

Inundaciones en la región pampeana. Consecuencias sobre los suelos.

Miguel A. Taboada (1), Francisco Damiano (2), Raúl S. Lavado (1)

- (1) Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. e-mail: mtaboada@agro.uba.ar
- (2) Instituto de Clima y Agua, CIRN, INTA Castelar.
e-mail: fdamiano@cnia.inta.gov.ar

I. Identificación de las áreas afectas por inundaciones.

Extensas superficies de la región pampeana sufren periódicas inundaciones. Estas inundaciones afectan áreas rurales con sembrados, hacienda y viviendas y aún cascos urbanos de algunos pueblos y ciudades, con graves consecuencias para los pobladores y la economía regional. A partir del adverso y a veces grave impacto socio-económico que causan, existe una generalizada consideración negativa sobre el fenómeno de las inundaciones por parte de la sociedad. Esta visión negativa se hace extensiva a -lo que se cree son- las consecuencias posteriores sobre los suelos una vez que el agua inundante se retira. Entre algunos formadores de opinión existe la idea de un impacto negativo “residual” de las inundaciones sobre los suelos, los que -se supone- deberían aguardar un largo período de recuperación luego de la salida del agua. En el presente artículo se cuestiona esta generalización, a partir de resultados obtenidos durante varios años de investigaciones conducidas sobre suelos inundables.

Las inundaciones de la región pampeana no sólo afectan a los distritos periódicamente anegables (“campos bajos”), sino también a otras áreas que la gente no tiene memoria haberlos visto inundarse previamente. Sin embargo, la corta memoria de una o dos generaciones no significa que los suelos jamás hayan sufrido inundaciones a lo largo de su historia evolutiva.

Los suelos de la Región Pampeana se han desarrollado sobre sedimentos (loess) depositados en el Pleistoceno Tardío-Holoceno. Existen subregiones donde estos sedimentos dieron lugar a la formación de suelos con buen potencial agrícola, como por ejemplo la Pampa Ondulada o el Sudeste Bonaerense. Pero también existen subregiones que se caracterizan por ser inundables periódicamente, y los suelos por estar afectados por excesos de sales y sodio.

La Figura 1 identifica a las principales áreas inundables de las Pampas. Se trata, como puede verse, de áreas con muy escaso desarrollo de cursos de agua, lo cual dificulta la evacuación superficial de excedentes hídricos en épocas de lluvias elevadas. En nuestro análisis nos concentraremos en la problemática de las inundaciones en la provincia de Buenos Aires.

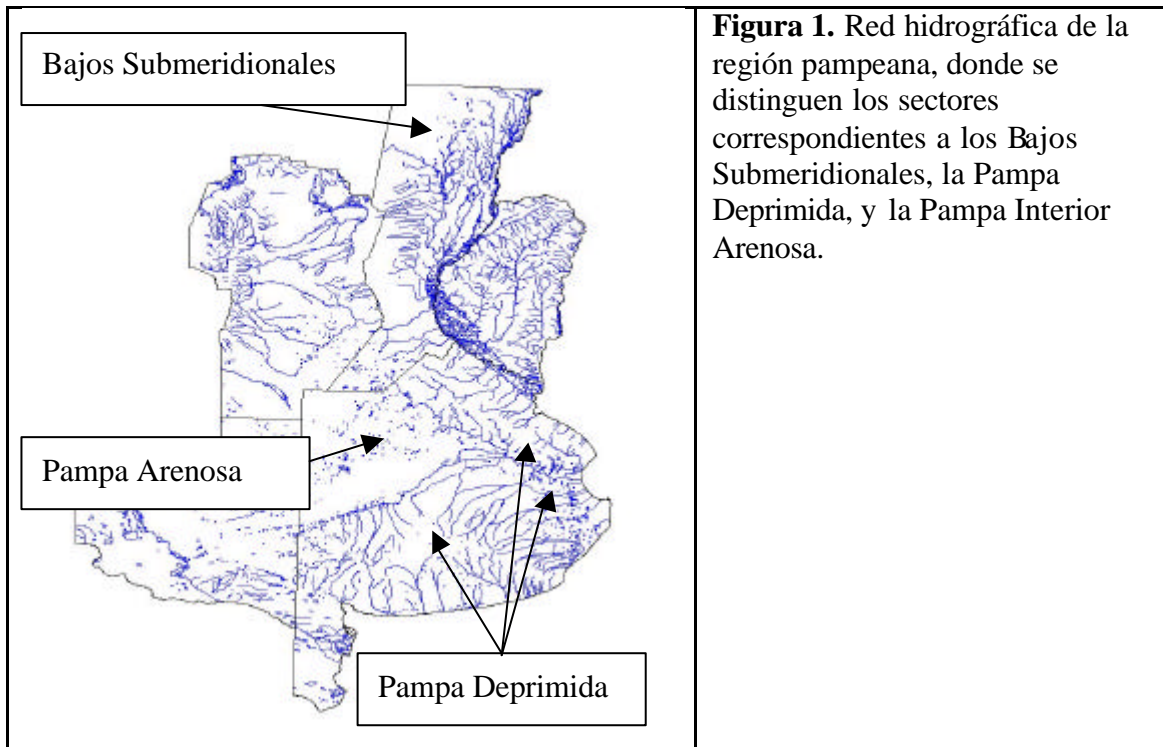


Figura 1. Red hidrográfica de la región pampeana, donde se distinguen los sectores correspondientes a los Bajos Submeridionales, la Pampa Deprimida, y la Pampa Interior Arenosa.

II. Factores determinantes de las inundaciones.

A. Caracterización del clima durante el siglo 20.

La Región Pampeana se encuentra comprendida dentro de un área de clima templado húmedo sin cobertura de nieve en invierno. Este clima determina una buena provisión de agua de lluvia y un régimen térmico moderado, permitiendo la agricultura y la ganadería sin riego continuo. Una forma de estudiar la lluvia y su incidencia es a través del análisis de series que muestren su variabilidad espacial y temporal. Para ello se eligieron seis estaciones meteorológicas estándar, con alrededor de un siglo de vida, ubicadas en una transecta oeste – este de la pampa bonaerense (Tabla 1). Cada estación representa a unidades fisiográficas conspicuas de la región.

En las estaciones mencionadas se analizó un ciclo de unos 100 años, durante el cual alternaron fases muy húmedas y secas. En la Figura 2 puede observarse que a partir de la década del '70 se produjo un cambio en el régimen de precipitaciones. Este cambio estuvo especialmente marcado en la franja tradicionalmente subhúmeda (Pampa Interior arenosa), donde se elevaron los promedios anuales de lluvia en el orden de 100 mm. Este incremento progresivo, en general, se manifestó como un aumento de los promedios de 700 a 800 mm en una primera etapa, para ubicarse en 900 mm en la siguiente y en los últimos años superar los 1000 mm. Durante el desarrollo de la presente fase húmeda, se constataron episodios de lluvia sobre los valores normales, que se alternan con otras pulsaciones en que los volúmenes son menores. No obstante, los valores no descendieron al nivel de alcanzar los niveles de la fase seca (años 1925-1965).

Tabla 1. Ubicación fisiográfica y característica pluviométrica de seis estaciones meteorológicas terrenas de la provincia de Buenos Aires [Unidades Geomorfológicas ver figura 4 a].

Partido	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (m)	Región Geomorfológica	Lluvia annual media (mm)	Período (año)
Rivadavia	35,50	63,00	105	Pampa Interior	827	1905-1999
Pehuajó	35,52	61,54	87	Pampa Interior	858	1897-2003
9 de Julio	35,27	60,53	76	Pampa Interior	938	1897-2003
Las Flores	36,02	59,06	33	Pampa Deprimida	883	1888-2003
Dolores	36,21	57,44	9	Pampa Deprimida	891	1889-2003
Gral. Lavalle	36,41	56,94	3	Pampa Deprimida	931	1887-2002

Este análisis del historial de lluvias indica la existencia de ciclos plurianuales alternados de bajas y por altas precipitaciones anuales. Por otra parte, indica la existencia de un aumento en la cantidad de lluvia en las últimas décadas, lo cual fue particularmente más ostensible en el oeste de la región pampeana. Hasta los años '70 del siglo pasado esta era una subregión de vocación predominantemente ganadera, y sin registros de inundaciones. Sin embargo, datos de lluvias y la presencia de ciertos componentes de los suelos, indican que en el pasado estas áreas también sufrieron inundaciones.

En las últimas décadas no sólo aumentaron las lluvias, sino que también cambió su distribución entre semestres. Ello puede ser observado en la Figura 3, que muestra las medias móviles por semestre de las localidades extremas de la transecta. En Rivadavia, al oeste, las lluvias han tendido a concentrarse en el semestre más cálido, mientras que no hubo cambios importantes en Dolores, al este de la transecta. Es decir que existe, en principio, una razón de origen climático que ha acentuado las inundaciones de las últimas décadas en la Pampa Interior o Arenosa.

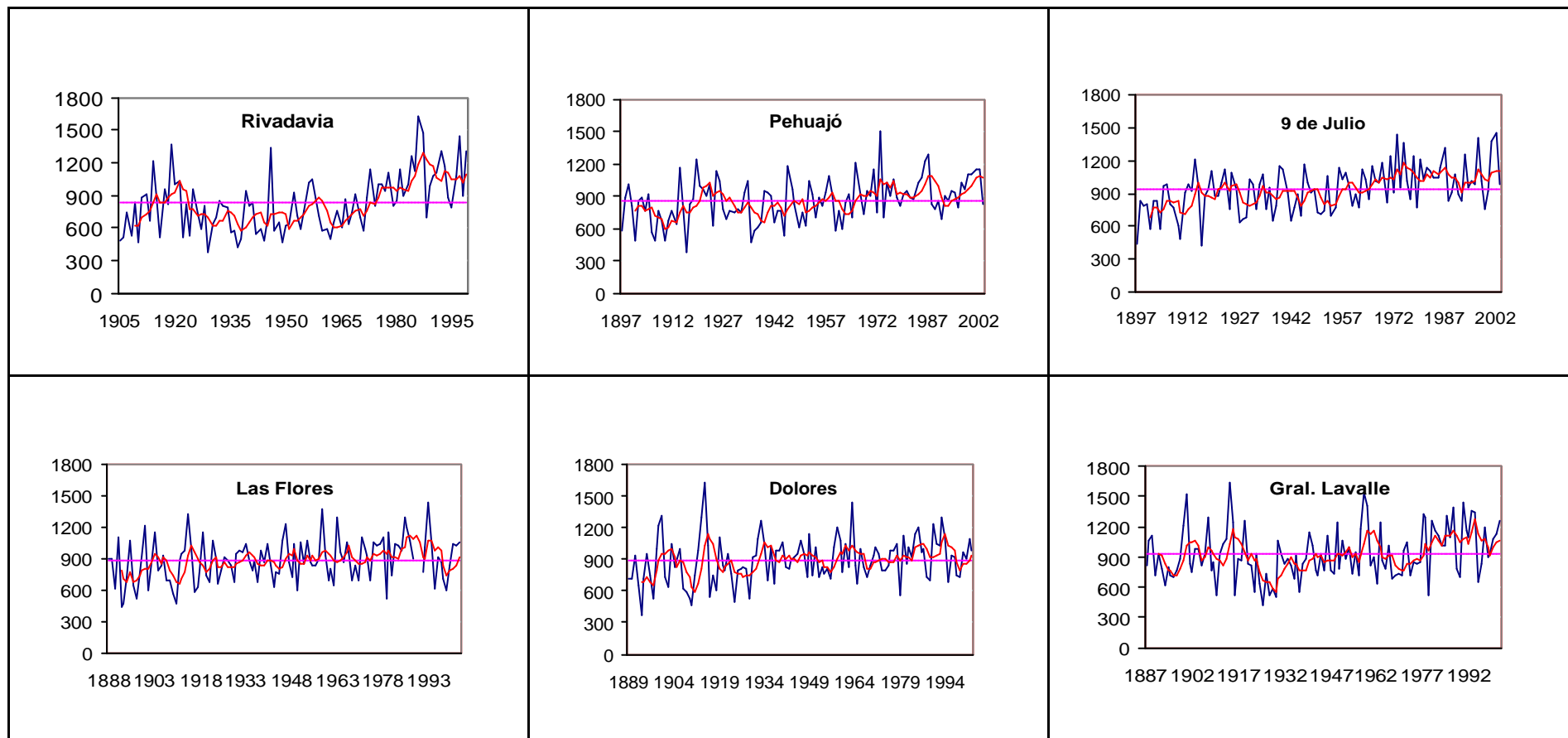


Figura 2. Evolución anual de las precipitaciones en valores medios y móviles de 5 años (curva roja) registrados en la última centuria en seis estaciones de la provincia de Buenos Aires, durante la cual ocurrieron cambios de fase seca a húmeda. Fuente: Instituto de Clima y Agua - INTA.

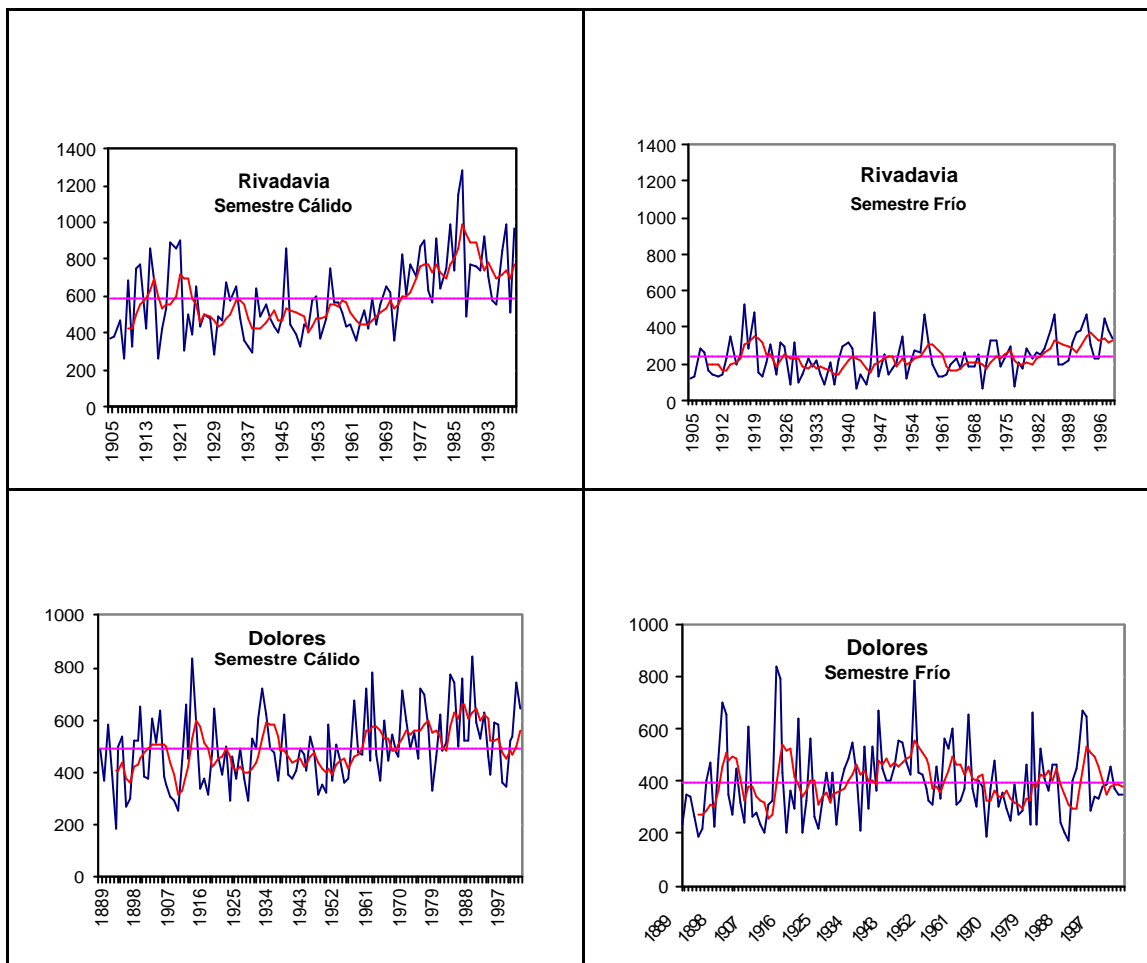
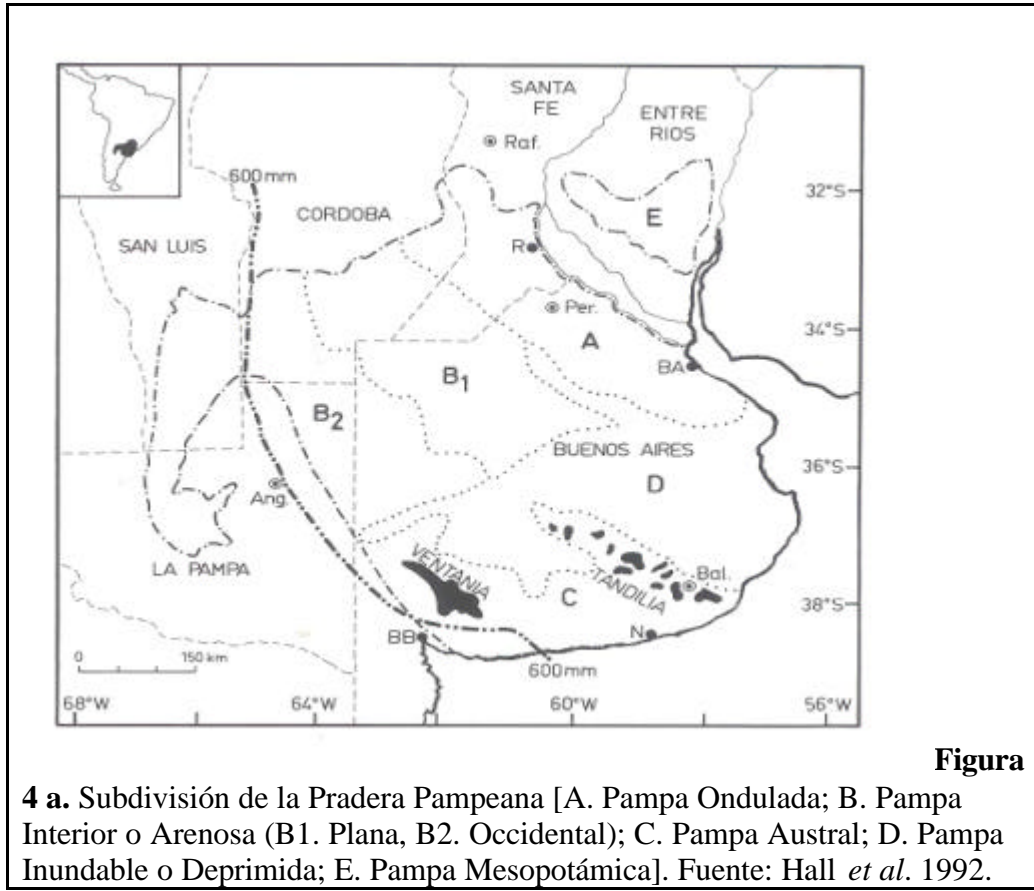


Figura 3. Evolución semestral de las precipitaciones en valores medios y móviles de 5 años (curva roja) registradas en las estaciones Rivadavia y Dolores. Fuente: Instituto de Clima y Agua -INTA.

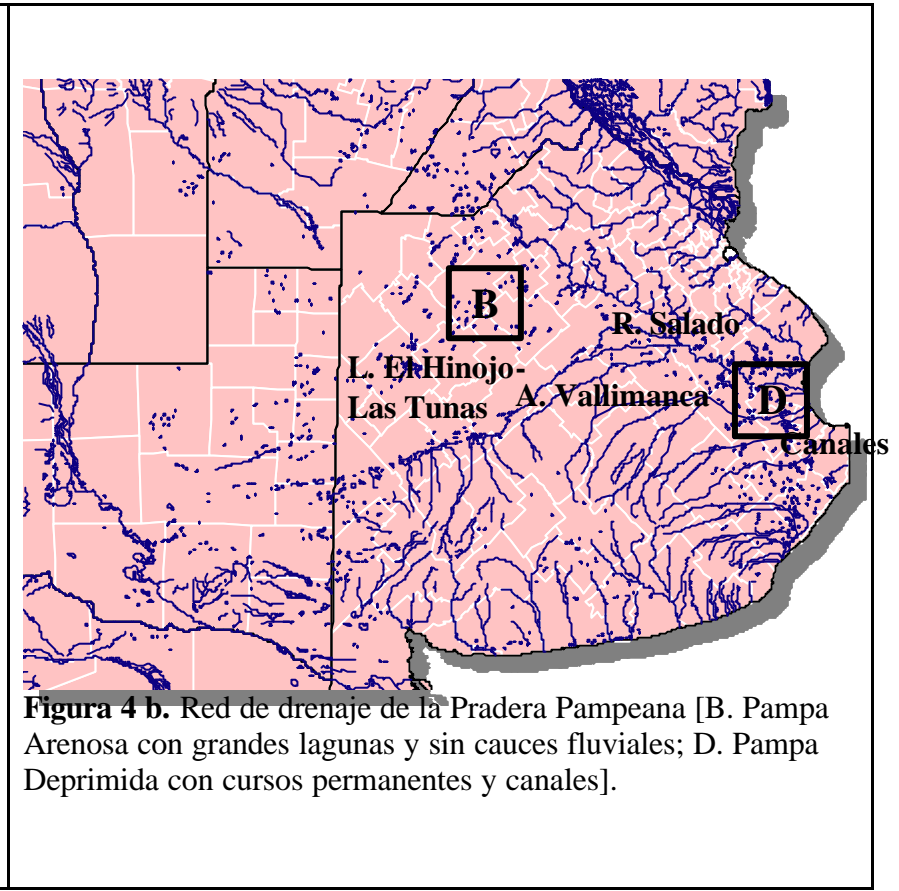
B. Aspectos geomorfológicos de las áreas inundables bonaerenses.

Pampa Interior o Arenosa

La Pampa Interior o Arenosa configura una gran llanura con pendiente regional suave de oeste a este, siendo el gradiente promedio de 25 cm por kilómetro (Figura 4 a; Tabla 1). A esta baja pendiente, se suma que toda la región está surcada por médanos que entorpecen el drenaje superficial. Estos médanos poseen una disposición transversal, generando así un tipo de drenaje arreico. Los excedentes de agua no se organizan en cursos superficiales, por lo que el agua sólo puede ser eliminada o bien por drenaje profundo, o bien por evaporación. Como se aprecia en la Figura 4 b, toda la subregión está poblada de lagunas y carece de cauces fluviales. Existe alternancia de expansiones y contracciones de la superficie de los cuerpos de agua, en respuesta a los pulsos de excesos o déficit de precipitaciones. Estas fluctuaciones de superficie pueden ser apreciadas en imágenes satelitales Landsat (Figura 5).



Figura



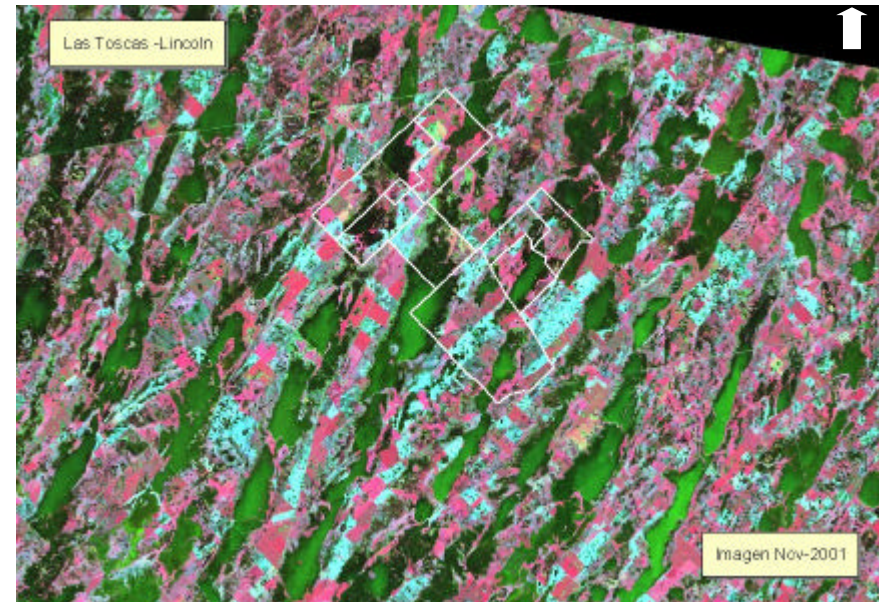


Figura 5. Imágenes de satélite Landsat mostrando los médanos longitudinales (colores claros) y áreas intermedanosas (color verde-oscuro) en condiciones de déficit (izquierda) y de exceso hídrico (derecha) en el sur del partido de Lincoln -Pampa arenosa central. Fuente Instituto de Clima y Agua -INTA.

Pampa Deprimida

En la Pampa Deprimida la hidrología y el sistema de drenaje se desarrollaron en un paisaje contenido por un relieve plano, suavemente deprimido y de muy baja pendiente (Figura 4 b). Según muestra un trabajo de Sala y colaboradores (1983), la densidad de cursos de agua es muy baja (0,05 km por kilómetro cuadrado de superficie), y existen áreas con drenaje arreico. O sea áreas con 0 km de cursos de agua por km² de superficie. En estos sectores sin cursos se establecieron grandes obras de canalización de comienzo de siglo XX, cuyo trazado puede apreciarse también en la Figura 4 b.

El principal colector natural de los excesos superficiales y subsuperficiales es el río Salado, típico río de llanura con régimen permanente y caudal sumamente variable. La Figura 6 muestra imágenes del satélite Landsat, en las cuales se aprecia la respuesta hidrológica de la región en condiciones de déficit (año 1999) y exceso hídrico (año 2001).

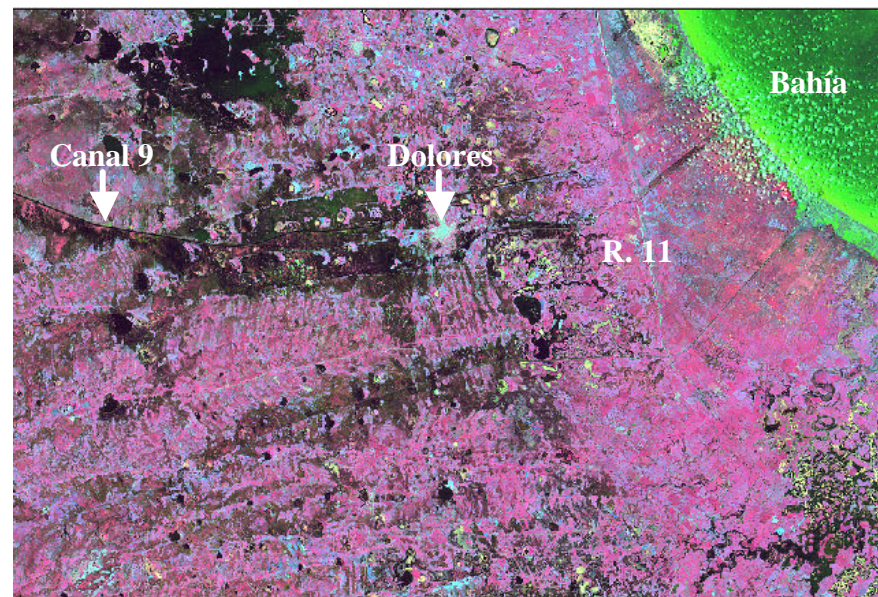
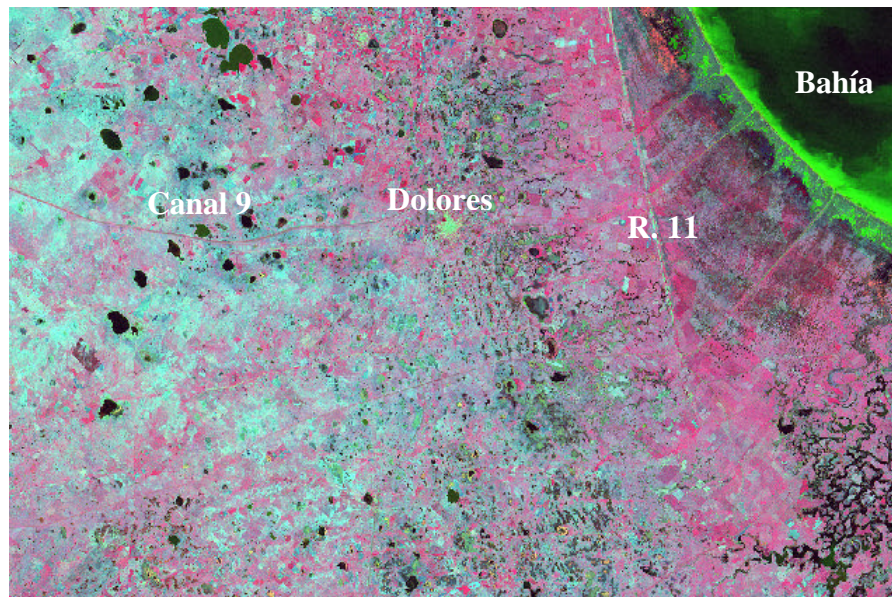


Figura 6. Imágenes de satélite Landsat mostrando un paisaje plano-cóncavo en condiciones secas durante octubre de 1999 (izquierda, tonalidad celeste) y de exceso hídrico registrado en noviembre de 2001 (derecha, tonalidad oscura) en un sector de la Bahía de Samborombón -Pampa Deprimida. Fuente: Instituto de Clima y Agua -INTA

C. Los suelos inundables.

Pampa Interior o Arenosa

Los suelos de la Pampa Interior o Arenosa se han desarrollado a partir de materiales arenosos recientes de espesor variable. Se encuentran asentados sobre sedimentos de textura fina, poco permeables que hacen de apoyo a la capa freática. La profundidad de esta capa depende del espesor del manto arenoso. El agua se mantiene lejos de la superficie en los suelos profundos, donde el relieve es ondulado, pero aflora donde la cobertura arenosa es escasa.

La Figura 7 muestra una idealización de una secuencia típica de perfiles de suelos en la región. En sitios con relieve ondulado y espesor del manto arenoso profundo, se han desarrollado suelos de textura franco arenosa, reacción ácida a neutra, algo excesivamente drenados y con baja retención de humedad. En estos suelos la capa freática se encuentra generalmente a gran profundidad. La mayoría de los reservorios de agua dulce subterránea se ubican en estos ambientes.

En sitios con relieve plano o tendido, aparecen suelos con escaso espesor del manto arenoso sobre el sedimento impermeable (Figura 8).. A este sedimento se lo conoce con el nombre de horizonte enterrado o *thapto*, ya que fue desarrollado en un clima distinto (*paleoclima*) que el actual. En estos suelos la capa freática suele estar cerca de la superficie, lo cual genera problemas de salinización y exceso de sodio intercambiable en los suelos. Es bien conocido en la zona la alta mineralización de las aguas subterráneas, y las secuelas que deja su ascenso capilar y posterior precipitación en superficie por efecto evaporativo del agua (Figura 9).

Pampa Deprimida

Según el relevamiento de suelos realizado por INTA (1990), más del 60 % de los suelos de la región están afectados por excesos de agua, junto con exceso de sales y sodio intercambiable. La mayor parte de los suelos presenta en profundidad un horizonte arcilloso sódico poco permeable, conocido como horizonte nátrico.

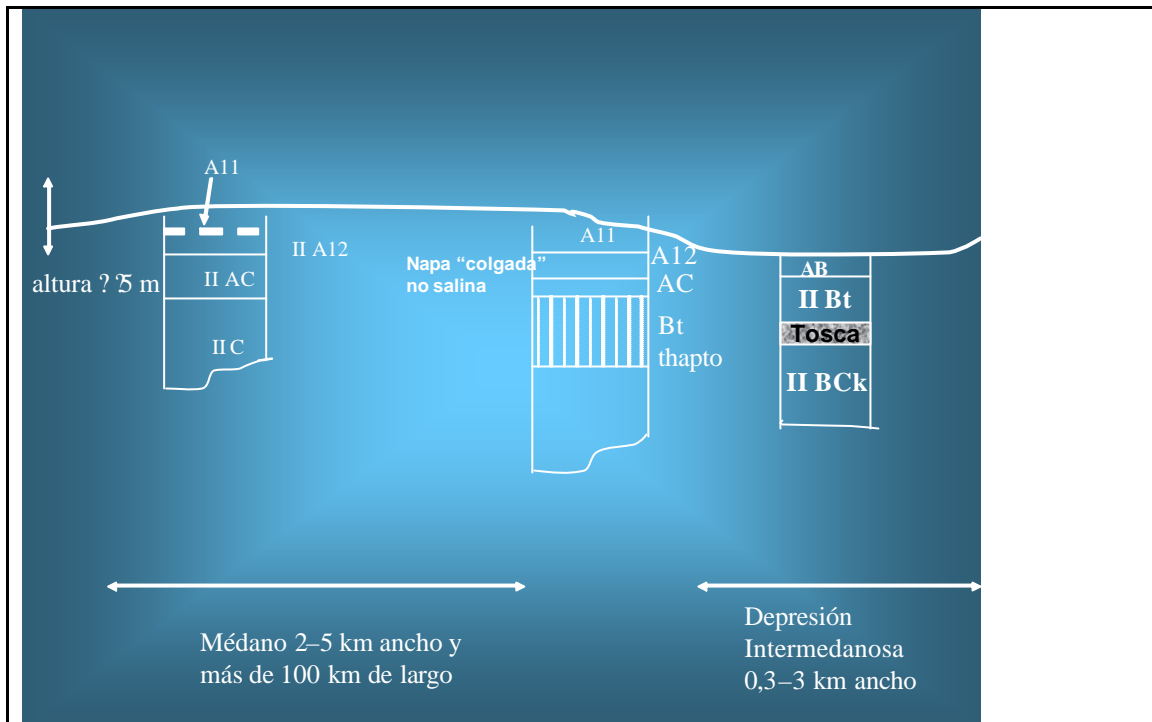


Figura 7. Esquema de una toposecuencia de suelos típicos correspondiente a la unidad fisiográfica "médanos longitudinales" en el oeste bonaerense. Las letras identifican a los distintos horizontes de los suelos.



a) Suelo con elevado espesor del manto arenoso. Ambiente plano alto (médano estabilizado).



b) Suelo con horizonte poco permeable enterrado (thapto). Ambiente plano.



c) Suelo con horizonte nátrico enterrado (Bt). Este horizonte impide el drenaje profundo. Ambiente tendido.



d) Suelo sódico desde la superficie, con evidencias de degradación de la estructura del horizonte superficial. Ambiente bajo anegable alcalino.

Figura 8. Fotografías con distintos suelos de la Pampa Interior o Arenosa.



Figura 9. Suelo desnudo degradado con salitre blanca y matas de Salicornia spp

La Figura 10 muestra fotografías de perfiles de suelos representativos de la región, clasificados con los nombres de Natracuol y de un Natracuolf, que representan respectivamente a los de mejor y de peor calidad agronómica relativa.

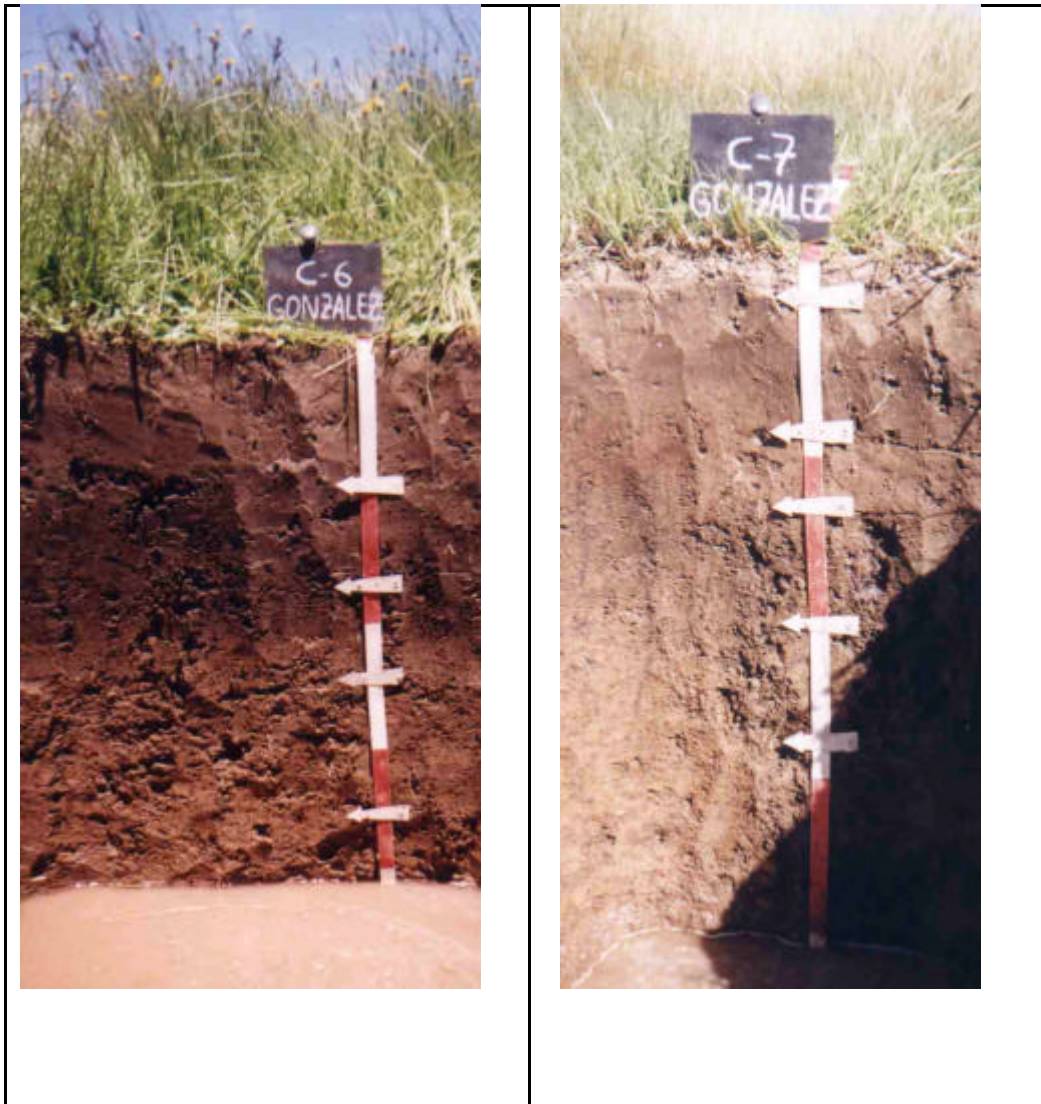


Figura 10. Fotografías de dos suelos representativos de la Pampa Deprimida. Izquierda: suelo sódico en profundidad (Natracuol). Derecha: suelo sódico desde superficie (Natracualf).

III. Tipos de inundaciones. Calidad del agua inundante. Factores determinantes.

El origen de la salinización de los suelos está relacionado con la calidad del agua inundante, medida por su contenido en sales y por el tipo de sal prevaleciente. Las consecuencias difieren si la inundación es causada por agua de lluvia, o por el contrario, por agua subterránea. Ello se explica en un diagrama en la Figura 11.

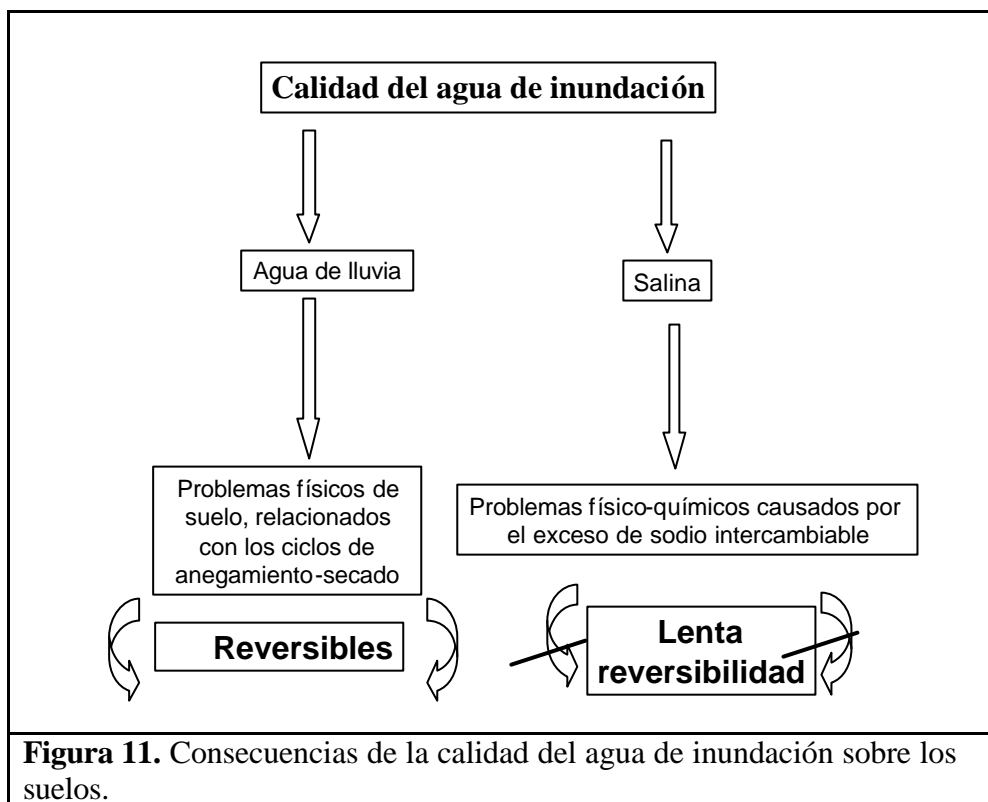
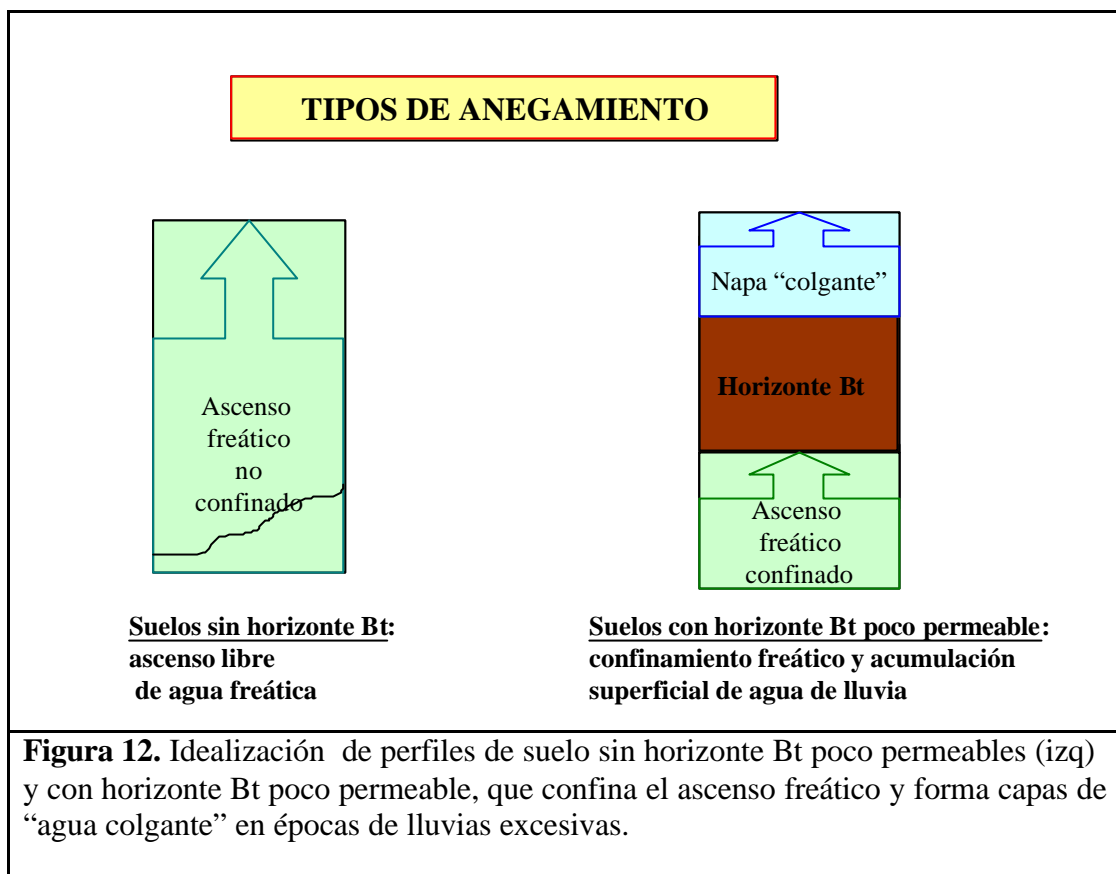


Figura 11. Consecuencias de la calidad del agua de inundación sobre los suelos.



Alrededor del 90 % de los problemas de salinidad y sodicidad en los suelos se asocian con ascensos de agua subterránea, es decir aguas que emergen desde la profundidad. La modalidad de estos ascensos difiere según que los suelos posean, o no, horizontes con mayor o menor permeabilidad (horizontes B textural o Bt) en profundidad, lo que se asocia en gran medida con la presencia de horizontes Bt nátricos. En la Figura 12 se esquematizan las dos situaciones, una con el ascenso freático libre, y la otra con el ascenso confinado por el fondo del horizonte Bt poco permeable, formándose capas de “agua colgante” sobre la parte superior de este horizonte.

En épocas de balance hídrico positivo, en suelos sin horizontes o capas impermeables la capa freática asciende y se aproxima a la superficie. Las sales presentes en el agua se mueven por flujo masal, a veces por difusión, y eventualmente alcanzan la superficie del suelo. El potencial de salinización de este proceso está relacionado por la concentración de sales del agua freática que asciende. Los contenidos de sales son muy variables, no sólo de un lugar a otro, sino entre estaciones del año. La posibilidad de salinización de la superficie del suelo después de estos anegamientos depende entonces de la combinación de dos variables: salinidad y profundidad de la capa freática.

Ello se observa en la Figura 13, que muestra la secuencia de ascensos de profundidad de la capa freática y su salinidad en el centro de la Pampa Deprimida durante las inundaciones (Lavado y Taboada 1987). Las sales alcanzan la superficie del suelo causando picos salinos en los meses estivales. Las lluvias posteriores las lavan rápidamente en profundidad. Los procesos de salinización superficial son favorecidos por las superficies de suelo desnudo generadas por el pastoreo vacuno. Todos los estudios se realizaron en el centro de la depresión del Salado (partido de Pila), mediante

la comparación de situaciones bajo *pastoreo continuo* con *clausuras* plurianuales. Estas clausuras eran potreros de unas 4 ha de superficie, en las cuales se había excluido la entrada de ganado doméstico durante varios años (más de seis). Nótese que no existen procesos de salinización superficial en estas situaciones de clausura, debido a que en ellas existe cobertura total del suelo.

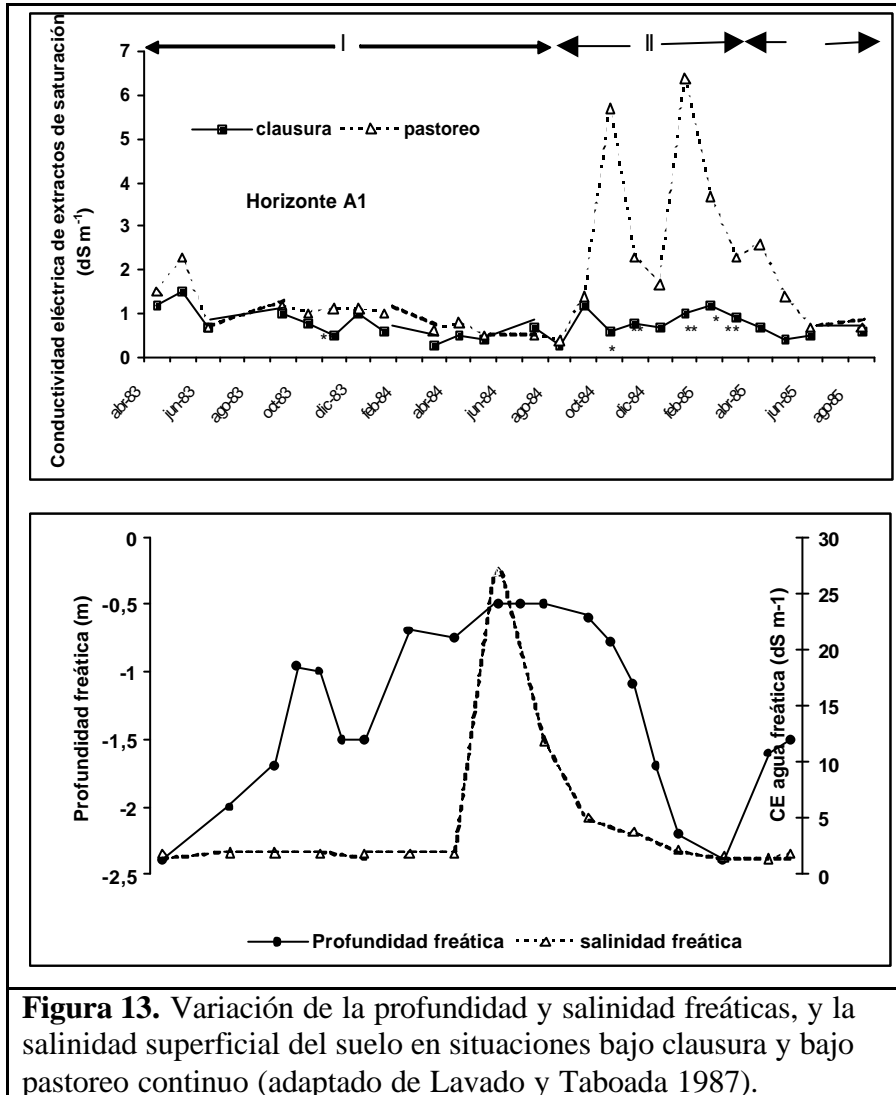
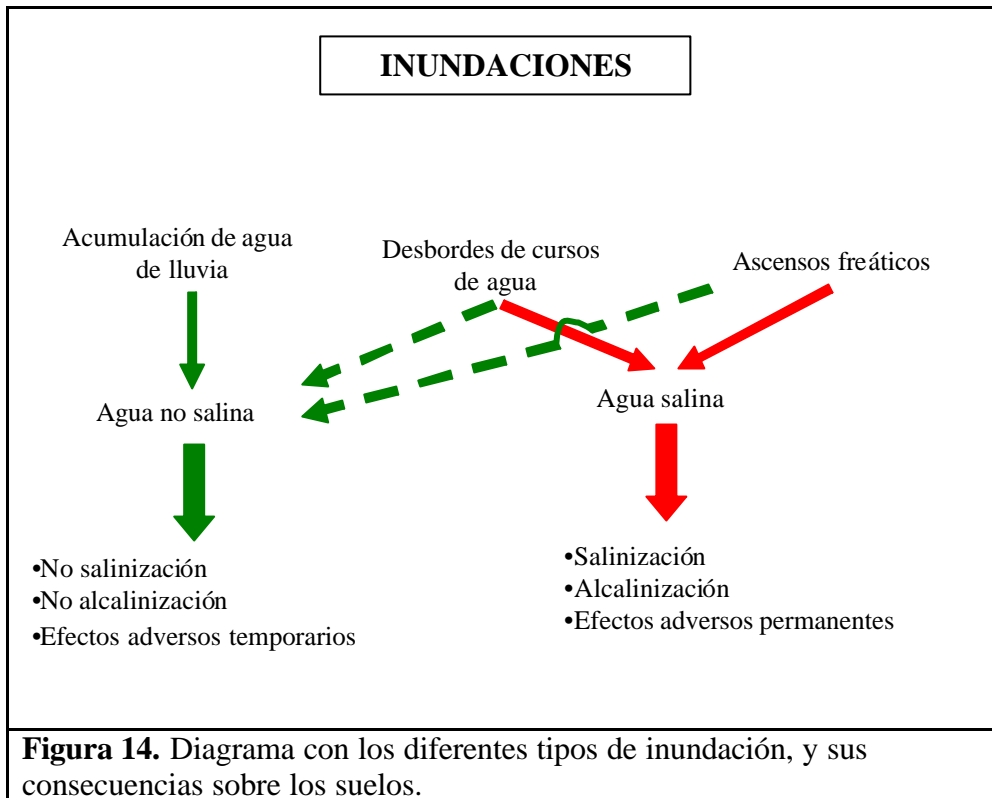


Figura 13. Variación de la profundidad y salinidad freáticas, y la salinidad superficial del suelo en situaciones bajo clausura y bajo pastoreo continuo (adaptado de Lavado y Taboada 1987).

La presencia de horizontes Bt poco permeables determina que el ascenso freático no pueda alcanzar la superficie de los suelos, por lo que es confinado por el fondo de estas capas. El agua de lluvia que infiltra y percola unos pocos centímetros de los perfiles del suelo, normalmente no alcanza a disolver grandes cantidades de sales. Se trata generalmente de agua dulce, incapaz de causar salinización de la superficie de los suelos. Esta situación de anegamiento por agua de lluvia es la que prevalece en la Pampa Deprimida, y parte de la Pampa Interior Arenosa. En realidad, podría afirmarse que la presencia de horizontes Bt contribuye a evitar que el agua subterránea más cargada en sales alcance la superficie de los suelos, deteriorándolos. La capacidad de almacenamiento de agua por los distintos perfiles va a depender en gran medida de cuán alejado de la superficie se encuentra este horizonte subsuperficial.

La Figura 14 muestra un diagrama con los diferentes tipos de inundaciones, que conducen a inundaciones con agua no salina y salina. Como fue explicado, ambos tipos de inundación generan consecuencias muy diferentes sobre los suelos.



Inundaciones con agua no salina.

La Figura 15 muestra la secuencia de efectos probables de un anegamiento con agua no salina, típicamente de origen pluvial. Los efectos son básicamente dos: desarrollo de anaerobiosis y baja capacidad portante del suelo, o *“falta de piso”*. Las consecuencias de la anaerobiosis serán tratados más adelante, y dependen en gran medida de la duración del anegamiento. La capacidad portante del suelo indica su capacidad para soportar un determinado peso o estrés mecánico. En los suelos agrícolas dicho estrés proviene esencialmente del paso de la maquinaria agrícola y, en los ganaderos, del tránsito de animales.

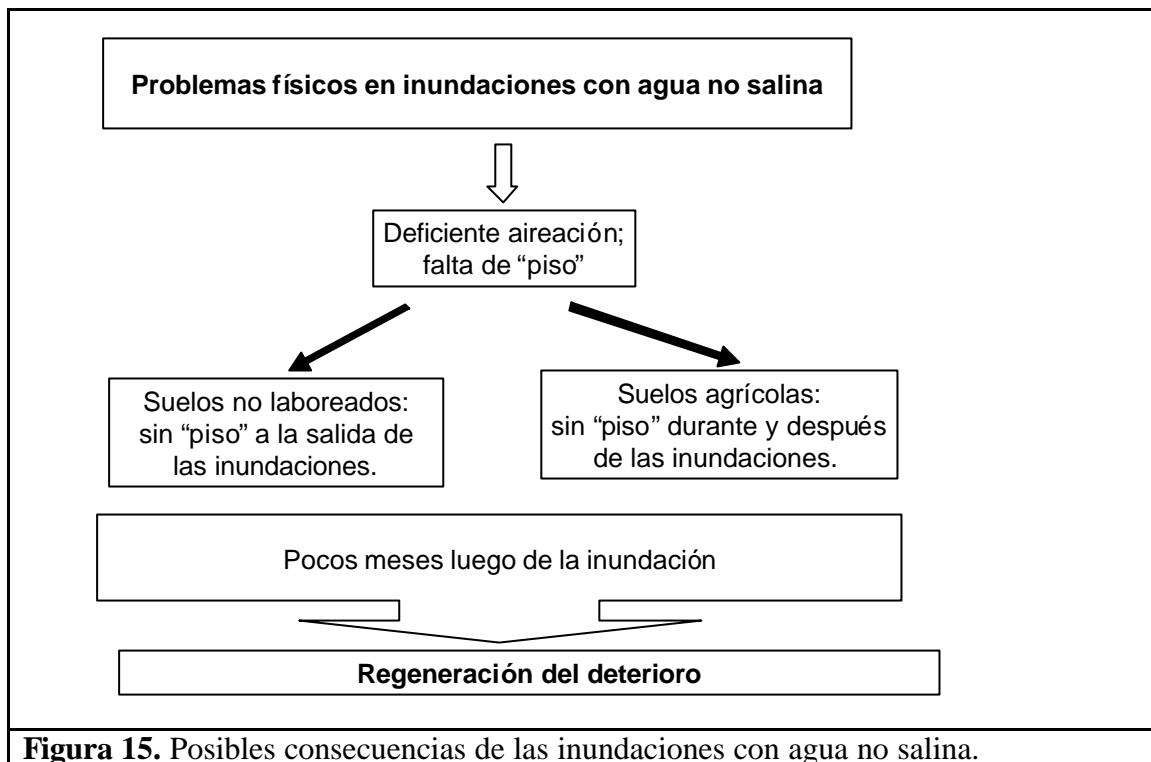
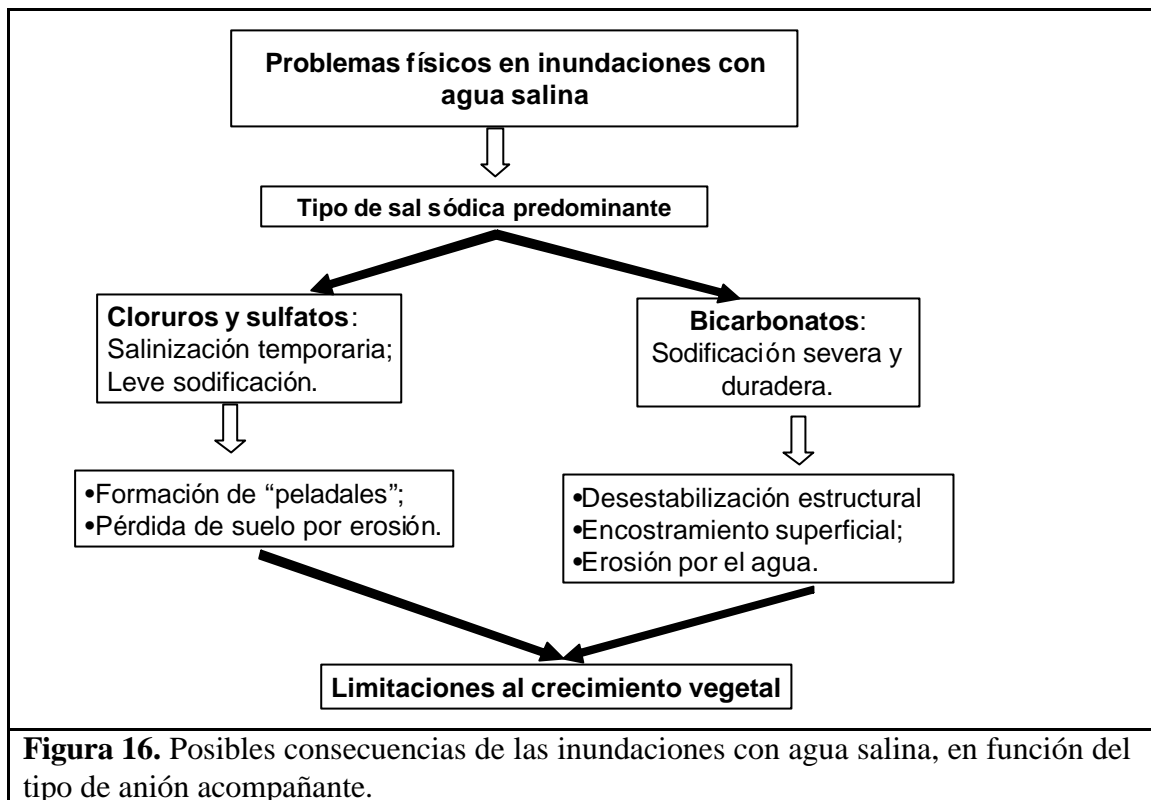


Figura 15. Posibles consecuencias de las inundaciones con agua no salina.

Efecto de las inundaciones con agua salina

Cuando el agua de inundación es salina, sea de origen superficial o profundo, las sales son principalmente sódicas. El impacto sobre el suelo dependerá del anión acompañante del sodio. Cuando el sodio se presenta en forma de cloruros o sulfatos, tienden a permanecer estables (flocular) los coloides del suelo, por lo que no suelen existir problemas de estabilidad en sus agregados y poros. En cambio, los cultivos desarrollados en estos suelos presentan problemas de toxicidad y de falta de agua, derivados de la presencia de sales en solución. El grado de severidad de los daños ocasionados depende de la concentración de sales, por un lado, y la duración del fenómeno, por el otro.



Cuando los aniones acompañantes del sodio son el carbonato y bicarbonato (Figura 16), la solución posee reacción alcalina (pH superior a 7). Por ello, a diferencia de la situación presentada precedentemente, la presencia de estas sales en los suelos determina valores de pH elevado. Además, el sodio es retenido por las arcillas del suelo, y precipita como carbonato de calcio, con lo cual el pH tiende a aumentar aun más. Esas condiciones alcalinas y las características del sodio (ión altamente hidratado) conducen a la inestabilidad o dispersión del complejo coloidal. Esto causa serias consecuencias sobre los suelos: la desestabilización de los terrones (agregados), la movilización de partículas, la obturación de los poros. Estos procesos reducen la infiltración y la porosidad y se altera la retención del agua. También, disminuye el flujo del agua dentro del suelo, que en casos de sodicidad muy elevada llega al extremo de cesar completamente. La recuperación de este daño sólo es posible con prácticas muy onerosas y con éxito relativo como el enyesado.

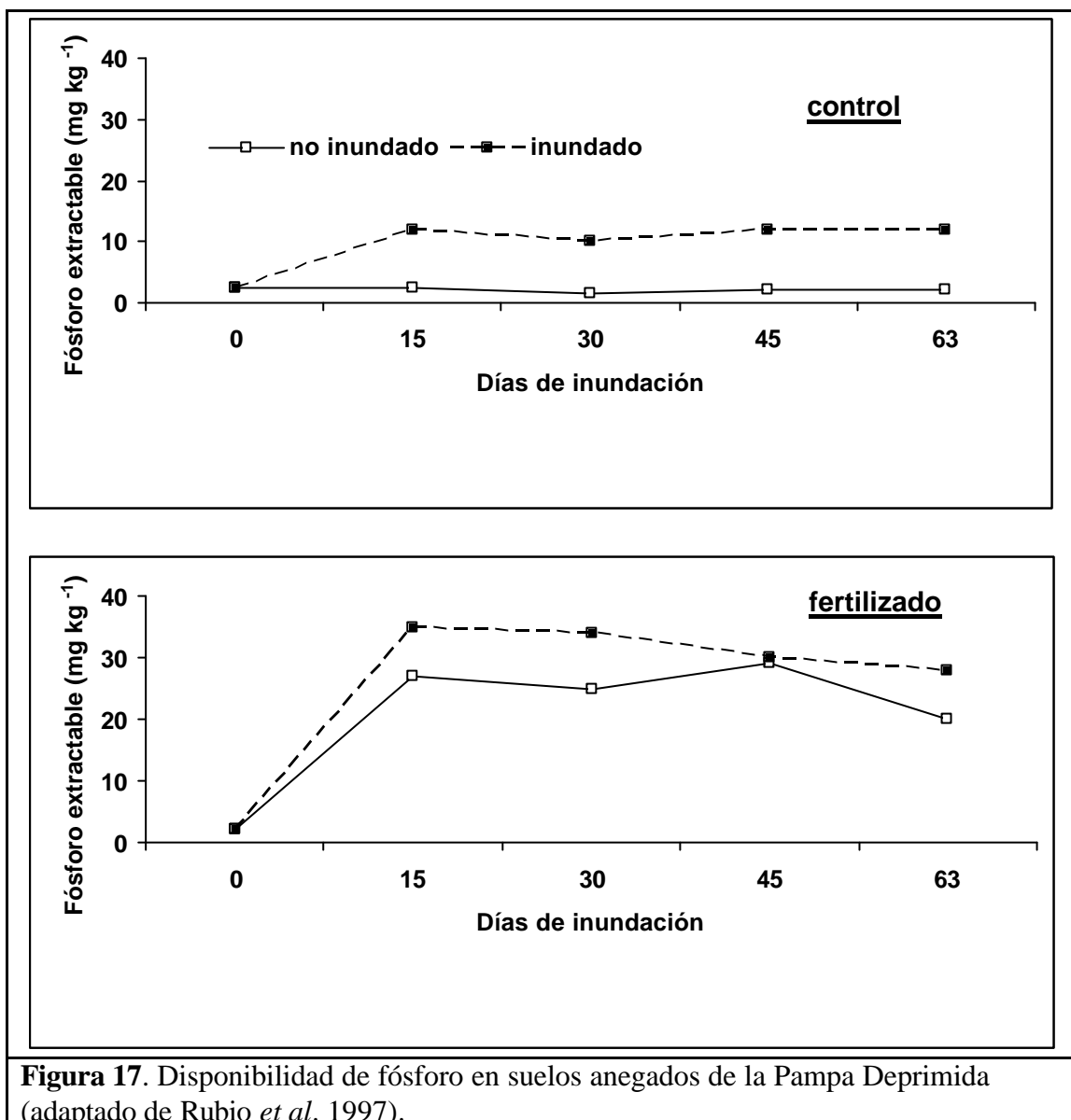
IV. Consecuencia de las inundaciones sobre la fertilidad química y física de los suelos.

A. Procesos de reducción en suelos inundables, y sus consecuencias sobre la disponibilidad de nutrientes vegetales.

Cuando un suelo se inunda casi todo el aire presente en los poros es reemplazado por agua, por que el suelo pasa a una condición de ausencia de oxígeno o anaerobiosis. En el suelo pasan a prevalecer procesos de reducción química, en lugar de los de oxidación. Los electrones cedidos por la materia orgánica en descomposición son aceptados por otros compuestos que reemplazan al oxígeno, que en condiciones normales es el principal aceptor de electrones de la naturaleza.

En primer lugar, los nitratos se reducen a formas de nitrógeno molecular (N_2) y óxido nitroso (N_2O), en un proceso conocido como desnitrificación. La concentración de nitratos se reduce rápidamente (dos o tres días) en la solución del suelo. La emisión de óxidos nitrosos desde estos suelos puede contribuir al calentamiento general de la atmósfera por efecto invernadero. Sin embargo, las pérdidas por desnitrificación sólo pueden alcanzar magnitud importante en suelos sometidos a ciclos alternados de anaerobiosis - aerobiosis, que permiten la nueva formación de nitratos por procesos de mineralización. Por ello, no es esperable un impacto muy grande de las inundaciones sobre las pérdidas de nitrógeno desde el suelo. En estos suelos las plantas están capacitadas para absorber nitrógeno como amonio ($N-NH_4$), tal como sucede con el cultivo de arroz cultivado con manto de inundación.

En los suelos existe abundancia de óxidos y sesquióxidos de hierro y manganeso. Cuando el suelo se inunda, se forman compuestos con hierro ferroso ($FeII$) y manganeso reducido ($MnII$). Estos cambios pueden traer beneficios en el caso de la disponibilidad de fósforo. Ello sucede porque las fracciones minerales de fósforo unidas al hierro y al manganeso, se solubilizan cuando estos elementos se reducen. Este proceso es conocido desde hace muchos años en los suelos cultivados con arroz, que poseen mayores niveles de fósforo disponible para las plantas, durante la inundación. En la Pampa Deprimida se encontraron, como ocurre en todo el mundo, mayores contenidos de fósforo total y orgánico en los bajo sometidos a mayor grado de inundación. En la Figura 17 se observa el incremento en la disponibilidad de fósforo en suelos no fertilizados y fertilizados, como resultado del anegamiento. Sin embargo, la inundación tiene poco efecto en la distribución en las distintas fracciones del fósforo. Se sugirió que la homogeneidad en el material original de los suelos (tipo de sedimento y edad), el contenido de arcillas y el tipo de vegetación (pastizal) predominan en la determinación de las fracciones del fósforo orgánico, por encima de la duración de las inundaciones (Rubio et al. 1995).



En los casos en que la inundación sea *quasi-permanente*, o que se prolongue por años, los niveles de reducción pueden ser muy elevados, lo cual genera el pasaje de los sulfatos disueltos en la solución del suelo a sulfuros, con emisión de malos olores. Cuando los sulfuros aparecen en la solución del suelo, pueden reaccionar con micronutrientes como el manganeso, hierro, cobre y zinc. Estos sulfuros son muy insolubles, por lo que disminuye drásticamente la disponibilidad de estos micronutrientes. Finalmente, luego de varios días de anegamiento comienza la fermentación de la materia orgánica con la emisión de gases como el metano (CH₄), que también contribuye al calentamiento general de la atmósfera.

A partir de todo lo antedicho, puede afirmarse que las inundaciones no afectan ni severa ni permanentemente ningún componente de la fertilidad química de los suelos, o dicho en términos más vulgares, no “lavan” los suelos. Esta afirmación no incluye los casos donde existan pérdidas importantes por escorrentía y erosión, dado que el arrastre de suelo superficial lleva aparejado la pérdida de materia orgánica y de nutrientes. Pero esto es poco común, porque estos fenómenos tienen lugar en partes altas del relieve, y las que se inundan son normalmente las partes bajas.

B. Funcionamiento de la estructura de los suelos inundables.

En una secuencia de trabajos se ha analizado el impacto del pastoreo vacuno sobre las propiedades físicas de los suelos. Estas propiedades se refieren al ordenamiento de las fases del suelo (sólida, líquida y aérea) en forma de agregados /o terrones y de poros relacionados. Se refiere además a la dinámica de los fluidos (agua y aire) a través de los poros del suelo.

La Figura 18 muestra el régimen de variación del contenido hídrico edáfico y de la porosidad total en situaciones bajo clausura y bajo pastoreo. Puede observarse una tendencia a la existencia de mayores niveles de humedad en el suelo de la clausura, hecho motivado por el control de las pérdidas de agua por evaporación que puede suceder a partir de suelo desnudo. Se observa también en qué forma las variaciones de porosidad total del suelo pastoreado siguen a las variaciones de contenido hídrico. Ello muestra que estos suelos inundables son capaces de variar su volumen en respuesta a los ciclos de inundación y secado, por el desarrollo de procesos de expansión-contracción. El efecto mecánico del pisoteo se superpuso a estos cambios de volumen del suelo. Es interesante notar que la porosidad del suelo fue mayor en el suelo de la clausura en fechas sin inundación, y viceversa, en fechas con inundación.

Las diferencias observadas en porosidad total del suelo se deben normalmente a cambios que tienen lugar en los poros de mayor tamaño (macroporos). Estos poros poseen diámetros mayores que 30 micrones ($> 30 \mu\text{m}$), y en el suelo son responsables de los procesos de aireación y el drenaje del agua. Son los lugares que aprovechan las raíces para crecer y algunos componentes de la fauna (lombrices, microartrópodos, etc.) y la flora (micorrizas, etc.) para vivir. En la Figura 19 puede observarse que en verano, con el suelo moderadamente seco, el suelo pastoreado mostró valores significativamente más bajos de macroporosidad que el suelo de la clausura. Ello refleja el origen de las diferencias en porosidad total a favor de la clausura no pastoreada, o dicho de otra forma, a la compactación por pisoteo, la cual afectó a los macroporos de mayor tamaño ($> 100 \mu\text{m}$ y $60-100 \mu\text{m}$). Estos daños se revirtieron sólo unos meses después, en invierno, con el suelo inundado. Puede observarse que el suelo pastoreado mostró valores significativamente más altos de macroporosidad, preferencialmente en las clases de diámetro más pequeño ($60-100 \mu\text{m}$ y $30-60 \mu\text{m}$). Ello también refleja el origen de las diferencias en porosidad total que tuvieron lugar en el suelo pastoreado (Fig. 18).

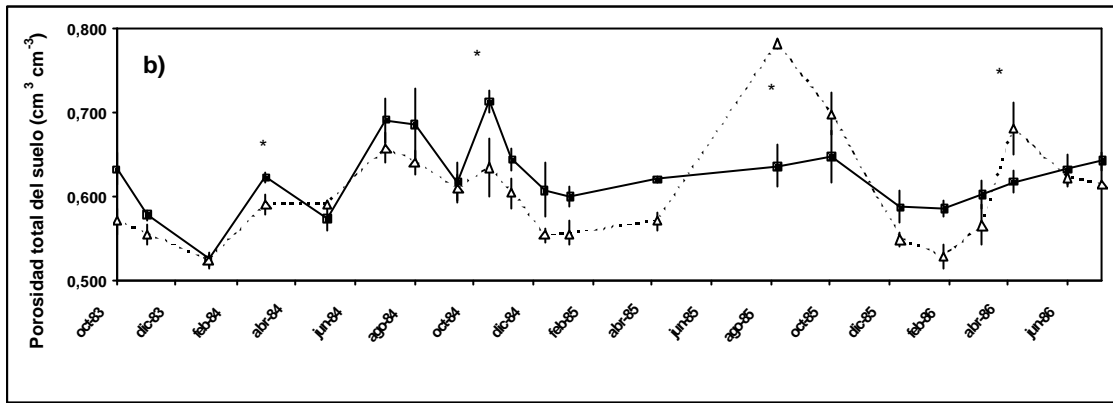
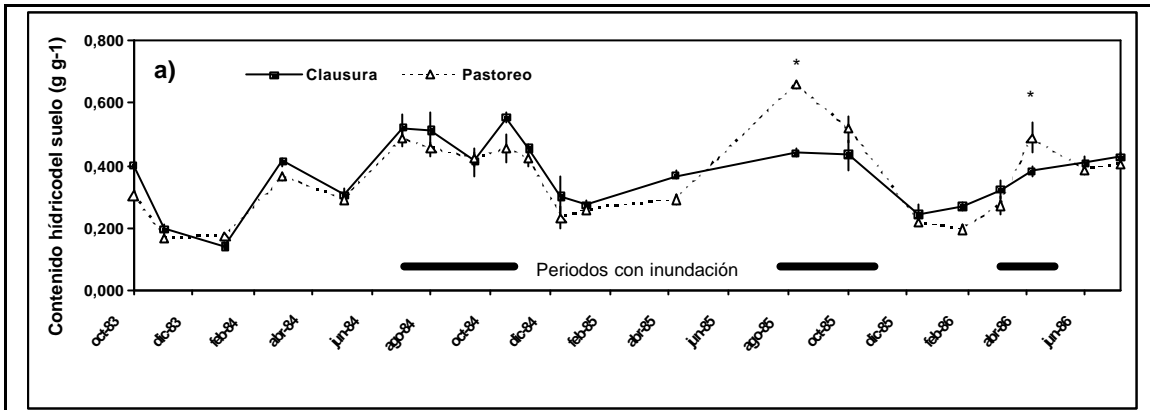


Figura 18. Variaciones de la humedad y de la porosidad total del suelo en situaciones bajo clausura y bajo pastoreo continuo en el centro de la Depresión del Salado. Los asteriscos (*) indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre tratamientos (adaptado de Taboada *et al.* 1993).

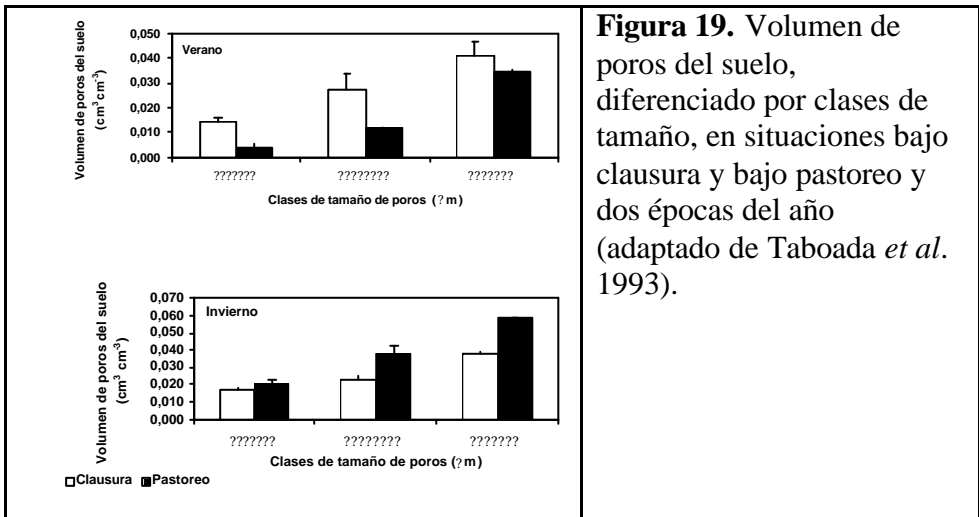


Figura 19. Volumen de poros del suelo, diferenciado por clases de tamaño, en situaciones bajo clausura y bajo pastoreo y dos épocas del año (adaptado de Taboada *et al.* 1993).

La Figura 20 muestra las variaciones de estabilidad estructural en las mismas situaciones que en los casos anteriores. La estabilidad se mide usualmente a través del diámetro de los agregados que resisten el tamizado en agua. Los resultados fueron diferentes según que el suelo estuviere, o no, inundado. Con suelo no inundado, los valores de estabilidad fueron más altos en el suelo de la clausura, demostrando que el pisoteo dio lugar a terrones estables más pequeños. Por el contrario, en las fechas el

suelo estuvo inundado, las diferencias en estabilidad estructural entre tratamientos desaparecieron, mostrando así la recuperación de la estabilidad.

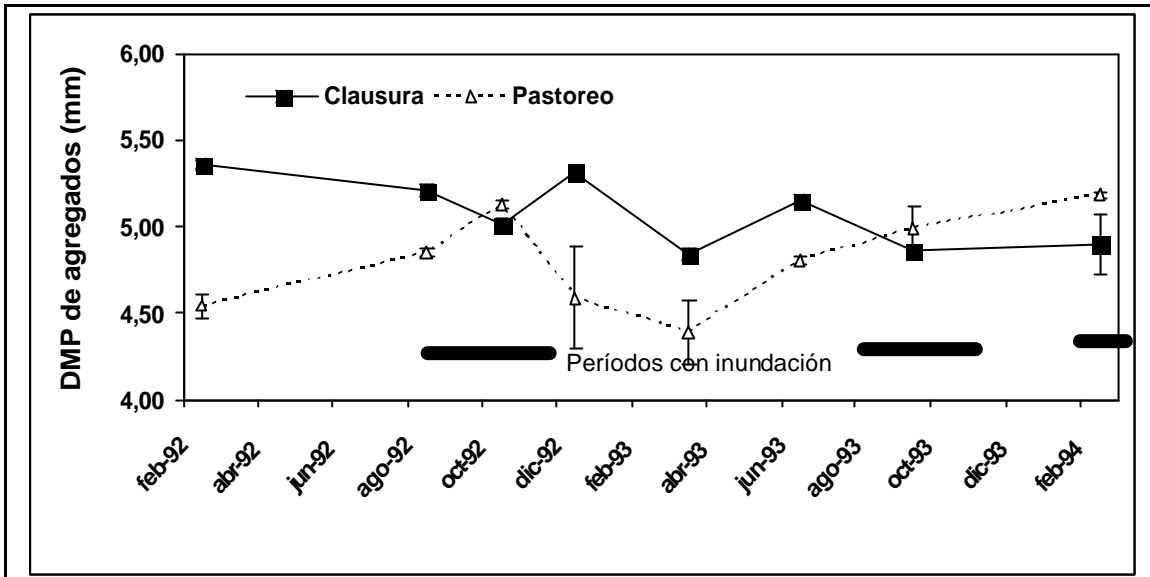


Figura 21. Variación del diámetro ponderado de agregados (DMP) en situaciones bajo clausura y bajo pastoreo en la Pampa Deprimida. Las barras indican los errores estándar de las medias (adaptado de Taboada *et al.* 1999).

Las variaciones de la porosidad y de la estabilidad estructural son esencialmente coincidentes. Los daños por pisoteo se producen cuando el suelo está moderadamente húmedo a seco, y la recuperación de ese daño tiene lugar con el suelo inundado. Contra lo que usualmente se supone, no hubo daños estructurales por amasado del suelo o “poaching” cuando el suelo está inundado.

Este funcionamiento de la estructura de los suelos es explicado por un modelo conceptual (Figura 21). Según este modelo, los descensos en estabilidad son causados por la destrucción de macroporos llenos de aire por las pezuñas animales cuando el suelo está seco. Esta destrucción genera agregados más pequeños, que causan descensos en estabilidad estructural. La recuperación de la estabilidad estructural comienza en otoño y se completa en invierno, cuando el suelo está inundado. Esta recuperación es resultado del hinchamiento del suelo, cuando los agregados pequeños creados por el pisoteo son unidos nuevamente en grandes unidades estructurales.

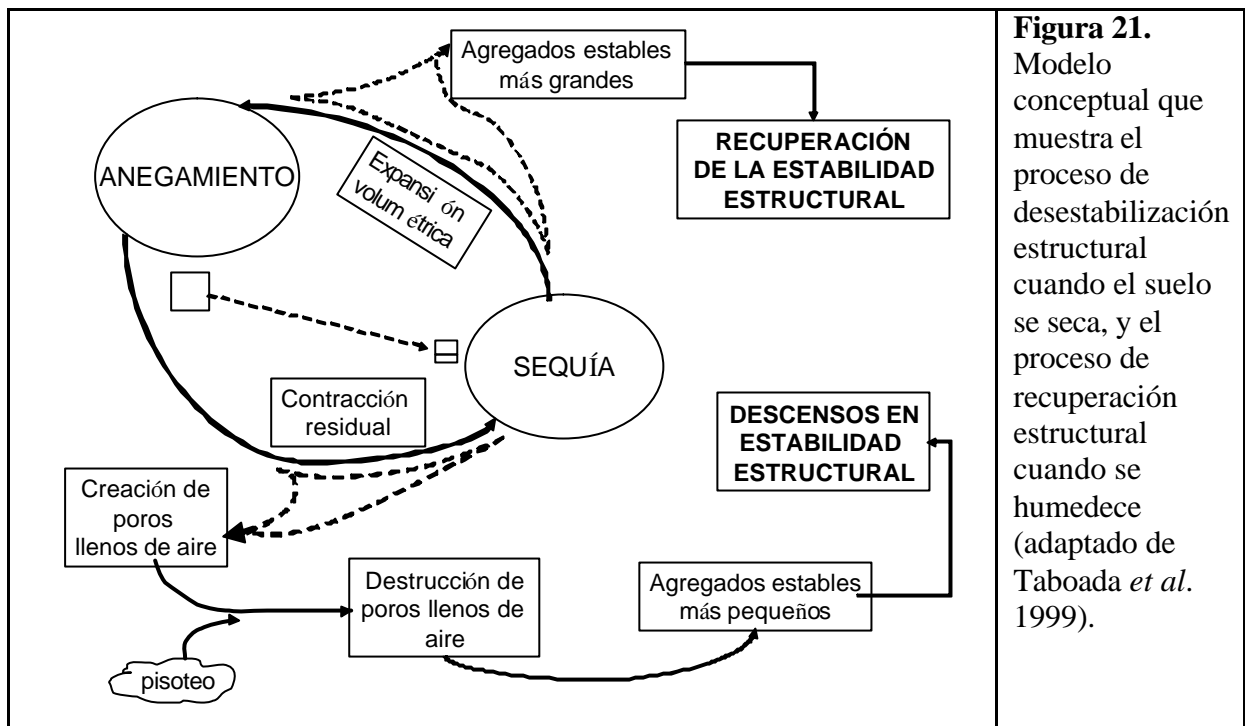


Figura 21. Modelo conceptual que muestra el proceso de desestabilización estructural cuando el suelo se seca, y el proceso de recuperación estructural cuando se humedece (adaptado de Taboada *et al.* 1999).

¿Por qué se hinchan los suelos inundables pampeanos?

La expansión del volumen que se observa en los suelos inundables de la Pampa Deprimida no se relaciona con la presencia dominante de arcillas expansibles en forma dominante, tal como sucede en otros suelos del país. Este hinchamiento se relaciona con el entrapamiento de aire en los poros del suelo, por el avance de frentes de humedecimiento. En la Figura 22 se observa que, como resultado del ascenso freático, se incrementa el volumen de aire presente en los poros de los tres primeros horizontes del suelo.

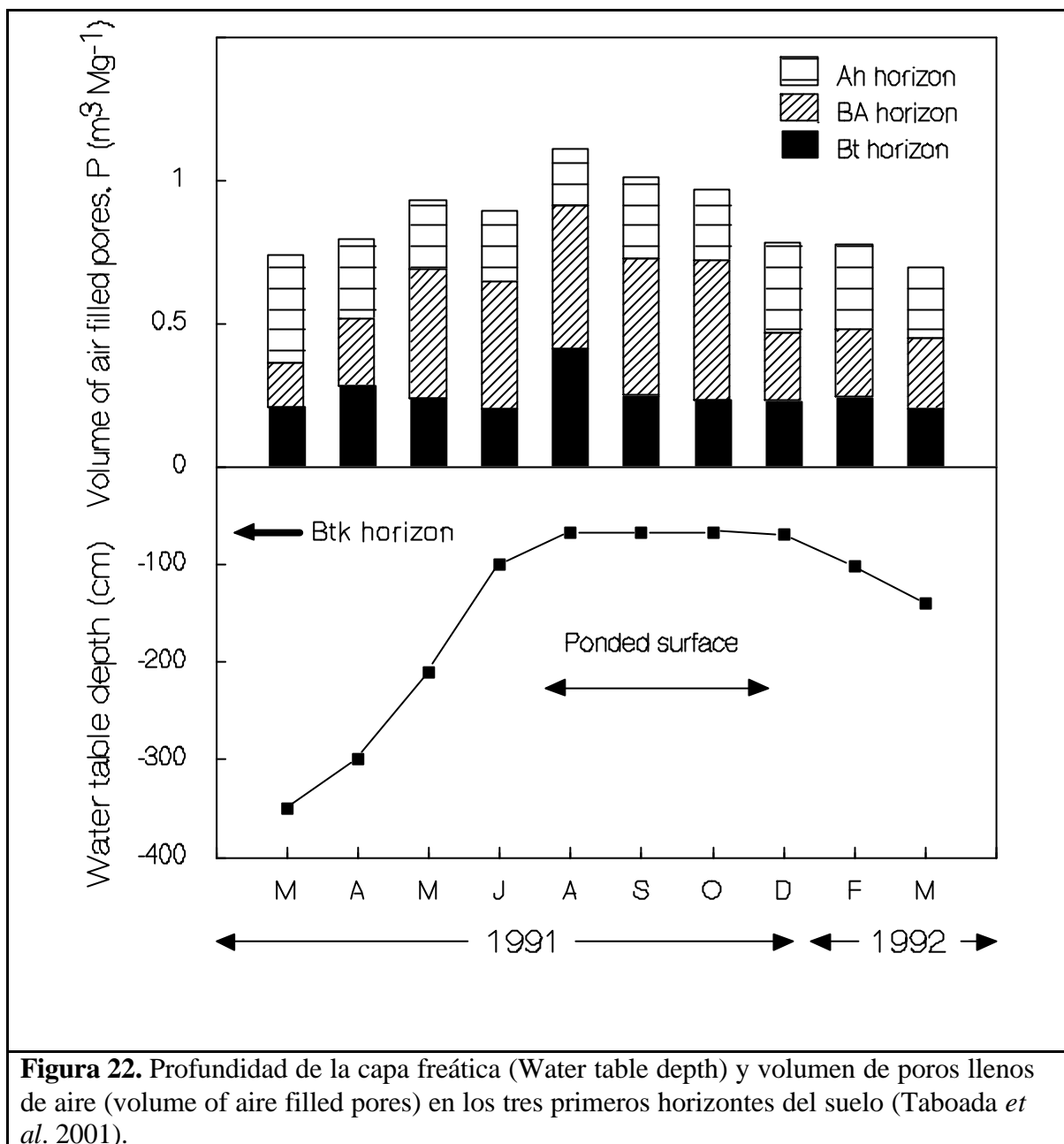


Figura 22. Profundidad de la capa freática (Water table depth) y volumen de poros llenos de aire (volume of aire filled pores) en los tres primeros horizontes del suelo (Taboada *et al.* 2001).

Este hinchamiento se trata en realidad de un proceso de “inflado” del espacio poroso por aire atrapado. Un modelo conceptual describe los cambios que tienen lugar en el perfil del suelo (Figura 23).

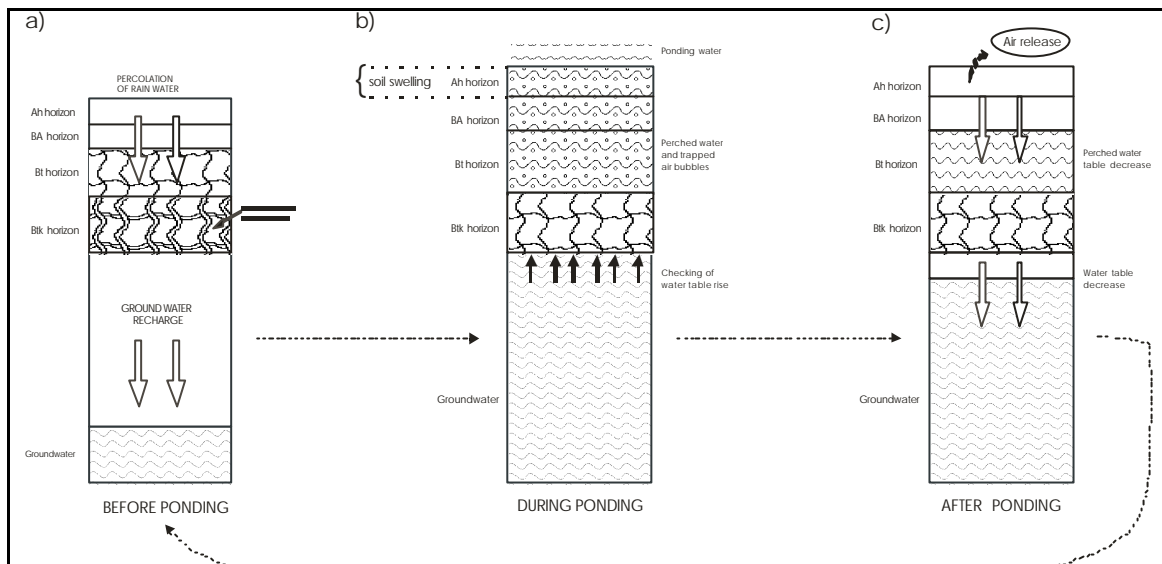


Figura 23. Modelo conceptual que describe el proceso de expansión volumétrica del suelo a causa del aire entrampado. a) antes de la inundación (before ponding): existen movimientos libres de agua y aire en todo el perfil (sistema bio-abierto); b) durante la inundación (during ponding): el hinchamiento del suelo por aire entrampado dentro de una napa colgante (perched water table) sobre un horizonte Btk impermeable (sistema de aire ocluido); c) después de la inundación (after ponding): contracción del suelo luego de los descensos en las profundidades de la napa colgante y de la capa freática, y un rápido escape de aire hacia la atmósfera (Taboada *et al.* 2001).

Cuando la capa freática se encuentra alejada de la superficie, como es usual al fin del verano, existe recarga libre del acuífero por agua de lluvia. Esta condición es representada por la Fig. 23 a. Durante otoño e invierno, la capa freática asciende cerca de la superficie del suelo, y alcanza el fondo del horizonte nátrico (Btk) impermeable. Este horizonte impide que la capa freática siga su ascenso hasta la superficie del suelo, según se describió previamente. El agua subterránea debajo de él se encuentra bajo presión. El volumen específico de poros llenos de aire hace un pico en el horizonte Bt, mostrando así el entrampamiento de aire delante del ascenso freático. De este modo, el aire dentro de los poros del suelo no puede escapar a la atmósfera y queda entrampado en ellos, y probablemente bajo presión. El exceso de agua en esta condición crea una capa de agua “colgante” sobre el horizonte Btk impermeable, lo cual da como resultado el encharcamiento y/o la inundación con agua de lluvia durante los meses invernales y parte de la primavera. Durante este encharcamiento, el aire se redistribuye hacia los horizontes BA y Ah del suelo. Las burbujas de aire, que están entrampadas entre la superficie inundada y la capa freática confinada bajo el horizonte Btk, no pueden escapar, lo cual causa el proceso de “inflado con aire”, según se representa en la Figura 23 b.

Tan pronto como el agua de encharcamiento y/o inundación desaparece en verano, el volumen de aire entrampado desaparece y retorna a la situación inicial. Ello se debe a la rápida disipación de la presión en los poros por el escape del aire a través del suelo. Esta situación es representada por los resultados de la Figura 23 c. Los resultados muestran que el ascenso de la capa freática desde la profundidad del suelo es una fuente mayor de entrampamiento de aire y de hinchamiento del suelo en la Pampa Deprimida.

La mejora de la estructura superficial del suelo durante la inundación aparece, de este modo, como una consecuencia del proceso de inflado del suelo. Estos resultados proveen un marco teórico que permite explicar el funcionamiento de la estructura de los suelos estacionalmente inundados.

V. Conclusiones e implicancias.

1. Existen razones de índole climática, geomorfológica y de tipo de suelos que contribuyen a la ocurrencia de inundaciones. Se verifica un corrimiento de las isohietas hacia el oeste, y además un cambio en la distribución estacional de las lluvias, particularmente en el sector más occidental de la región pampeana.
2. Estos cambios en el patrón de precipitaciones han tenido lugar en toda la región pampeana, pero sólo la Pampa Interior Arenosa y la Pampa Deprimida sufren inundaciones recurrentes. Ello se origina en la existencia en ambas de un paisaje que impide que el agua sea evacuada naturalmente hacia el mar. La geomorfología favorece el desarrollo de inundaciones estacionales en estas subregiones.
3. Los diferentes tipos de suelo, y en particular la existencia en ellos de horizontes poco permeables que limiten los movimientos del agua en el perfil, determinan también diferentes tipos de inundación. La presencia de horizontes nátricos es un elemento que lejos de perjudicar a los suelos, termina favoreciéndolos. Ello es así porque evita que las aguas subterráneas cargadas en sales alcancen la superficie, salinizándola. Donde existen suelos con horizonte nátrico profundo, las inundaciones son causadas por agua de lluvia.
4. Cuando la inundación es causada por agua salina, existen diferentes consecuencias en función del tipo de sal. Es importante entonces caracterizar la composición del agua inundante, particularmente en cuanto a sus contenidos relativos de cloruros y sulfatos, por un lado, y de bicarbonatos por el otro.
5. No existen evidencias de empobrecimiento de la fertilidad química de los suelos luego de las inundaciones. En cambio, nutrientes como el fósforo mejoran su disponibilidad para las plantas en el período con inundación.
6. El funcionamiento de la estructura de los suelos inundables se diferencia de lo conocido para suelos agrícolas. En estos suelos se percibe a los períodos con alta humedad edáfica como los más propensos a sufrir daño estructural por manejo. Todo lo contrario, en los suelos que se inundan con agua de lluvia los períodos de inundación se relacionan con la recuperación de daños previos, como los generados por el pisoteo animal. Esta resiliencia natural se asienta sobre el desarrollo de cambios de volumen por procesos de expansión-contracción.
7. El principal causante de la expansión volumétrica es el entrapamiento de aire en los poros del suelo. Este entrapamiento es causado por el ascenso de la capa freática, y su confinamiento contra el subsuelo arcilloso impermeable. El aire entrapado no puede burbujear y escapar a la atmósfera, pues sobre el horizonte impermeable mencionado se deposita una capa “colgante” de agua de lluvia, que en última instancia causa la inundación.
8. Se concluye, entonces, que lejos de ser perjudiciales, las inundaciones con agua no salina, o de lluvia, representan un evento natural de la dinámica de estos suelos. Debería

ser revisada entonces la generalizada consideración negativa acerca del fenómeno, probablemente basado en un conocimiento limitado del tema.

Referencias

- Hall, A. J., Rebella, C. M., Ghera, C. M., Culot, J. Ph., 1992. Field-crop systems of the Pampas. p. 413-450. In: C.J. Pearson (Ed.). *Ecosystems of the Worlds. Field Crop Ecosystems.*, Elsevier, Amsterdam.
- INTA, 1990. Atlas de suelos de la República Argentina. Tomo I y II. G.N. Moscatelli (ed.). SAGyP-INTA. Proyecto PNUD Argentina 85/019, Buenos Aires.
- Lavado R.S., Taboada M. A., 1987. Soil salinization as an effect of grazing in a native grassland soil. *Soil Use and Management* 3, 143 - 148.
- Rubio G., Lavado R.S., Rendina A, Bargiela M., Porcelli C.A., de Iorio, A.F., 1995. "Effect of water logging on organic phosphorus fractions in a toposequence of soils". *Wetlands* 15, 386-391.
- Rubio G., Oesterheld M., Alvarez C.R., Lavado R.S., 1997. Mechanisms for the increase in phosphorus uptake of waterlogged plants: soil phosphorus availability, root morphology and uptake kinetics. *Oecologia* 112, 150-155.
- Sala J. M., González N., Kruse E., 1983. Generalización hidrológica de la Provincia de Buenos Aires. p. 973 – 1009. En: M. C. Fuschini Mejía. *Hidrología de las Grandes Llanuras. Actas del Coloquio de Olavaria. UNESCO, Argentina.*
- Taboada M.A., Lavado R.S., 1993. Influence of trampling on soil porosity under alternate dry and ponded conditions. *Soil Use Management* 9, 139 - 143.
- Taboada, M. A., Lavado, R. S.; Svartz, H., Segat, A. M. L., 1999. Structural stability changes in a grazed grassland Natraquoll of the Flooding Pampa (Argentina). *Wetlands* 19, 50 – 55.
- Taboada, M. A., Lavado R. S., Rubio G., Cosentino D. J., 2001. Soil volumetric changes in natric soils caused by air entrapment following seasonal ponding and water table. *Geoderma* 101, 49 - 64.