

ABUNDANCIA NATURAL EN ^{13}C Y ^{14}C DE SUELO EN RELACION A LOS CAMBIOS AMBIENTALES DEL HOLOCENO TARDIO EN LA REGION PAMPEANA HUMEDA

ANDRIULO, A.¹, BALESSENT, J.²,

GUILLEMOT, J.³, & CARDONE, G.⁴

RESUMEN

Se estudiaron las variaciones del contenido de Carbono total y de la abundancia natural de ^{13}C y ^{14}C del perfil virgen de un Argiudol representativo del centro de la región pampeana húmeda. Las mismas determinaciones se realizaron en el horizonte superficial de dos Argiudoles situados en los extremos Norte y Sur de la región. Paralelamente se determinó la abundancia natural de ^{13}C en las especies consideradas más importantes en el origen de dicha abundancia. La distribución vertical del C total se corresponde con los suelos de pradera de clima templado. Además, la disminución del stock de C con la profundidad, incluyendo el horizonte B_{21t} , no presenta una disminución paralela de la actividad ^{14}C , mostrando una alta velocidad de convección debido a un drenaje climático favorable que provoca un enriquecimiento actual de C en el B_{21t} . La edad media del fondo del perfil (2760 años) confirmó que el suelo actual se originó en el Holoceno tardío. La distribución del ^{13}C del perfil puede ser explicada por la hipótesis que relaciona la ocurrencia de períodos cálidos/húmedos con C edáfico proveniente de comunidades de ciclo fotosintético, preferentemente C4, y la de períodos frescos/secos con C edáfico proveniente de comunidades de ciclo fotosintético, preferentemente C3. La abundancia natural de ^{13}C del horizonte superficial estuvo de acuerdo con la abundancia natural de ^{13}C de la vegetación descrita como nativa y con la introducida durante la colonización española. La abundancia natural de ^{13}C y ^{14}C en los horizontes superficiales de los Argiudoles de los extremos Norte y Sur de la región estudiada demostraron, en concordancia con el clima actual, la existencia de C edáfico originado por vegetación C4 de reciclado rápido en el Norte y por vegetación C3 de reciclado más lento en el Sur.

Palabras claves: datación radiocarbónica, abundancia natural de ^{13}C , suelo, Cuaternario, Región pampeana húmeda.

SUMMARY

Radiocarbon date and soil plant ^{13}C natural abundance related to the environmental changes during the late holocene in the humid pampa region

Total C content and $d^{13}\text{C}$ and $d^{14}\text{C}$ natural abundance changes were determined in a virgin soil profile that is common in the central region of the Argentine Humid Pampa. The same variables were analyzed in the surface horizon of two soils located in the north and south limits of the region.

1.- Sección Suelos. INTA, EEA Pergamino, C.C. 31. (2700) Pergamino, Argentina.

2.- Centre d'Énergie Atomique de Caradache, Francia.

3.- INRA, Science du Sol, Versailles, Francia.

4.- INTA, UEEA, Casilda.

Manuscrito recibido el 10 de abril de 2001 y aceptado para su publicación el 19 de marzo de 2002.

All soils belong to the Great Group of Argiudolls. The natural enrichment of the main plant species that originated this soil C was also measured. Vertical distribution of total C is similar to that of the temperate prairie soils. The magnitude of the decrease in C stock with depth (B21t horizon included) is not parallel the $\delta^{14}\text{C}$ activity decrease. It suggests a high convective migration in a favorable climatic drainage that enriches the actual C in the B21t horizon. The half life of the profile bottom C (2760 years) confirmed the fact that the soil originated in the late Holocene. The occurrence of warm/wet periods developed a dominating C4 vegetation and the occurrence of cold/dry periods developed a dominating C3 vegetation. The $\delta^{13}\text{C}$ natural abundance of the surface horizons was in agreement with the $\delta^{13}\text{C}$ natural abundance of the native and introduced vegetation. Such as the actual climatic conditions suggest, the soil surface horizon in the north limit of the region had a C4-derived C with rapid recycling while the south limit had C3-derived C of slower recycling.

Key words: radiocarbon dating, ^{13}C natural abundance, soil, quaternary, Humid Pampa region.

INTRODUCCIÓN

La incorporación de las técnicas isotópicas de abundancia natural del carbono (^{13}C y ^{14}C) en el estudio de la materia orgánica del suelo (MO) puede aportar nueva información sobre los cambios ambientales de una región determinada.

La llanura pampeana, por su extensión, homogeneidad geológica y geomorfológica, bajo relieve y cobertura sedimentaria de grano fino, se caracteriza por una gran sensibilidad ante los cambios ambientales (Iriando, 1994). La aplicación de las técnicas isotópicas puede arrojar resultados interesantes sobre los cambios climáticos, edáficos y fitológicos ocurridos en la región durante los últimos miles de años. Esta información, utilizada conjuntamente con la valiosa contribución de los cuaternaristas internacionales y locales, puede mejorar la precisión de la ocurrencia de cambios en tiempo y espacio. La región pampeana está esencialmente constituida por una gran planicie formada por sedimentos modernos no consolidados. (Moscatelli, 1991). El clima puede definirse como templado húmedo sin estación seca y con un verano muy cálido (Hall *et al.*, 1992). Los sedimentos del Pleis-

toceno tardío constituyen la mayor parte de la cobertura superficial de la Pampa. Estos sedimentos se formaron durante el último máximo glacial de los Andes y se los denomina «sistema eólico pampeano» (Iriando & Krohling, 1995). Estos autores señalan que el sistema está formado por el Mar de Arena Pampeano y una faja periférica de Loess (Fig. 1b).

El mar de arena es un sistema sedimentario eólico, que cubre 200.000 km² entre las latitudes de 33 °S y 38 °S, formando la mitad sur de la Pampa en Argentina central. La faja periférica de Loess rodea al Mar de Arena por tres direcciones; tiene entre 200 y 300 km de ancho y una longitud de 2000 km. Los sedimentos, compuestos por arena muy fina y fina limosa, se originaron principalmente en la Alta Cordillera (latitudes de 28° S hasta 36 °S) por procesos nivales y criogénicos; los productos de la meteorización física fueron transportados por aguas de deshielo hacia el sur a lo largo del sistema fluvial del Desaguadero y finalmente deflacionados en dirección norte y noreste por vientos australes (en el sur de la provincias de Mendoza y La Pampa). Cerca del límite Norte de la Patagonia, el mar de arena comenzó a desarrollarse en condiciones de desierto frío. Hacia el NNE, cruzando el río Salado de la

Cuadro 2: Interacción entre la edad de las semillas (15 y 20 DDA) y los medios de cultivo (B5 y MS) medida sobre el porcentaje de germinación (% G) de las semillas inmaduras de soja de los cvs. W y S.

Medios de cultivo	Edad	% G
B5	15 DDA	34,34 a
	20 DDA	35,00 a
MS	15 DDA	35,62 a
	20 DDA	20,00 b

Letras iguales dentro de cada medio de cultivo no difieren ($p < 0,05$)

Fig. 1: a. Isotermas e isohietas medias anuales de la región (tomado de Moscatelli, 1991). b. Sistema eólico pampeano (tomado de Iriondo, 1990a).

Provincia de Buenos Aires, el clima en la llanura fue peridesértico, lo que permitió la precipitación y el fijamiento del polvo transportado en suspensión por el viento, y así, la formación del manto de loess. A 300 km más hacia el NE, a lo largo del río Salado de la Provincia de Sta Fe, el clima cambiaba a subhúmedo; la llanura estaba caracterizada por extensos pantanos en los que se depositó el polvo eólico (Iriondo, 1987). La provincia climática patagónica avanzó hacia el NE unos 750 km, alcanzando el centro de Santa Fe y el Sur de Entre Ríos (Fig. 2), límite externo de la sedimentación loésica y, por lo tanto, indicador del límite del clima patagónico (Iriondo & García, 1993). Este proceso ocurrió en el Pleistoceno superior y en el Holoceno inferior entre los 36000 y 8500 años AP. El Holoceno medio estuvo caracterizado por un clima húmedo, subtropical y tropical que se extendió entre 8500 y 3500 años AP. Durante estos 5000

años hubo entre 2 y 4 fases edafogénicas sucesivas separadas por intervalos secos. En el período Holoceno tardío o superior se identificaron 4 estadios climáticos: entre los 3500 AP y el 1400 AP el clima fue seco y semiárido, con temperaturas similares a las actuales. La acción del viento produjo deflación del sedimento superficial y su depositación formando un extenso manto de limo y arena, y campos de duna locales. Se asume una escasa cobertura vegetal, similar a la actual del norte de la Patagonia. Entre los 1400 y 700 años AP se pasó nuevamente a un clima tropical/húmedo, régimen údico y ascenso del nivel freático. Se lo llamó Húmedo Máximo Medieval. Entre los 700 y 200 años AP se produjo la Pequeña Edad de Hielo, no registrándose señales en las partes norte y central de la Llanura (Iriondo, 1994). Seguidamente, continúan las condiciones climáticas actuales húmedas y templado-cálidas (Fidalgo & Tonni, 1978). Las varia-

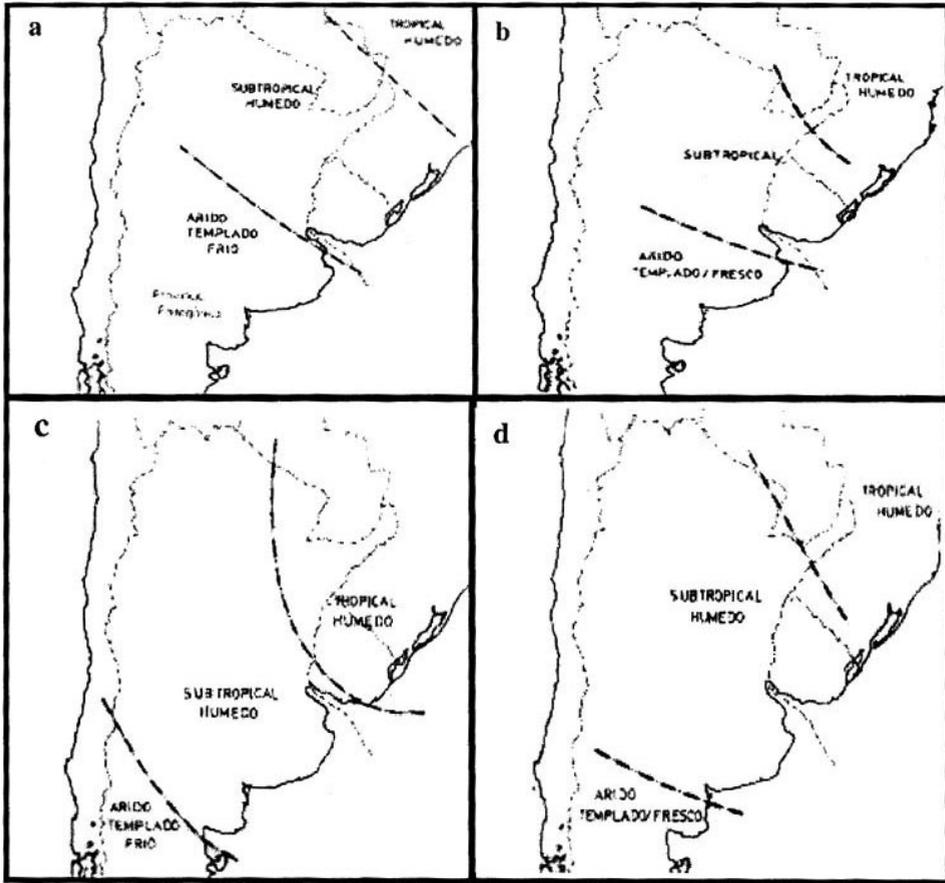


Fig. 2: Cambios climáticos ocurridos en el Holoceno. a. Holoceno inferior (entre 36000 y 8500 años AP). b. Holoceno medio (entre 8500 y 3500 años AP). c. Holoceno tardío (entre 1400 y 700 AC). d. Condiciones climáticas actuales (Tomado de Iriondo & Kroling, 1995).

ciones en los límites climáticos ocurridos durante todo el Holoceno se observan en la Fig. 2. La edad estimada para el material original de los Arquiudoles vecina los 3000 años AP (Moscatelli, 1991), en coincidencia con el Holoceno tardío.

La Pampa pertenece a la Provincia Pampeana del Dominio Chaqueño. La vegetación dominante es una estepa herbácea. Los taxones vegetales más frecuentes son *Stipa*, *Poa*, *Panicum*, *Festuca*. Desde el punto de vista biogeográfico, la región fue ocupada

en el Cuaternario por comunidades brasílicas durante los climas húmedos/cálidos, y por formas patagónicas en los intervalos frescos/secos (Tonni, 1991).

El método de datación por el ^{14}C es ampliamente utilizado en Arqueología, Geología y Ciencia del Suelo. La MO del suelo integra en sus constituyentes moleculares átomos de C de edades muy diferentes. De la actividad ^{14}C del conjunto de átomos de carbono surge la edad media de la MO. La materia orgánica vieja, que predomina

en el suelo a medida que se desciende en el perfil y que se encuentran en el lugar después de algunos miles de años, representa un ínfima porción de las sustancias orgánicas que han transitado por el suelo y que se han estabilizado y transformado en contacto con la fase mineral. Se puede decir que ella ha sido estabilizada tan precoz y durablemente, que al datar las MO de los horizontes profundos, se obtiene una estimación razonable de la edad del suelo. Al contrario, la materia orgánica joven es más abundante cerca de la superficie del suelo, donde los aportes orgánicos son máximos. Es globalmente lábil y genética o estructuralmente más próxima al material vegetal y microbiano de origen (Balesdent & Guillet, 1982).

La diferencia en la relación isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ entre las plantas de ciclo fotosintético C3 y las plantas de ciclo fotosintético C4 (Smith & Epstein, 1971) permite seguir, determinando la composición isotópica de la MO, la proporción de carbono proveniente de uno u otro tipo de vegetación. Desde 1985, es frecuente una de las aplicaciones de este método en estudios de paleoambientes y de sucesiones vegetales. Los perfiles de la relación isotópica de la MOS evidencian la existencia de vegetación pasada de un tipo diferente a la vegetación actual (Balesdent, 1991).

Existe abundante bibliografía internacional referida a la incidencia de clima, vegetación y procesos de humificación sobre la distribución en el perfil de suelo del contenido y la abundancia natural en los isótopos ^{13}C y ^{14}C de la MO, por ejemplo Dzurec *et al.*, (1985); Desjardins *et al.*, (1991, 1994); Abbas & Balesdent, (1995). Sin embargo, en nuestro país estas técnicas no han sido utilizadas conjuntamente para el mismo propósito.

El objetivo del presente trabajo fue relacionar los cambios climáticos, edáficos y

fitológicos ocurridos en la región pampeana húmeda durante el Cuaternario Superior a partir de las determinaciones del contenido de carbono, de la datación radiocarbónica, de la abundancia natural en ^{13}C del perfil de un Argiudol virgen representativo del centro de la región y del horizonte superficial de dos Argiudoles situados en sus extremos Norte y Sur y de la abundancia natural en ^{13}C de la vegetación natural actual y pasada.

MATERIALES Y MÉTODOS

SITIOS DE ESTUDIO

Y MUESTREO

El estudio fue llevado a cabo preferentemente en la Estación Experimental Pergamino del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), (33° 56' S; 60° 34' O). Esta área recibe una precipitación y una temperatura medias anuales de 930 mm y 16°, respectivamente (INTA, 1972). Secundariamente, fueron elegidos las Estaciones Experimentales Rafaela (31° 12'; 61° 30' O) y Balcarce (37° 45' S; 58° 18' O) del INTA como extremos Norte y Sur, respectivamente. Las áreas de Rafaela y Balcarce reciben una precipitación media anual de 960 y 860 mm y una temperatura media anual de 19 y 14°C, respectivamente (INTA, 1981 y 1986, respectivamente). Los suelos de los 3 sitios son Argiudoles típicos muy profundos, bien drenados, débilmente ácidos, originalmente bien provistos de MO y muy fértiles.

La topografía de los sitios Pergamino y Rafaela es muy suavemente ondulada; las pendientes medias no superan el 1 % mientras que en Balcarce es un poco más ondulada; las pendientes alcanzan el 3 %. La secuencia de horizontes es siempre

la misma: A₁, A₂, BA, B₁₁, B₁₂, BC, C₁. Los horizontes superficiales son de textura franco-limosa en Pergamino y Rafaela y franco-arcillosa en Balcarce. En todos los casos existe un abrupto incremento en el contenido de arcilla en el horizonte B₁₁.

En Pergamino se abrieron fosas de 2 m de largo x 1.6 m de profundidad en un sitio sin antecedentes de laboreo durante los últimos 80 años. Se determinó el espesor medio y la densidad aparente de cada horizonte genético. Las muestras de suelo se tomaron a razón de 10 submuestras de 1 kg por horizonte. Luego fueron secadas, tamizadas por 2 mm y homogeneizadas manualmente. En los horizontes A₁, A₂, BA, B₁₁, B₁₂ y BC se realizaron las determinaciones de Carbono total del suelo y de la fracción < 100 µm obtenida por tamizado en seco (a esta fracción de carbono se lo consideró como humificado), las dataciones radiocarbónicas de la fracción humificada y las abundancias naturales en ¹³C del suelo y de la fracción humificada. Las determinaciones del horizonte BC fueron realizadas sobre muestras obtenidas en dos mitades debido a su extensa profundidad. La datación radiocarbónica se obtuvo solamente en su mitad superior (100-130 cm). La mitad inferior fue imposible de datar debido a contarse con cantidad insuficiente de Carbono. El horizonte A₁ fue fraccionado granulométricamente. En Rafaela y Balcarce se obtuvieron muestras del horizonte A₁ solamente, a las que se les determinó densidad aparente, Carbono total, datación radiocarbónica y abundancia natural en ¹³C del suelo.

Para el fraccionamiento granulométrico se partió de 2 kg de suelo seco al aire tamizado por 2 mm. Se siguió la metodología propuesta por Balesdent *et al.*, (1991) para la obtención de las fracciones granulométricas.

Las determinaciones de densidad apa-

rente se realizaron introduciendo horizontalmente cilindros de 0.06 m de diámetro y 0.07 m de altura en la parte central del espesor de cada horizonte. Se efectuaron 4 repeticiones por perfil. El carbono total (C) fue determinado por combustión seca en un analizador de carbono (Carlo Erba NA 1500) que estuvo acoplado a con un espectrómetro de masa (VG SIRA 9) para la determinación de la abundancia isotópica ¹³C, siguiendo la técnica descripta por Marshall y Whiteway (1985). La abundancia natural en ¹³C fue expresada en unidades ‰ en relación al PeeDee Belemnite (PDB), por el intermedio de la Leucina, calibrada con respecto al PDB en el Laboratorio de Agronomía de l'INRA de Laon. Las relaciones isotópicas fueron expresadas bajo la forma:

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{10^3 \left[\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{SP} - \left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{PDB} \right]}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{PDB}}$$

Las muestras fueron analizadas al menos 2 veces y hasta que las diferencias entre repeticiones de la misma muestra fueran < a 0.3 unidades ‰¹³C.

Para la determinación de la abundancia en ¹³C de las especies consideradas más importantes en la historia reciente del suelo virgen de Pergamino, se recolectaron varios ejemplares adultos de la misma especie, se mezclaron todas las partes del vegetal y se secaron a 60 °C. Previo al análisis isotópico, tanto las muestras de suelo como las de vegetal se molieron y se homogeneizaron en un molino con bolitas de ágata hasta un tamaño de 20 µm.

La determinación de la abundancia natural en ¹⁴C de la MO, o datación radiocarbónica, combina 2 principios de marcado

(Balesdent *et al.*, 1994):

- la materia orgánica vieja, marcada durante el Cuaternario, posee una actividad en ^{14}C muy débil, siguiendo la desintegración natural de este isótopo

- los ensayos termonucleares aéreos conducidos entre 1950 y 1964 inyectaron cantidades importantes de ^{14}C en la atmósfera, marcando el carbono de la vegetación después de 1955, con una señal conocida. Las actividades ^{14}C se expresan en unidades $\delta^{14}\text{C}$:

$$\delta^{14}\text{C} = \left(\frac{A_{\text{muestra}}}{A_{\text{referencia}}} - 1 \right) \cdot 1000$$

donde A es la radioactividad específica de la muestra. La referencia es 0.95 x standard NBS SRM-4990. Una corrección suplementaria se efectúa al d^{14}C para compensar el fraccionamiento isotópico natural (D^{14}C). Esta corrección normaliza los d^{14}C con respecto a un valor de $\delta^{13}\text{C}$ de - 25 ‰, (Craig, 1954). La actividad de la muestra se mide en centelleo líquido sobre el benceno sintetizado a partir del carbono de la muestra. El conteo presenta incertidumbre estadística debido a la naturaleza aleatoria de las desintegraciones del ^{14}C . Se calcula un desvío estándar que refleja la incertidumbre en la determinación del ^{14}C . Este integra las imprecisiones debidas al ruido de fondo del aparato. Cuando los valores D^{14}C fueron negativos y se correspondieron con edades medias superiores a los 1000 años, los resultados se expresaron como edades aparentes. Cuando fueron positivos, correspondientes a materiales modernos, se corrigieron las edades aparentes en función de la contribución del ^{14}C termonuclear siguiendo

el procedimiento descrito por Balesdent *et al.* (1982) el cual asume que las edades ^{14}C se distribuyen exponencialmente, tiene en cuenta el año de extracción de las muestras y el Hemisferio de pertenencia (Sur). Las dataciones fueron realizadas en el Laboratorio de Tritio y Radiocarbono de la Universidad Nacional de la Plata (UNLP) y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICET) y en el Laboratorio de Ciencia del Suelo del INRA de Versailles.

EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

Los contenidos de C de cada horizonte se expresaron en % y se transformaron a valores de stock, en t ha^{-1} , utilizando la siguiente ecuación:

$$C (\text{t ha}^{-1}) = C (\%) \cdot d \cdot e \cdot 10$$

siendo *d* la densidad aparente (en t ha^{-1}) y *e* el espesor (en m) del horizonte correspondiente.

RESULTADOS

DISTRIBUCIÓN DE C TOTAL, ^{14}C Y ^{13}C EN EL PERFIL DE SUELO

La Fig. 3 presenta el perfil de Carbono orgánico del suelo en el suelo considerado virgen serie Pergamino. El mismo se corresponde perfectamente con los suelos de pradera de clima templado (Campbell, 1978). En superficie, el contenido es de 3 % y superior al 1 % por encima de los 60 cm de profundidad. Se trata de un suelo bajo un clima templado-cálido (temperatura media anual de 16.5 °C y precipitación media anual de 900 mm).

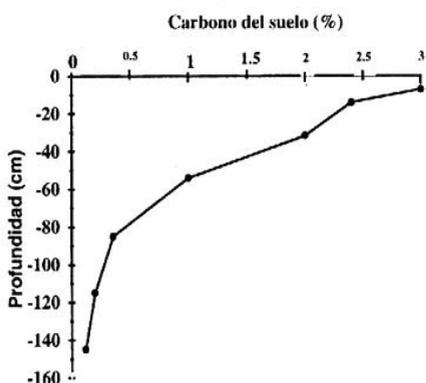


Fig. 3: Perfil de Carbono orgánico total del suelo virgen de Pergamino.

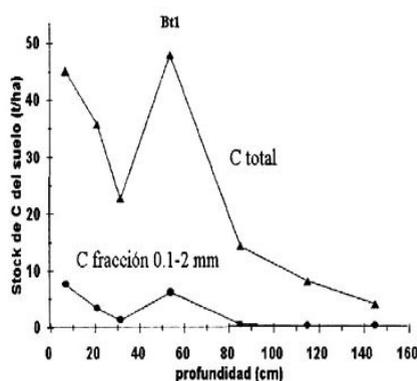


Fig. 4: Perfil del stock de Carbono orgánico total y no humificado del suelo virgen de Pergamino.

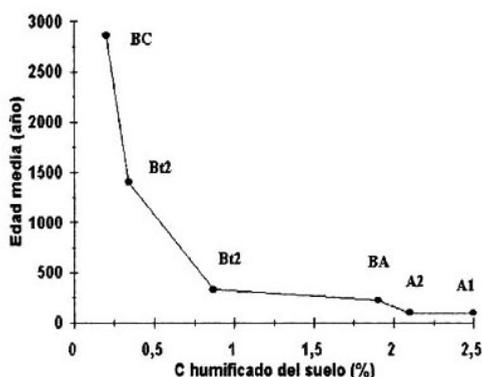


Fig. 5: Perfil de la edad media del C humificado del suelo en el suelo virgen de Pergamino.

La Fig. 4 presenta el stock de Carbono orgánico del mismo perfil edáfico. La composición ^{14}C de la MO humificada (fracción $< 100 \mu\text{m}$) del perfil virgen permitió determinar la edad media de dicha MO humificada de cada horizonte (Fig. 5).

Las edades medias obtenidas indican que la actividad ^{14}C ha sido fuertemente afectada por los ensayos nucleares aéreos en los horizontes superficiales pero no en los horizontes profundos que tienen una edad máxima de 2760 años. Los horizontes B_{t2} ($\text{D}^{14}\text{C} = -158 \text{‰}$) y BC ($\text{D}^{14}\text{C} = -299$

‰) contienen MO que puede considerarse como enteramente anciana puesto que el stock de Carbono derivado del sistema radical (MO $> 100 \mu\text{m}$) es despreciable a partir del horizonte B_{t2} (Fig. 4).

El tamaño de muestra obtenido en el horizonte C_1 , que posee un contenido de C de 0,08 %, resultó insuficiente desde el punto metodológico para la determinación de la actividad ^{14}C , razón por la cual no se la determinó en este horizonte.

Cuadro 1. Distribución de C orgánico total y de la actividad ^{14}C en diferentes fracciones granulométricas del suelo virgen de Pergamino. a. Porcentaje de cada fracción granulométrica; b. Porcentaje de C de cada fracción granulométrica c. Porcentaje de C de cada fracción granulométrica con respecto a la masa del suelo; d. Contenidos de ^{14}C y e. Edad media de cada fracción granulométrica.

Horizon A ₁							
Fracción, μm		200-2000	50-200	20-50	2-20	0-2	suelo
a	fracción, %	0.65	15.86	27.25	31.78	24.43	99.97
b	CO, %	18.13	1.35	1.47	2.23	6.04	
c	CO suelo, %	0.12	0.21	0.40	0.71	1.48	2.92
d	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	-17.5	-21.2	-20.7	-19.3	-18.8	-19.6
d	$\delta^{14}\text{C}$, ‰	ND	163±14	171±16	98±12	81±11	
d	$\Delta^{14}\text{C}$, ‰	ND	154±16	161±16	86±12	68±11	114
e	Edad media corregida (año)		2 - 58	3 - 55	85 - 110	110 - 130	76

El Cuadro 1 muestra la distribución del C total en las fracciones de MO.

En (a) el porcentaje de cada fracción granulométrica coincide con la distribución del tamaño de partículas con destrucción previa de MO. En (b) el contenido de C de tamaño superior a 200 μm es mucho más elevado que en las fracciones restantes debido a que éste representa un C formado por residuos vegetales poco transformados,

de aporte más reciente en el suelo. En (c) el C retenido en cada fracción aumenta con la disminución del tamaño de partículas. En (d) todas las fracciones de MO son positivas debido al origen termoneuclear del C y en (e) la edad media de la fracción aumenta a medida que el tamaño disminuye.

La Fig. 6 muestra el perfil de abundancia natural en ^{13}C del suelo virgen.

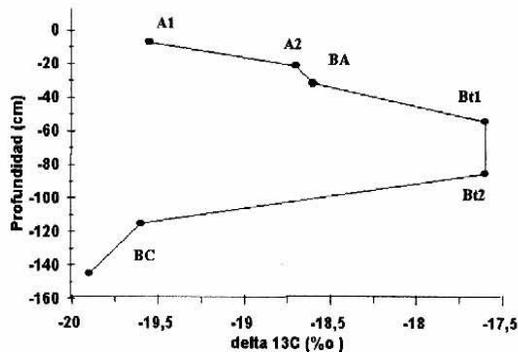


Fig. 6. Perfil $\delta^{13}\text{C}$ del suelo virgen de Pergamino.

Se observa un enriquecimiento isotópico débil y progresivo hasta el horizonte BA y fuerte y pronunciado en el horizonte B_t (entre 0,35 y 1 m de profundidad) con valores de -17.6 ‰. A partir del horizonte BC, el suelo se empobrece progresivamente en este isótopo.

DISCUSIÓN

DISTRIBUCIÓN DEL C EN EL PERFIL DE SUELO

La distribución vertical del C total está fuertemente ligada al factor temperatura, siendo más rápida la disminución con la profundidad cuanto más elevada es la temperatura. Esto se debe a la mayor mineralización de la MOS con temperaturas más altas (Desjardins *et al.*, 1991). Esta afirmación queda perfectamente demostrada cuando se observa la variación del C orgánico en el perfil de suelo para los sitios Norte, Centro y Sur de la Región de estudio (Fig. 7). Los contenidos de C fueron extraídos de las Cartas de suelo respectivas (INTA, 1972, 1981 y SAGyP, 1989). La disminución de los contenidos de C orgánico con la profundidad aumenta en el siguiente orden: Rafaela > Pergamino > Balcarce. Estos resultados están indicando

que existieron diferencias climáticas entre zonas de la misma región desde el inicio de la formación del suelo.

CONTRIBUCIÓN DE LA DATACIÓN RADIOCARBÓNICA

La edad media encontrada en la MO del horizonte BC (D¹⁴C -299 ‰) coincide con la edad estimada para el Holoceno tardío que se extendió entre los 3500 y 1400 años A.P. (Moscatelli, 1991; Iriondo y Krohling, 1995). Durante ese período seco, hubo deflación del sedimento superficial y su depositación formando un extenso manto de limos y arenas y campos de dunas locales. En el NO de la Pcia de Buenos Aires, S de Córdoba y Santa Fe, y la mitad de San Luis, el viento removilizó la arena superficial truncando un suelo bien desarrollado durante el período Hypsitermal u Holoceno medio, y la depositó como un manto de arena que cubrió el paisaje en forma más o menos homogénea (Fig. 1c). La edad media de la MO del horizonte B₁₂ (D¹⁴C -158 ‰) coincide con el calentamiento de la tierra ocurrido durante la edad media europea. Según Iriondo (1990), las edades radiocarbono extremas para esta fase son 1400 y 700 años A.P. Nuestro resultado se encuentra en el límite inferior de dichas edades. El clima tropical húmedo

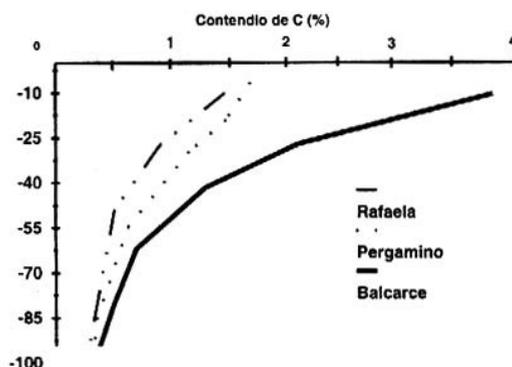


Fig. 7: Distribución del contenido de C orgánico total con la profundidad en 3 sitios a diferentes latitudes.

que alcanzó su máxima expresión entre los siglos VI y XIII produjo edafización muy intensa. Se estima para este período una temperatura media de 2.5°C superior a la actual acompañado por un aumento notable de la humedad. Esta edafización condujo a la formación de horizontes B texturales bien desarrollados. En el centro y sur de Santa Fe se registró precipitación de carbonato pedogénico en el horizonte C, indicando clima húmedo de una edad media de 1155 años A.P (Panigatti, 1981).

Cabe aclarar que la edad media obtenida para el horizonte C es netamente inferior a la obtenida en este trabajo para el horizonte BC. Ello es lógico, la proximidad del calcáreo siempre implica acumulación de MO joven (Balesdent, 1982). La edad media del B_{11} es de 350 años ($D^{14}\text{C} -7\%$), escapándose de la fecha límite para la culminación de este cambio climático. Esta disminución abrupta en el horizonte B_{11} puede ser explicada de la siguiente manera: es evidente que existe una proporción importante de MO formada recientemente (en los últimos 200 años) en coexistencia con la MO del período Máximo medieval y, con menor probabilidad, con la del período anterior. La MO recientemente formada es debida a los aportes de raíces y a la eluviación de C de los horizontes A_1 en forma soluble o como MO ligada a la arcilla. La contaminación con C proveniente de ensayos nucleares así lo confirma. Estos aportes actúan disminuyendo la edad media global del C. Además, el stock de C humificado encontrado en el horizonte B_{11} (similar al del horizonte A_1), demuestra que el proceso de eluviación actual del horizonte A_{11} continúa enriqueciendo en C al horizonte B_{11} , sumándose al stock de C orgánico del período climático medieval. Entre los siglos XIV y XVIII, durante la llamada la pequeña edad de Hielo, se produjo un clima más fresco y seco que el actual, (se estima

una temperatura media con 1°C menor que la media actual y una precipitación media de 400 mm anuales) que limitó la posibilidad de edafización. Si bien la zona no estuvo afectada por la deflación de los horizontes superficiales y el depósito de otro material loésico posterior, se encuentra cercana a la que recibió sedimentos de un espesor comprendido entre 10 y 30 cm. Estos sedimentos están ampliamente distribuidos en la Provincia de Buenos Aires y contienen elementos culturales relativamente recientes que se corresponden con la parte superior de la Formación « La Postrera » (Fidalgo & Tonni, 1978). Bajo estas condiciones, lo más probable es que la MO del horizonte A haya disminuido considerablemente hacia un nuevo valor de equilibrio, en virtud de la disminución de los aportes orgánicos y, en parte, conjuntamente con dicho horizonte debido a la erosión eólica. En los últimos 200 años, nos encontramos nuevamente bajo clima templado-cálido y húmedo que favorece los procesos de edafización. Quiere decir que a partir de ese momento, comenzó a construirse un nuevo stock de MO en los horizontes superficiales. Se vuelve a acrecentar el aporte de MO joven, acumulación que puede evidenciarse por las edades medias más recientes obtenidas para la MO de los horizontes superficiales ($D^{14}\text{C}$ 90, 89 y 33 ‰ para los horizontes A_1 , A_2 y BA, respectivamente.). Puede pensarse que la MO vieja, heredada del proceso de calentamiento medieval o anterior a este, aunque minoritaria en su cantidad, esté presente como MO ligada con alguna fracción textural del suelo. Esto podría producirse por actividad de la fauna, por ejemplo la de lombrices y hormigas, que al mezclar los horizontes superficiales con los más profundos reparten el C viejo homogéneamente en el perfil, sin acrecentar su biodegradación cuando son llevados a la superficie. Esto es poco probable

con respecto a la actividad de las lombrices; se piensa que no existían en una abundancia suficiente en los campos vírgenes (Hauman, 1927). Las dos especies que se consideran originarias de América del sur, *Glossoscolex uruguayensis*, proveniente de Uruguay y del Este de Brasil y *Microscolex dubius*, proveniente de la Patagonia, que pueden haber interactuado durante los distintos periodos frescos y cálidos antes del arribo de las especies introducidas en los últimos 400 años, no se encuentran en una abundancia suficiente como para producir una mezcla importante (Ljungström & Emiliani, 1971). Sin embargo, cuando se trata de hormigas, la hipótesis de mezcla de horizontes y reparto de C viejo debería ser tenida en cuenta. Las hormigas originarias de América del Sur, de la tribu Attini, representada por los géneros *Atta* y *Acromirmex*, son capaces de realizar una mezcla importante de horizontes, se adaptan a las condiciones de aridez y prefieren los pastizales (De Santis, 1951, Kusnesov, 1956, Bonetto, 1959, Bucher, 1974). El periodo de tiempo transcurrido hasta el presente -por lo menos 1400 años AP-, el volumen de suelo movilizado y el número de hormigueros por hectarea (Bonetto, 1959), son argumentos suficientes para considerar que el sitio de estudio puede haber sido afectado por la actividad de estos formícidos. La datación del C de las diferentes fracciones granulométricas del horizonte A₁ demostró que todas ellas presentan C moderno, a pesar de la tendencia al aumento de edad a medida que el tamaño de la fracción disminuye. Esto no descarta la posibilidad que exista MO estable o muy poco activa dentro de las fracciones limo y arcilla. Si bien la MO vieja puede haber sido repartida en todo el perfil, estos suelos están sujetos a un movimiento de mezcla mecánica durante los periodos húmedos (iluvación), que lleva a la formación de

horizontes argílicos. Cuando la lixiviación es mínima, durante los periodos secos, existiría la tendencia contraria, es decir la haploidización.

Dos hipótesis subyacen para explicar la distribución vertical del C conjuntamente con su edad media. Existen dos tipos de transporte de C: convectivo y difusivo. El convectivo se refiere al movimiento de translación dentro de la fase líquida o en el proceso de sedimentación y el difusivo al transporte a través del proceso de mezcla biológica por actividad de la fauna y a las deformaciones y movimientos producidos por la contracción y dilatación del suelo. En el suelo virgen de Pergamino puede observarse que la disminución del contenido de C con la profundidad no se corresponde con la disminución en la actividad D¹⁴C incluyendo al horizonte B₁₁. Esto estaría indicando una alta velocidad de transporte convectivo, consistente con un drenaje climático pronunciado. Evidentemente, este movimiento descendente de las asociaciones de arcilla-MO, típico de los suelos iluviados, no da lugar a la formación de MO estable. A partir del horizonte B₁₂ la disminución de C coincide con la disminución de la actividad ¹⁴C. La existencia de formícidos en la región, descrita anteriormente, hace que no pueda descartarse el transporte por difusión, esto es la incorporación de MO joven en el perfil y el traslado de MO vieja desde la profundidad hacia la superficie. Esto permite suponer la existencia de MO estable repartida por el perfil (el C orgánico viejo del material parental está diluido en el C moderno). La datación radiocarbónica del horizonte A₁ de suelos de Rafaela y Balcarce (Cuadro 2) mostró edades medias similares indicando la existencia de los mismos procesos edáficos tanto en el Norte como en el Sur de la región. Sin embargo, existió una tendencia al aumento de la edad media

Cuadro 2. Distribución radiocarbónica del horizonte superficial de tres suelos vírgenes de diferentes latitudes.

Sitio	Rafaela	Pergamino	Balcarce
Latitud	31° 12'	33° 56'	37° 45'
Temperatura media anual (°C)	19	16.5	14
Profundidad (cm)	0-16	0-14	0-14
CO suelo, %	1.9	2.6	4.4
C moderno, %	114.1±1.2	110.2±1.1	108±1.6
$\Delta^{13}\text{C}$, ‰	-15.4	-19.6	-21.9
$\delta^{14}\text{C}$, ‰	141	102	87
$\Delta^{14}\text{C}$, ‰	119	90	81
Edad media corregida (año)	65	97	108

con el aumento de la latitud, confirmando nuevamente que la temperatura media más alta del Norte, produce una aceleración de la mineralización de MO. Aplicando el valor de Q10 de 3 encontrado por Recous (1994), se tiene que una disminución de 4 °C en la temperatura media aumenta el TRM en un 60 %. Además, esto está en completo acuerdo con la acumulación de MO de estos horizontes: el contenido de MO de los Argiudoles vírgenes aumenta con la disminución de la temperatura media anual.

En total acuerdo con las conclusiones de Paul *et al.*, (1997), estos resultados demuestran que las dataciones ^{14}C permiten estimar los tamaños y flujos de las fracciones resistentes así como también las características pedogenéticas generales.

CONTRIBUCIÓN DE LA TÉCNICA DE ABUNDANCIA NATURAL EN ^{13}C

El $\delta^{13}\text{C}$ del suelo

En todos los suelos siempre hay un

enriquecimiento vertical en $\delta^{13}\text{C}$ de 1 a 2 ‰ entre la superficie y 0.5-1 m de profundidad (Balesdent *et al.*, 1987). Esto ha sido explicado por varias hipótesis: (a) disminución en la concentración atmosférica del ^{13}C . La combustión del combustible fósil y la consecuente disminución de la concentración de $^{13}\text{CO}_2$ atmosférico podría decrecer los valores $\delta^{13}\text{C}$ en las restituciones de C reciente en la superficie, Friedly *et al.* (1986) (b) translocación descendente de sustancias húmicas solubles tales como ácidos fúlvicos enriquecidos en ^{13}C que puede producir valores más negativos en ^{13}C con la profundidad (Nissenbaum & Schallinger, 1974) (c) cambio histórico en el ciclo fotosintético pasando de C4 a C3 y viceversa (O'Brien & Stout, 1978). En los suelos de la Pampa se ha postulado que cuando el clima era fresco y semiárido, en el Holoceno tardío, se presentaba una vegetación de estepa gramínea similar a la existente en el norte de la Patagonia (Tonni, 1992). Es lógico suponer que durante ese período se favorecieron los ciclos fotosintéticos C3. En consecuencia,

el poco humus superficial formado entre los últimos 3500 y 1400 años de este período quedó empobrecido en ^{13}C . A medida que el clima se fue calentando, conjuntamente con el aumento en las precipitaciones, el avance de las comunidades brasílicas favorecía el desarrollo de ciclos fotosintéticos C4. Así, el horizonte C_1 es mayoritariamente C3. Al finalizar este período, el horizonte BC está menos empobrecido en ^{13}C , en concordancia con la evolución de las condiciones climáticas. Los resultados en ^{13}C de los horizontes B_{11} y B_{12} ponen claramente en evidencia el avance de las condiciones tropicales húmedas en este sector y la importancia de la actividad biológica durante la edad media europea cuando se lo juzga por el stock de C presente en el B_{11} . Es notable la presencia de valores poco empobrecidos en ^{13}C , indicando la presencia de vegetación mayoritariamente C4. La MO de los horizontes B_i pueden ser considerados entonces como una mezcla de una pequeña cantidad de MO vieja a $\delta^{13}\text{C} = -19.9\%$, siendo la contribución de plantas C4 más importante que en la superficie. Esto queda demostrado sobretodo por

la diferencia de edad y abundancia en ^{13}C entre el horizonte B_3 y el B_{22t} . El proceso de aridización ocurrido durante la pequeña edad de Hielo favoreció nuevamente el avance de la provincia patagónica con sus especies mayoritaria-mente C3. Como este proceso ocurre simultáneamente con la colonización europea, se agregan a las especies patagónicas los ciclos preferentemente C3. Los últimos 200 años, templado-cálidos, favorecieron la mezcla de ciclos. Esto explica el empobrecimiento en ^{13}C de los horizontes superiores.

EL ^{13}C DE LA VEGETACIÓN ACTUAL Y PASADA

El valor a ^{13}C de la MO del suelo, en principio, debe parecerse a los valores de la vegetación que le dio origen. En consecuencia, en la Pampa, donde la vegetación virgen se describe como una pradera de gramíneas de ciclos C3 y C4 mezclados (Moscatelli, 1991), la MO de los horizontes superficiales debería tener aproximadamente los mismos valores de $\delta^{13}\text{C}$ que la vegetación

Cuadro 3: Abundancia natural en ^{13}C de las principales gramíneas de la pradera nativa de la Pam-

Gramíneas	$\delta^{13}\text{C}$ medio, ‰	Gramíneas	$\delta^{13}\text{C}$ medio, ‰
<i>Hordeum stenotachis</i>	-25.6	<i>Paspalum dilatatum</i>	-12.8
<i>Poa</i> sp.	-30.9	<i>Paspalum urvillei</i>	-12.7
<i>Briza subaristata</i>	-29.9	<i>Setaria geniculata</i>	-12.2
<i>Stipa papposa</i>	-29.3	<i>Chloris polydactyla</i>	-12.8
<i>Stipa hyalina</i>	-29.6	<i>Paspalum notatum</i>	-12.1
<i>Deyeuxia</i> sp.	-28.2	<i>Bothriochloa laguroides</i>	-12.0
<i>Bromus unioloides</i> (naturalizada)	-29.8	<i>Stipa neesiana</i>	-28.2
<i>Lolium multiflorum</i> (naturalizada)	-32.0		

descripta como nativa. Se puede verificar esta hipótesis analizando las gramíneas más importantes (Cuadro 3) y compararlas con los valores de ^{13}C del suelo descrito como virgen.

Una composición botánica clímax probable de la Pampa virgen en Pergamino podría estar constituida como sigue (Carnevale, com. pers.): 50 % de *Stipa*, 40 % de *Bothriochloa* y 10 % de *Paspalum*, o sea una repartición igual de plantas C3 y C4. Esto daría un valor medio de ^{13}C de -20.1‰ . En el horizonte A_{11} los valores encontrados son de $-19.6\text{‰} \pm 1.3$, confirmando la hipótesis. Sin embargo, el aspecto botánico primitivo de la pradera pampeana es muy difícil de describir debido a que existieron muy pocas documentaciones previas, a excepción de aquellas del naturalista español Azara en el siglo XVIII y las célebres observaciones de Darwin a comienzos del siglo XIX, citados por Hauman (1927). A inicios del siglo XX, la flora indígena estaba completamente mezclada con plantas de origen europeo de la cuenca mediterránea, sin duda debido a la colonización española y la similitud del clima mediterráneo con el de la Argentina media que favoreció su desarrollo. El Norte de la Provincia de Buenos Aires, era la zona más poblada y rica en especies introducidas (Molfino, 1926). Esta modificación profunda de la vegetación original se produjo conjuntamente con el crecimiento explosivo de ganados vacuno y caballar durante los siglos XVI y XVIII antes de la introducción de la agricultura (citas de Falkner en 1744 y de Azara a principios del siglo XVIII, citados por Brailosky & Fogelman, 1991). Las especies introducidas más importantes pertenecían a las siguientes familias: gramíneas, compuestas, leguminosas, umbelíferas y chenopodiáceas (Hauman, 1927). A la llegada de los europeos, los suelos estaban enriquecidos en ^{13}C . En ese momento, el

clima comenzó a refrescarse y ser un poco más seco. Así que, por primera vez, la invasión de comunidades de la patagonia se producía conjuntamente con la introducción y expansión de especies europeas de ciclo C3. El suelo iba a empobrecerse nuevamente en ^{13}C .

Hacia los siglos XVIII y XIX, el cardo asnal (*Sylibum marianum*, $\delta^{13}\text{C} -28.5\text{‰}$) alcanzó un desarrollo extraordinario en esta zona, Hauman (1927). A principios del siglo XX el cardo asnal era abundante solamente en los lugares con poca carga animal. Otro cardo fue reemplazando al anterior: el cardo de Castilla (*Cynara cardunculus*, $\delta^{13}\text{C} -27.7\text{‰}$). Se cree que su sistema radical, el cual puede penetrar a una profundidad mayor al metro, es el responsable del aumento de la permeabilidad del material originario del suelo. Otro factor que podría haber modificado la reserva de agua del subsuelo sería la presencia de lombrices. Según el autor, como se dijo anteriormente, las lombrices parecen no haber existido en tierras vírgenes. Este aumento de la capacidad de almacenamiento de agua del subsuelo habría producido una transformación profunda de la pradera pampeana.

En una asociación continua como la Pradera pampeana, especialmente después de los veranos secos, la acción de los animales hambrientos desnudaba el suelo por partes y esto permitía el desarrollo de plantas anuales y exóticas luego de las primeras lluvias, de crecimiento y fructificación rápida, que ganaban la carrera aunque fuesen buscadas por el ganado, a las especies autóctonas xerófilas de crecimiento más lento. Así, el pasto «duro» se transformó en pasto «tierno» en el que abundaban los géneros *Lolium*, *Briza*, *Festuca*, *Trifolium*, *Medicago*, *Bromus*, *Anthemis*, cardos, mezclados con gramíneas más higrófilas que no existían o existían en una pequeña proporción en la pradera

virgen (*Paspalum*, *Bromus*) y poco a poco retomaban las menos xerófilas autóctonas como *Stipa*, *Hordeum*, *Andropogon*, etc. Esta denudación parcial del suelo habría contribuido a la invasión de vegetación adventicia. Otro de los factores que contribuyeron a la expansión de plantas tiernas, además de las conocidas formas de diseminación por animales, viento y agua, son los incendios, cuyas cenizas produjeron aportes de sales minerales extraídas de lo profundo del suelo por las raíces y permitieron la instalación de plantas con raíces superficiales y tallos rastreros. Azara reporta que en el siglo XVIII esta práctica era corriente en la Provincia de Buenos Aires.

A la llegada de los españoles, las gramíneas xerófilas, de crecimiento lento, formaban «el pajonal de pastos duros y altos» rico en especies. Esta mezcla estaba empobrecida en especies higrófilas que resultaban más abundantes durante los períodos subtropicales y húmedos de crecimiento más rápido. Las especies de tipo xerófilo, que eran digestibles, permitieron la expansión del ganado.

Pero el ganado salvaje produjo una transformación profunda de la pradera, al incorporar especies de la cuenca mediterránea europea, especies que crecieron en los lugares pisoteados, de suelo desnudo. Estas especies eran de crecimiento muy rápido, higrófilas, y formaron « los pastos tiernos y bajos » que fueron desplazando paulatinamente a las xerófilas. Según Poorter *et al.*, (1991), cuando compararon 24 especies salvajes con diferente velocidad de crecimiento relativo encontraron que las especies de crecimiento rápido, además de ser mucho más eficientes en el uso del agua, son más hábiles para fijar más carbono por unidad de peso de la planta y para usar menor cantidad de fotosintatos en la respiración. También, tienen más alto contenido de nitrógeno total orgánico por unidad de peso de la planta, haciendo un uso más eficiente del nitrógeno. Esto explicaría el cambio ocurrido en la Pampa y en el color de la pradera, que ha sido descrito como el pasaje de un verde-amarillento en los « pastos duros » al verde en los «pastos bajos» (Hauman, 1927).

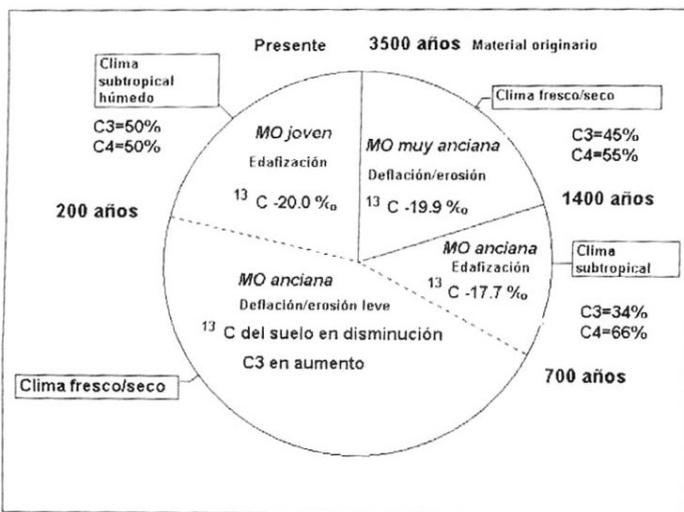


Fig. 8. Cambios ambientales ocurridos a lo largo del Holoceno tardío en la región

CONCLUSIONES

El estudio de la distribución del contenido de carbono orgánico, asociado al de las distribuciones en abundancia natural en ^{13}C y ^{14}C , llevado a cabo en un perfil representativo de los Argiudoles vírgenes de la región pampeana húmeda, permitió demostrar:

- la importancia de la temperatura en la distribución vertical de C, en la distribución geográfica de la vegetación con diferente ciclo fotosintético y en la velocidad de reciclado del carbono.

- la existencia de vegetaciones de diferentes vías fotosintéticas a lo largo del Holoceno tardío, cuya alternancia se produjo en función de las fluctuaciones climáticas.

- el momento en que se produjeron los cambios en el tipo de vegetación.

Se confirma la alta sensibilidad de la región ante los cambios ambientales. Los cambios climáticos pusieron en juego:

- procesos de edafización durante los períodos húmedos que llevaron a la diferenciación de horizontes B_t y procesos de haploidización durante los períodos secos, a veces acompañados por procesos de deflación y depósito de materiales.

- estepas gramíneas capaces de sustituir la cobertura vegetal según su ciclo fotosintético y, bajo la influencia de la colonización europea, la expansión de vegetación más eficiente en el uso del agua, del carbono y del nitrógeno.

Por lo expuesto, se evidencia la importancia de la utilización de la técnica de abundancia natural en ^{13}C en conjunto con la de ^{14}C como herramientas para la interpretación de cambios ambientales. Los resultados logrados estuvieron en muy buen acuerdo con la información surgida desde diferentes disciplinas científicas que se dedican al estudio del Cuaternario en la región pampeana húmeda.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la invaluable colaboración del INTA y del Gobierno francés, quienes otorgaron becas para los Ings. A. Andriulo y G. Cordone. No menor es el agradecimiento a los Dres. D. Kröhling y M. Iriondo por su aporte al conocimiento sobre el Sistema Eólico Pampeano, a los Ings. O. Delfosse, A. Figgini, por su asistencia técnica en la determinaciones de ^{13}C y ^{14}C , a los colegas H. Fontanetto, H. Echeverría y M. Ferrari por la obtención de muestras de suelo en Rafaela y Balcarce e información cartográfica y climática, a la Ing. N. Carnevale por el suministro de los vegetales utilizados en este estudio y a F. Abrego y E. Torioni por su estrecha colaboración y paciencia ante nuestras demandas.

BIBLIOGRAFIA

- ABBAS, E. & J. BALESSENT.** 1995. Mechanistic simulation of vertical distribution of carbon concentrations and residence times in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1328-1335.
- BALESSENT J.** 1982. Etude de la dynamique de l'humification de sols de prairies d'altitude (Haut-Jura) au moyen des datations ^{14}C des matières organiques. Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, 90 p. + annexes
- BALESSENT, J.** 1991. Estimation du renouvellement du carbone des sols par mesure isotopique ^{13}C . Précision, risque de biais. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 26: 315-326.
- BALESSENT, J. & B. GUILLET.** 1982. Les datations par le ^{14}C des matières organiques des sols: Contribution à l'étude de l'humification et du renouvellement des substances humiques. *Science du Sol*, 93- 111.
- BALESSENT, J., A. MARIOTTI A. & G. H. GUILLET.** 1987. Natural ^{13}C abundance as a tracer for soil organic matter dynamics

- studies. *Soil Biol. Biochem.* 19: 25-30.
- BALESDENT, J.** 1991. Estimation du renouvellement du carbone des sols par mesure isotopique ^{13}C . Précision, risque de biais. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 26, 315-326.
- BALESDENT, J., C. GIRARDIN, M. GRABLY, J. GUILLEMOT, A. MARIOTTI, J.P. PÉTRAUD & C. PICOT.** 1994. Réponse des matières organiques des sols aux changements atmosphériques globaux: I. Compartimentation du carbone organique des sols cultivés. *In: Ecosystèmes naturels et cultivés et changements globaux.* INRA-DPE / CNRS-PIR, Dourdan, 17-19 mai, 12-14.
- BONETTO, A.A.** 1959. Las homigas cortadoras de la Provincia de Santa Fe (géneros *Atta* y *Acromyrmex*). *Dirac. Gral. Recursos naturales, Santa Fe, Argentina*, 80 pp.
- BRAILOVSKY, A. & D. FOGELMAN.** 1991. Memoria verde. Historia ecológica de la Argentina. Buenos Aires. Editorial Sudamericana. 279 páginas.
- BUCHER, E.** 1974. Observaciones ecológicas sobre los artrópodos del bosque chaqueño de Tucumán. *Rev. Fac. Cs. Ex. Fis. Nat. Córdoba (Nueva Serie) Biología* 1: 35-122.
- CAMPBELL, C.A.** 1978. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. *In: Soil organic matter.* M. Schnitzer and S.U. Kahn (Eds.). Elsevier Scientific Publishing Co., New York, 173-272.
- CRAIG, H.** 1954. ^{13}C in plants and the relationships between ^{13}C et ^{14}C variations in nature. *The J. Geol.* 62: 115-149.
- DE SANTIS, L.** 1951. Las principales hormigas dañinas de la provincia de Buenos Aires. *Dirac. Agric. Provincia de Buenos Aires., La Plata, Argentina.*
- DESJARDINS, T., F. ANDREUX, B. VOLKOFF & C.C. CERRI.** 1994. Organic carbon and ^{13}C contents in soils and soil size-fractions, and their changes due to deforestation and pasture installation in eastern Amazonia. *Geoderma.* 61: 103-118.
- DESJARDINS, T.H., B. VOLKOFF, F. ANDREUX & C.C. CERRI.** 1991. Distribution du carbone total et de l'isotope ^{13}C dans des sols ferrallitiques du Brésil. *Science du Soil.* 29: 175-187.
- DZUREC, R.S., T.W. BOUTTON, M.M. CALDWELL & B.N. SMITH.** 1985. Carbon isotope ratios of soil organic matter and their use in assessing community composition changes in Curley Valley, Utah. *Oecologia.* 66: 17-24.
- FIDALGO, F. & E. P. TONNI.** 1978. Aspectos paleoclimáticos del pleistoceno tardío-reciente en la provincia de Buenos Aires. *In: II Reunión Informativa del Cuaternario Bonaerense. Resúmenes.* CIC-PBA, Trenque Lauquen: p. 21-27.
- FRIEDLI, H., H. LOTSCHER, H. OESCHGER, U. SIEGENTHALER & B. STAUFFER.** 1986. Ice core record of the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 in the past two centuries. *Nature (London)* 324: 237-238.
- HALL, A.J., C.M. REBELLA, C.M. GHERSA & J.P.H. CULOT.** 1992. Field Crop systems of the pampas. *In: Field Crop Ecosystems.* C.J.Pearson, (ed.), Elsevier, 413-450.
- HAUMAN, L.** 1927. Les modifications de la Flore Argentine sous l'action de la Civilisation (Essai de Géobotanique humaine) *Académie Royale de Belgique. Classe des Sciences. Mémoires. Collection in 4°, Deuxième série - Tome IX, fasc. 3.*
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA AGROPECUARIA, INTA.** 1972. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3360-32, Pergamino, Buenos Aires, 106pp.
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA AGROPECUARIA, INTA & MINISTERIO DE AGRICULTURA PROVINCIA DE SANTA FE, MAGyC.** 1981. Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe. Tomo I, 246 pp.
- IRIONDO, M.** 1987. Geomorfología y Cuaternario.

- rio de la provincia de Santa Fe. D'Orbignyana 4:1-54. Corrientes, Argentina.
- IRIONDO, M. H.** 1990. Map of South American plains-Its present state. En Rabassa, J. (ED.): Quaternary of South America and Antarctic Peninsula, 6: 297-308. A.A. Balkema Publ. Rotterdam.
- IRIONDO, M.** 1994. Los climas cuaternarios de la región pampeana. Museo Provincial de Ciencias naturales "Florentino Ameghino", Santa Fe, Argentina, 48 pp.
- IRIONDO, M. & N. GARCIA.** 1993. Climatic variations in the Argentine plains during the last 18000 years. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.* 101: 209-220.
- IRIONDO M. & D.M. KROHLING.** 1995. El sistema eólico pampeano. Museo Provincial de Ciencias naturales "Florentino Ameghino", Santa Fe, Argentina, 60 pp.
- KUSNEZOV, N.** 1956. Claves para la identificación de las hormigas de la fauna argentina. *IDIA*, 104-105: 1-56
- LJUNGSTROM, P.O. & F. EMILIANI.** 1971. Contribución al conocimiento de la ecología y distribución geográfica de las lombrices de tierra (oligoquetos) de la provincia de Santa Fe (Argentina). *IDIA* 59: 19-32.
- MARSHALL, R.B. & J.N. WHITEWAY.** 1985. Automation on a interface between a nitrogen analyzer and isotope ratio mass spectrometer. *Analyst.* 110: 867-871.
- MOSCATELLI, G. N.** 1991. Los suelos de la región pampeana. *In: El desarrollo agropecuario pampeano.* O. Barsky (ed.). INDEC-INTA-IICA, Buenos Aires, 11-76.
- NISSENBAUM, A. & K.M. SCHALLINGER.** 1974. The distribution of the stable carbon isotope ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) in fractions of soil organic matter. *Geoderma* 11:137-145.
- O'BRIEN, B. J. & J.D. STOUT.** 1978. Movement and turnover of soil organic matter as indicated by carbon isotope measurements. *Soil Biol. Biochem.* 10: 309-317.
- PANIGATTI, J.L.** 1981. Molisoles del norte de la zona pampeana - Génesis y morfología. INTA - EEA Rafaela, Pub. Téc. N° 13, 22pp.
- PAUL, E. A., FOLLET, R. F., LEAVIT, S.W., HALVARSON, A., PETERSON, G. A., & LYON, D. J.** 1997. Radiocarbon dating for determination of soil organic matter pool sizes and dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1058-1067.
- POORTER, H., C. REMKES & H. LAMBERS.** 1991. Carbon and nitrogen economy of 24 wild species differing in relative growth rate. *Plant Physiol.* 94: 621-627.
- RECOUS, S.** 1994. Réponse des MOS aux modifications climatiques globales: In: *Ecosystèmes naturels et cultivés et changements globaux.* INRA-DPE/CNRS-PIR, Dourdan, 17-19 mayo, France.
- SECRETARIA DE AGRICULTURA, GANADERIA & PESCA.** 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. PROYECTO PNUD ARG 85/019, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Instituto de Evaluación de Tierras, 525 pp.
- SMITH, B.N. & S. EPSTEIN.** 1971. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Plant Physiol.* 47: 380-384.
- TONNI, E.** 1991. Mamíferos de la provincia de Buenos Aires. *In: El Holoceno en la Argentina* (M. Iriondo Ed.), CADINCUA, Vol I.