10</sup> Tomado del artículo: "Exploring land use scenarios of increased agrodiversity by long-term simulation of soil organic matter in central Argentina" - Tittonell, P., De Grazia, J., de Hek, S. y Bricchi, E. *Soil Use and Management*, enviado en Julio 2004.





## Summary<sup>11</sup>

### **Soil organic carbon in central Argentina. Deriving soil indicators of sustainability on the basis of current soil C levels and their evolution in time.**

Sustainable agricultural systems (agroecosystems) are expected to meet their production and environmental functions, while harmonising their biophysical and socio-economic dimensions – in terms of efficiency, diversity and conservation – both in the short and in the long term. In many regions of Argentina, agricultural systems are currently undergoing simplification and degradation processes that make them unsustainable. Re-designing agroecosystems requires methodological tools to evaluate and monitor their sustainability. In such sense, soil health and quality attributes play a key role for the biophysical dimension of the agroecosystems, and provide sensitive indicators to environmental changes at different spatial-temporal scales. Soil organic matter (SOM) dynamics integrates several functional aspects of soil health and quality. Hence, SOM simulation modelling represents a useful approach for sustainable land use scenario analysis. Such an approach implies regional understanding of and knowledge on (i) factors controlling SOM dynamics, (ii) its relationship with soil properties defining soil health and quality and (iii) the sensitivity of any SOM simulation model to the effect of the various environmental and management factors on system C balances. This study was undertaken to achieve such goals for the central Argentina region – characterised by strong environmental and agricultural production gradients –, combining empirical with mechanistic models within the framework of soil health and quality evaluation, and analysing the sensitivity of SOM model CENTURY to the varying regional and agroecological factors. The study shows how the different factors considered (soil texture, climate, vegetation and land use) affect SOM levels and that their relative importance vary for the different sub regions identified: well and poorly drained plains, sandy plains, foothills and mountain areas. Factors of smaller-scale variability (e.g. drainage) may also have a strong effect on SOM levels. Texture appeared as the main single factor controlling SOM due to the multiple mechanisms of soil C stabilisation, which must be considered when adopting reference values for soil health and quality evaluation. Simple empirical models using soil texture and SOM content were derived to estimate reference regional values for soil physical (water retention) and chemical (cation exchange capacity) properties. However, important changes in quality aspects of soil C (physical fractions) were observed, strongly affected by land use and management. They need to be functionally related to model C fractions (active-slow-passive) for better understanding of the simulation results. CENTURY was sensitive to the agroecological, land use and management gradients in the region, allowing for the study of several system processes, such as long term C balances (CO<sub>2</sub> dynamics) or simulation of annual C fixation into biomass. An example of regional application of this approach is also presented to illustrate possible uses of the model in long term scenario analysis.

---

<sup>11</sup> Alternative keywords: Sustainable Agroecosystems, SOM models, soil health, soil quality, CENTURY

60193

