

Capítulo 1

Propiedades, clasificación y distribución de horizontes endurecidos, con especial referencia a fragipanes

Properties, classification and distribution of hardened horizons, with special reference to fragipans

Jorge Eloy Giménez¹
jegimenez@igs.edu.ar^{*}

Perla Amanda Imbellone¹

María Liliana Mormeneo¹⁻²

** Autor de contacto.*

¹ Instituto de Geomorfología y Suelos. Facultad de Ciencias Naturales y Museo.
Universidad Nacional de La Plata.

² Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.

ÍNDICE CAPÍTULO 1

■ RESUMEN	3
■ EXTENDED ABSTRACT	4
■ INTRODUCCIÓN.....	7
■ PANES	9
Definiciones	9
Procesos que actúan en la formación de panes.....	10
Panes cementados	12
Panes con materiales volcánicos	13
Panes no cementados	14
Costras superficiales	19
Panes en la Argentina.....	20
■ FRAGIPANES	23
Antecedentes y definiciones	23
Factores de formación	24
Propiedades morfológicas	26
Propiedades físicas	30
Propiedades químicas	31
Génesis.....	32
Clasificación	37
Distribución de fragipanes	42
Aspectos aplicados.....	46
■ BIBLIOGRAFÍA.....	49

■ RESUMEN

Desde los inicios de la Ciencia del Suelo, y aún antes, se prestó atención a las capas u horizontes endurecidos o *panes*, por razones genéticas y por las dificultades que presentan para el crecimiento de las raíces, las labranzas, el movimiento vertical del agua y los usos ingenieriles, por lo cual son especialmente tenidos en cuenta en las clasificaciones taxonómicas y utilitarias de suelos. Los *panes* son capas del suelo con distintos grados de dureza y diferente génesis; poseen en general densidad elevada, muy baja conductividad hidráulica y difieren en ciertas propiedades físicas y químicas de los horizontes que se encuentran por encima o por debajo. Se pueden originar por cementación o por compactación natural o antrópica. Las cementaciones se originan por la unión de las partículas por sustancias ligantes tales como carbonato de calcio (calcreta, horizonte petrocálcico), yeso (gipcreta, horizonte petrogípsico), sílice (duripán), óxidos de Fe (ortstein, horizonte plácico, petroplintita), óxidos de Al (alcreta). Algunos autores incluyen en los cementantes a los minerales de arcilla amorfos o débilmente cristalizados en el caso de los fragipanes.

Compactación es un proceso por el cual las partículas del suelo se reordenan poniéndose en contacto más cercano entre ellas, lo que reduce los espacios vacíos y aumenta la densidad aparente, es decir que se produce una densificación. Los procesos de endurecimiento sin cementantes incluyen: 1) Acumulación intensa de arcilla (argipanes o *claypans*); 2) Autocompactación o *hardsetting*: proceso identificado en Australia, por el cual se origina una masa casi homogénea, dura y quebradiza al secarse siendo blanda en húmedo. 3) Hidroconsolidación: colapso de una capa de suelo por su propio peso en húmedo. 4) Coalescencia: degradación de la estructura por deformación plástica en húmedo y soldadura o fusión de los contactos entre agregados, cuando los esfuerzos de corte debido a fuerzas capilares exceden la resistencia al corte del suelo.

Un horizonte endurecido cuya génesis está discutida es el fragipán. Según la escuela norteamericana es un horizonte de diagnóstico subsuperficial denso, que posee estructura prismática muy gruesa o poliédrica con lenguas verticales de material grisáceo a lo largo de las caras de los agregados, y la matriz en el interior de los prismas posee consistencia firme o muy firme y quebradiza en húmedo, es decir que al ser presionados se quiebran súbitamente sin experimentar deformación plástica previa; los agregados se deslíen o fracturan al sumergirlos en agua; posee escasas raíces y sólo entre agregados y las texturas son más finas que arenosa fina, generalmente con menos del 35 % de arcilla. Si bien todos los fragipanes poseerían algunos rasgos comunes como consistencia dura en seco, quebradiza en húmedo y desleimiento en agua, diferirían en otras propiedades morfológicas, físicas y químicas por haber evolucionado en diferentes materiales originarios y posiciones en el paisaje tales como ambientes aluviales, coluviales, periglaciales, etc. Un ejemplo es la estructura laminar y lenticular encontrada en fragipanes de Europa y en la Región Pampeana de la Argentina. No hay acuerdo acerca de su génesis, sobre la cual se han establecido hipótesis físicas (hidroconsolidación, químicas (cementación por sílice, Fe, etc.) y fisico-químicas. Una de las razones de la falta de acuerdo es que podrían existir varios tipos de horizontes incluidos en el concepto de fragipan, cada uno con sus propios procesos de formación y propiedades.

Palabras clave

suelos, panes,
horizontes endurecidos,
fragipanes.

■ EXTENDED ABSTRACT

Since the inception of Soil Science, and even before, indurated layers or horizons, commonly named pans, were studied for their genetic implications and for the problems they posed for root growth, tillage, water movement and engineering applications. Pans are considered mechanical impedances and are important indicators in the evaluation of soil physical fertility. They are useful tools to identify paleosols, especially relict soils. The U.S. Soil Science Society distinguishes two types of pans: *genetic* and *pressure* or *induced*. Genetic pans are natural, subsurface soil layers with low or very low hydraulic conductivity and differing in certain physical and chemical properties from the soil immediately above or below. Pressure or induced pans are soil layers having a higher density and a lower total porosity than the soil directly above or below it, as a result of pressure applied by normal tillage operations or by other artificial means. Several pans (petrocalcic, petrogypsic and placic horizons, duripan, fragipan and ortstein) and contacts (densic, lithic, manufactured layer, paralithic and petroferic) are considered *root-limiting layers* in Soil Taxonomy (ST) to define the base of the control section for particle-size classes at family level in some soils.

Diverse processes are responsible for the formation of pans identified with general terms and with variable accuracy: *hardening*, *induration*, *densification*, *compaction*, *cementation* and *consolidation*. The more general terms are possibly *hardening* and *induration* defined as a decrease in volume of voids by collapse and compaction and by infilling of voids with fine earth, carbonates, silica and other materials. Hardening by cementation with diverse substances should be differentiated from compaction without those agents. In some pans, both processes can act or the participation of some of them is controversial, such as in fragipans. Compaction can be originated by natural or antropogenic causes, but cementation usually involves natural processes.

Some processes that denote the accumulation of different agents in the soil, and the names of the cemented pans that can form are: 1) *Silicification*: silcrete, duripan, petroduric horizon. 2) *Gypsification*: gypcrete, petrogypsic horizon. 3) *Salinization*: saltcrete, petrosalic horizon. 4) *Podzolization*: placic horizon, ortstein. 5) *Alitization*: alcrete. 6) *Hydromorphism*: petrogleyic qualifier indicating cementation by bog iron (WRB). Many reversibly or irreversibly indurated layers formed from volcanic materials are some times designated by local names: *tepetate* (Mexico), *sillar* (Peru), *ñadi* (Chile), *nigatsuchi* (Japan), etc.

Non-cemented pans include claypans, densipans and soils derived from hardsetting, hydroconsolidation and coalescence. *Claypans* are subsurface, dense, compact, slowly permeable layers, with clay contents much higher than the overlying material from which it is separated by an abrupt boundary. They are hard when dry and very plastic and sticky when wet. Argillic horizons are not necessarily claypans since no minimum contents of clay are required. *Densipans* are high-density, non-cemented pans which correspond to E horizons of some Podzols, according to the New Zealand classification. ST includes with a different sense the “densic materials” (relatively unaltered materials such as till, volcanic mudflows) and some mechanically compacted materials. The WRB system includes the qualifier “densic” for soils with natural or artificial compaction.

Hardsetting is a process first identified in Australia to describe soils that undergo structural breakdown on wetting and hardening without restructuring on drying. The process affects almost always the A horizon. Similar soils are found in Brazil, where they are known as “*solos coesos*” (cohesive soils). Both soils differ from the fragipans for being massive, they deform slowly when moist and are shallower. *Hydroconsolidation* involves the self-weight collapse of wet soils and may be one of the causes of fragipan brittleness. *Coalescence* involves the degradation of structure due to slow welding at contact points between aggregates and fragments in response to cycles of wetting and drying, especially in irrigated soils.

The most studied pans in Argentina are calcretes or petrocalcic horizons, locally known as “*tosca*”, which have a wide areal distribution. Indurated gypsiferous horizons have been described in Patagonia and

La Pampa province. Fragipans formed in different parent materials have been characterized in some provinces as indicated below. In recent times studies on stone lines in subtropical soils have begun. Claypans (usually Bt horizons) have been especially studied in the eastern Pampean Region, mainly due to their effect on crop yields. In some periurban areas these horizons outcrop when topsoil is removed for brick-making. As a consequence of climatic fluctuations in many areas of the Pampean Region, eluvial horizons were eroded and the Bt horizons, frequently considered claypans, were buried by recent materials where a mollic formed. Many of these soils have been classified as Thapto-argic Hapludolls, although this subgroup is not recognized by ST.

Fragipans were first described in USA in 1951 and are now a diagnostic subsurface horizon of ST (2014). They restrict the penetration of roots and water and their required characteristics are: 1) thickness of ≥ 15 cm; 2) evidences of pedogenesis; 3) very coarse prismatic, columnar or blocky structure of any grade or massive; 4) air-dry fragments from $>50\%$ of the layer slake when submerged in water; 5) firm or firmer rupture-resistance class, a brittle manner of failure at or near field capacity and virtually no roots and 6) no effervescence in dilute HCl. The degree of development of these properties is variable, resulting in a range of soils, from those having all the required characteristics, to soils in which they are less expressed, indicated as "fragic soil properties". Fragipans are found in many countries mainly in mid-latitudes, and have developed in many parent materials, especially loess and, in periglacial regions, low-lime till; also colluvial, alluvial, lacustrine and volcanic materials are found. Fragipans occur mainly under temperate or cool and humid climates, although some of them are found in tropical regions. Udic and aquic are the dominant moisture regimes in the USA. Fragipans are more common in formerly or presently forested areas, although in Argentina many are found in grasslands. Fragipans appear to be more expressed in lower topographic positions, mainly in imperfectly and poorly drained areas. They reach the steady state slowly and are relatively persistent as paleosols.

Horizons with fragipan character are indicated with the suffix "x" and commonly correspond to B (Bx), E (Ex) or transition horizons (Btx/E, BCx, etc.). They may be affected by clay illuviation (Btx), gleization (Bgx) or other processes. In the USA and Canada many fragipans are bisequal, with the fragipan in the lower sequum; Bt horizons with fragic characteristics buried by recent materials have been described in Argentina (A-AC-C-2Btxb-2BCxb). Fragipans form generally in loamy materials, e.g. silty loam in loess and sandy loam or loam in tills. Although in the USA prismatic is the more common structure, fragipans associated to old paleosols in Europe and Canada have platy and lenticular structures, which are also found in Argentina. Micromorphological features consistently observed are close-packing, interlocking of skeleton grains, sepic fabric, integrain bridging by clay or amorphous silica and clay coatings. Redoximorphic features including Fe-Mn nodules and mottles are common. In fragipans of Buenos Aires province, clay bridging between coarse grains (which would be the origin of brittleness) and clay coatings were observed. These soils also exhibit hydromorphism and, unlike most fragipans, calcification features. The relative position of the features in voids reveals that clay illuviation has preceded the two other processes.

Bulk density ranges usually between 1.6 and 2.0 Mg m⁻³; it tends to be lower (1.4-1.5 Mg m⁻³) in soils where the fragic character is less expressed and in eluvial fragipans (Ex). Hydraulic conductivity is low or very low (~ 0.2 -10 mm/hr) and it may be 100 times higher in the overlying horizons, which explains the presence of perched water tables. According to the WRB system, the fragic horizon should have a penetration resistance at field capacity of ≥ 4 MPa in $\geq 90\%$ of the volume. Fragipans do not have a specific chemical property that permits their identification. Only the absence of carbonates is required by ST and WRB. Other properties common to most fragipans are acidity and low contents of organic matter. Unlike most of these fragipans, many of horizons with fragic properties of Argentina are sodic and calcareous and in some cases are saline.

Despite the large amount of research, no general agreement has been reached to explain the genesis of fragipans. Different physical, chemical and physicochemical hypotheses have been proposed. Some of the *physical hypotheses* include: 1) *Lithological discontinuities and lithic/paralithic contacts*, which influence the movement of weathering products and their accumulation as a fragipan. 2) *Hydroconsolidation*, which involves the collapse of structure when a soil is loaded and wet (self-weight collapse). 3) *Relict periglacial features from permafrost*, such as platy, lenticular or prismatic structure and high bulk density, which coincide with the characteristics generated by ice segregation in the permafrost. The abrupt upper boundary and depth of fragipans correlate well with those of the permafrost, and ice segregation is greatest in the wettest positions where fragipans are best expressed. 4) *Glacial compaction and pedogenesis*: subsurface layers compacted due to a glacial mass are not considered fragipans because the compaction by overburden is geologic rather than pedogenic, but they are considered fragipans when density decreases below because the compaction would not be attributed to overburden. *Chemical hypotheses* include the participation of diverse components. Higher levels of amorphous Fe and Al compounds have been found in some fragipans with respect to overlying or underlying horizons. According to some authors, silica plays an important role as a cementing agent in fragipans; it may be released from weathering, mainly in acidic conditions, translocated and deposited in lower horizons where pH increases; the solutions may concentrate on lithological discontinuities and due to the influence of seasonal dessication and water absorption by trees which exclude silica. The *physicochemical hypothesis* involves the self-weight collapse of a wet soil with closely packing and bridging in the collapsed zone, creating a “proto-fragipan”; amorphous bonding agents may later precipitate and a fragipan becomes better expressed with further pedogenesis.

Although fragipans have common features (hard consistence when dry, brittleness when moist and water slaking) they differ in other morphological, physical and chemical properties since they develop under different formation factors and processes. Some authors postulate that different processes may give rise to a similar product: the fragipan; however, other researchers deem that the diversity of ideas on the genesis would be ascribable to the existence of several types of fragipans; this is implicitly recognized by the diverse names found in the literature, e.g.: *Ison* and *Fragon*, illuvial (Btx) and eluvial (Ex) fragipans, proto-fragipans, incipient fragipans, white fragipans (in volcanic materials), etc. ST partially recognizes this variety when differentiates “fragipans” from “fragic soil properties”. However, a new nomenclature that contemplates this diversity would be necessary in the future.

Fragipans are recognized at the great group level in four orders of ST (2014): Alfisols, Ultisols, Spodosols and Inceptisols; when a horizon meets only partially the requirements of the fragipan the system contemplates the diagnostic characteristic “fragic soil conditions” used at the subgroup level (fragic, fragiaquic). The WRB system (2015) includes the “fragic horizon” as a diagnostic horizon which is used as a principal or supplementary qualifier. The fragipans and soils with fragic properties have been described especially in the USA, and also in Canada, Brazil, Mexico, Europe, New Zealand, Iran and Thailand. In Argentina, the great groups Fragi- have been described in regional maps (INTA) in the provinces of Chaco, Córdoba, Salta, Catamarca and Buenos Aires, where they occupy 1480 km². The area would be larger if soils with horizons affected by the suffix “x” are added.

Keywords

soils, pans,
indurated horizons,
fragipans.

■ INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la Ciencia del Suelo, y aún antes, se prestó especial atención a las capas u horizontes endurecidos o *panes*, tanto por razones genéticas como por las dificultades que presentan para el crecimiento de las raíces, las labranzas, el movimiento vertical del agua y las excavaciones. Ya en la Antigüedad se reconocía las dificultades que presentaban los suelos compactos, como lo indica Virgilio (Mantua, 70-19 AC) en las Geórgicas, donde describe un método empírico para reconocer los suelos compactos: *“Si quieres saber si una tierra es suelta o consistente más de lo normal... ante todo escogerás a ojo un lugar y ordenarás abrir profundamente un hoyo de paredes firmes, luego lo rellenarás con la tierra que antes sacaste de él y la apisonas de modo que quede lisa. Si te falta tierra, es un suelo suelto y será propicio para el ganado y las nutricias vides; pero si se negara a volver a su lugar y la tierra supera los hoyos repletos, es un campo espeso; espera terrones desafiantes y gruesos surcos y abre esa tierra con enérgicos bueyes”* (Bauzá, 1989).

Las capas endurecidas o compactadas son indicadores importantes en la evaluación de la fertilidad física del suelo, la cual debe complementar el diagnóstico de la fertilidad química a fin de obtener un diagnóstico integral de la fertilidad edáfica, cuando se considera al suelo en su función de soporte y proveedor de agua y nutrientes para los cultivos (Taboada & Álvarez, 2008). Así, el sistema de la FAO (1985) incluye, para determinar la clase de aptitud de un suelo, las condiciones de enraizamiento mediante el factor de diagnóstico “profundidad efectiva”. Esta cualidad se expresa en forma más amplia como “condiciones para el desarrollo de un sistema radicular efectivo” e incluye entre las limitaciones a capas duras, roca, grava y capas tóxicas. Asimismo, las características físicas son decisivas al evaluar a un suelo en lo que respecta a sus funciones ingenieriles.

Desde el punto de vista genético, la presencia de panes ha sido contemplada en varios esquemas orientados a explicar la pedogénesis de algunos suelos. Los modelos evolutivos clásicos postulan que los suelos se desarrollan en forma unidireccional y continua desde un estado inicial de “no suelo” hasta un punto final teórico de estado estable o climax o de suelos maduros. Ello implica una profundización del suelo o una mayor diferenciación de horizontes (horizontación). Sin embargo, existen suelos cuya morfología refleja no precisamente organización y formación, sino adelgazamiento, desorden, mezcla, regresión y haplodización (Schaeztl & Anderson, 2005). Estos suelos y procesos, inicialmente subestimados, fueron progresivamente tenidos en cuenta, al igual que sus implicancias pedogénicas. Un ejemplo es el modelo integral de génesis de suelos de Johnson & Watson-Stegner (1987), Johnson *et al.* (1990) y Johnson & Hole (1994) basado en el concepto que los suelos evolucionan a través de dos vías o rutas (*pathways*) que actúan simultáneamente, una progresiva y otra regresiva, que alternan en importancia a lo largo la historia evolutiva de un suelo. Según este modelo, el ambiente pedogénico incluye todos los factores, procesos y condiciones -englobados en el término *vectores*- que afectan la pedogénesis y que pueden ser *exógenos* (extrínsecos) o *endógenos* (intrínsecos). Los primeros comprenden los cinco factores de formación, además de agentes específicos (incendios, vuelco de árboles, etc.). Los vectores endógenos evolucionan dentro del suelo y son más o menos independientes de los vectores exógenos; incluyen horizontes, estructuras, panes y otras transformaciones, como así también procesos de retroalimentación (*feedback*) regulados por estos vectores. Los vectores, tanto exógenos como endógenos, también pueden ser diferenciados en *dinámicos* y *pasivos*. Los primeros incluyen flujos de energía, flujos de agua, gases y sólidos, organismos, etc. Entre los pasivos se encuentran, entre otros, las denominadas “accesiones pedogénicas” (*pedogenic accessions*), también denominadas “ca-

racterísticas adquiridas”, que constituyen propiedades, rasgos y condiciones del suelo residuales, relictos y en formación. Como ejemplos se pueden citar revestimientos de arcilla, concreciones, pH y capas u horizontes endurecidos o densos (fragipanes, duripanes, plintita, horizontes petrocálcicos, petrogípsicos, plácicos o argílicos, etc.). Algunas accesiones pueden desarrollarse a tal punto que afectan la evolución de un suelo y promueven según Torrent & Nettleton (1978) las “retroalimentaciones pedogénicas” (*pedogenic feedbacks*). Es el caso de los panes (por ejemplo: Bkm, Bgm, Bt) en que un perfil profundo se puede transformar en uno somero, cambiando la dirección de los flujos internos, de vertical a lateral, o formando capas colgadas y ciclos de oxidación y reducción en los horizontes superiores. Las retroalimentaciones ocurren al superar determinados “umbrales” (*thresholds*), concepto que es útil para explicar esta situación. Según Muhs (1984) un *umbral pedológico* es el límite de la estabilidad de un suelo que se excede, ya sea por cambios *intrínsecos* en sus propiedades morfológicas, químicas o mineralógicas o por cambios sutiles pero progresivos en alguno de los factores de formación *externos* (clima, relieve, organismos). Los umbrales intrínsecos explican la inestabilidad del suelo en ausencia de cambios ambientales.

Targulian & Krasilnikov (2007) estiman que un suelo alcanza el estado estable sólo cuando todos los procesos, incluidos los más lentos, dejan de actuar o se hallan en equilibrio dinámico con el ambiente externo. Asimismo, proponen un agrupamiento teórico de los procesos pedogenéticos específicos de acuerdo a su esencia, entre ellos mencionan los “procesos auto-inhibitorios” (*self-inhibiting processes*) los cuales crean condiciones que impiden el desarrollo ulterior del suelo, como por ejemplo la plintización en que se origina una capa impermeable. Asimismo, estos autores enfocan estas situaciones desde el punto de vista ecológico al utilizar los conceptos de “confort” para los organismos y de fertilidad para las plantas. Los autores mencionan que el desarrollo evolutivo de los suelos no siempre conduce a condiciones más favorables y mencionan los procesos de salinización, acidificación, formación de horizontes endurecidos (duripán, calcretas, etc.), etc. En este sentido, los autores mencionan que de la totalidad de horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico del sistema WRB (IUSS Working Group WRB, 2015), sólo el 32 % son ecológicamente favorables para la biota, aunque admiten que algunos de ellos tienen un comportamiento dual.

Desde un enfoque paleopedogenético, Yaalon (1971) establece un modelo de dinámica del suelo según el cual existen tres grupos de procesos y de propiedades derivadas: 1) procesos autorregulados y reversibles que alcanzan el equilibrio en escaso tiempo ($<10^2 - 10^3$ años), ej. formación de un horizonte mólico, sálico, cámbico; 2) procesos y propiedades en estado de cuasi-equilibrio o metaestabilidad en que las reacciones del suelo se aproximan al estado estable muy lentamente, ej. formación de horizontes argílicos ($10^3 - 10^4$ años) y 3) procesos y propiedades irreversibles y auto-terminales (*self-terminating*) que originan una modificación del ambiente interno del suelo por desarrollo de capas poco permeables que reducen el movimiento de fluidos, ej. en regiones cálidas, alteración intensa de minerales y acumulación de elementos menos móviles con formación de horizontes óxicos o en ambientes áridos y semiáridos desarrollo gradual de cementaciones (calcretas, silcretas, etc.) que persisten largo tiempo. Las propiedades del grupo 1, que se ajustan rápidamente a los factores ambientales, no son indicadoras adecuadas de condiciones paleopedogénicas, las que sí pueden diagnosticarse a través de los procesos y propiedades del grupo 2 por su relativa resistencia al cambio, aunque por su mayor persistencia, son aún más útiles los de grupo 3 que constituyen excelentes marcadores y criterios para esa función por su mayor persistencia. En esto coinciden más recientemente Wysocki *et al.* (1999), quienes señalan que los horizontes endurecidos son muy útiles para reconocer paleosuelos, en especial los suelos relic-

tos. Dan como ejemplo los panes cementados por sílice (duripanes) que se forman en climas áridos o semiáridos, los cuales resisten a la desintegración aún en clima húmedo.

■ PANES

Definiciones

Los *panes* son capas de suelos con distintos grados de dureza y diferente génesis; poseen en general densidad elevada, muy baja conductividad hidráulica y difieren en ciertas propiedades físicas y químicas de los horizontes que se encuentran por encima o por debajo. Las causas del endurecimiento son diversas: a) por procesos naturales físicos, como hidroconsolidación, criogénesis, o cementaciones químicas por óxidos, carbonatos, sílice, etc. b) por acciones antrópicas como labranzas, pisoteo de ganado, tránsito de vehículos, etc.

La definición de pan es de carácter genérico y se refiere al comportamiento del material de la zona endurecida en relación con las propiedades físicas y químicas del suelo, especialmente por su influencia en el uso y manejo. Estos panes forman parte de lo que en física de suelos se denominan *impedancias mecánicas*, definidas por Taboada *et al.* (2008) como capas con elevada resistencia mecánica y/o densidad aparente que pueden afectar negativamente y/o impedir el crecimiento de los cultivos debido a efectos directos (menor desarrollo de raíces) o indirectos (menor aireación).

El término *pan* es de origen inglés y su uso se ha extendido al castellano y otros idiomas. El Manual de Levantamientos de Suelos de los Estados Unidos (Soil Survey Staff, 1951) define a los panes como “horizontes o capas del suelo fuertemente compactados, endurecidos o con muy alto contenido de arcilla”. Los panes pueden haberse formado por procesos pedogenéticos y de meteorización actuales o ser relictos de procesos del pasado. Winters & Simonson (1951) los diferencian en tres tipos generales: a) de acumulación de arcilla (*claypans*); b) compactados o sin cementación definida (*fragipanes*) y c) con cementación definida (*hardpans*); estos últimos comprenden: *ortstein*, costras lateríticas, panes de hierro-sílice y panes calcáreos (*caliche*). Estas definiciones, que excluyen los panes generados por acción antrópica, han sido posteriormente modificadas.

El glosario de la *Soil Science Society of America*, SSSA (2001) diferencia *panes genéticos* (“*genetic pans*”) y *panes inducidos o de presión* (“*induced pans*”, “*pressure pans*”). Los primeros son capas subsuperficiales naturales que poseen baja o muy baja conductividad hidráulica y difieren en varias propiedades físicas y químicas del suelo situado por encima y por debajo; ejemplos de dichos panes son los horizontes petrocálcicos (tosca, caliche), fragipanes, duripanes y panes de arcilla (argipanes o *claypans*). También son panes genéticos los horizontes petrogípsicos y petrosálicos, petroplintita, horizontes plácicos y *ortstein*. Los panes inducidos o de presión son capas u horizontes subsuperficiales con mayor densidad aparente y menor porosidad total que el suelo supra- o subyacente, que se originan por la presión ejercida durante las prácticas de labranza o por otros medios artificiales (piso de arado, panes de tránsito, etc.).

Teruggi (1984) define a *pan* como “capa, costra u horizonte compactado o endurecido en un perfil de suelo, en especial los arcillosos. Se lo utiliza más comúnmente como sufijo (*hardpan*, *duripán*, *fragipán*, etc.)”. Otros autores utilizan el término “pan” para referirse en forma abreviada a fragipanes, por ejemplo: Wang *et al.* (1974), Certini *et al.* (2007) y Szymański *et al.* (2012). Raeside (1964) discute los alcances del término “pan”

al referirse a depósitos de loess compactos de Nueva Zelanda; considera que el mismo es impreciso, siendo más adecuadas para este caso las denominaciones “*hard pan*” o, aún con mayor precisión, “*fossil pan*” o “*loess pan*”. Según este autor el término “*hard pan*” (o “*hardpan*”) se usa en muchos países, tanto en la forma original en inglés o sus equivalentes en otros idiomas, por ejemplo: en alemán *Verdichtungshorizont* (horizonte densificado) o en francés *horizon endurci* u *horizon compactifié* (horizonte endurecido o compactado). El término “*hardpan*” fue originariamente utilizado en EE.UU. para designar a las capas cementadas por sílice iluvial, posteriormente denominadas “*duripán*” siguiendo la terminología australiana (Smith, 1986). El *duripán* es un horizonte de diagnóstico de Taxonomía de Suelos (TS) y equivale en el sistema WRB al *horizonte petrodúrico* y en la clasificación francesa (Référentiel Pédologique, RP; AFES, 2008) al *horizonte petrosilíceo* (*horizon pétrosilicique*). Otros términos utilizados sin connotación taxonómica son *silcreta* o *silcreto*.

El Glosario de la SSSA (2001) define a “*hardpan*” como “capa de suelo con características físicas que limitan la penetración de las raíces y restringen el movimiento del agua”. Según Teruggi (1984), el término es de uso internacional y lo considera un nombre genérico para cualquier tipo de *duricostra*, ya sea *calcreto* o *calcreta*, *ferricreto* o *ferricreta*, *fragipán*, *argilopán*, etc. Para restringir el significado de *hardpan* en EE.UU. se lo adjetivaba con el agente cementante, por ejemplo “*silica hardpan*” (*hardpan* de sílice), término que originariamente hacía referencia, entre otros, a los fragipanes.

McIntosh & Kemp (1991) usan el término *horizontes consolidados* en la caracterización de Hapludalfes, Distrocreptes y Fragiocreptes de Nueva Zelanda. Estos nombres, provenientes tanto de la literatura sedimentológica como pedológica, poseen identificación en la nomenclatura de los suelos afectando a cualquier horizonte con los subíndices específicos.

El sistema Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2014) utiliza el concepto de “capas restrictivas para las raíces” (*root-limiting layers*) para definir en muchos suelos la base de la sección de control para las clases por tamaño de partículas a nivel de familia. Se consideran capas restrictivas los siguientes horizontes: petrocálcico, petrogípsico, *duripán*, *fragipán*, plácico y *ortstein* continuo (≥ 90 % cementado y con continuidad lateral); los contactos dénsico, lítico, paralítico y petroférico y las capas artificiales. Las capas restrictivas para las raíces también se usan a nivel de familia para definir *clases por profundidad*; se aplica a la clase “somera” (*shallow*) cuando hay alguna capa por encima de los 100 cm en Oxisoles o de 50 cm en otros suelos. No se aplica a los subgrupos *líticos*.

Existe una extensión del término *pan* en Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1999) cuando se refiere, en el capítulo sobre regímenes de temperatura del suelo, a una capa cuya temperatura es ≤ 5 °C, denominada “*pan térmico*” (*thermal pan*) debido a que en ella el crecimiento de las raíces de la mayoría de las plantas es prácticamente imposible.

Procesos que actúan en la formación de panes

Se mencionan diversos procesos causantes de los distintos panes, designados con términos generales que se aplican con precisión variable, entre ellos: endurecimiento, densificación, compactación, cementación y consolidación. Tal vez el término más amplio es *endurecimiento* (“*hardening*”) definido por Buol *et al.* (1989) como “disminución del volumen de vacíos por colapso y compactación, y por rellenamiento de algunos vacíos con tierra fina, carbonatos, sílice y otros materiales”; lo contrapone al proceso de *mullimiento* (“*loosening*”), que implica un aumento de volumen de poros por diversas causas (raíces, organismos, disolución, etc.).

El término densificación parecería también ser aplicado a todo tipo de panes. Por ello, el *endurecimiento* y la *densificación* generalmente están correlacionados, ya que a un aumento de la resistencia mecánica se corresponde generalmente con incrementos en la densidad aparente, como encuentran Schmidt & Amioti (2015) en ensayos con labranza reducida en la Región Pampeana semiárida sur. Pero ello no siempre ocurre, como señalan estas autoras en algunos ensayos con siembra directa en que no detectan correlación significativa entre ambos parámetros. Esta situación ha sido observada también por otros autores en la Región Pampeana húmeda (Taboada *et al.*, 1998; Díaz Zorita *et al.*, 2002) y sería atribuible a una reorganización de las arcillas seguida por endurecimiento según Utomo & Dexter (1981).


Para definir los procesos actuantes en la formación de panes endurecidos se debe diferenciar los originados por: 1) cementación de diversas sustancias, generalmente con endurecimiento irreversible, o 2) compactación, cuando dichos agentes están ausentes y el endurecimiento es reversible, es decir que son duros en seco y en húmedo se pueden romper súbitamente al presionarlos (son quebradizos) o bien se pueden ablandar (son deformables). En algunos panes pueden intervenir ambos procesos o la participación de uno u otro no es clara, como por ejemplo, en los fragipanes. Las cementaciones se deben en general a causas naturales, mientras que los procesos de compactación se pueden originar por causas naturales y antrópicas. **Tabla 1** .

Tabla 1: Tipos de endurecimiento y los correspondientes horizontes o capas y agentes cementantes.

Table 1: Types of induration and the corresponding horizons or layers and cementing agents.

Origen	Tipo de endurecimiento		Nombre	Agente	Horiz.
Natural (genético)	Endurecimiento irreversible. (Panes cementados)		H. Petrocálcico, calcreta, tosca, caliche.	CaCO ₃	Bkkm,Ckm
			H. Petrogípsico, gipcreta.	Yeso	Byym,Cym
			H. Petrosálico (propuesto para clima hiperárido).	Sales más solubles que el yeso	Bzm,Czm
			Duripán, silcreta	Sílice	Bqm
			H. plácico	Fe, MO	Bhsm
			Ortstein	Fe, MO, Al	Bhsm
			H. Petroplintico (WRB), petroplintita, ferricreta.	Fe	Bvm
			H. Pisoplíntico (WRB)	Fe (Mn)	Bvm
			Alcreta	Al	
			Horizontes volcánicos endurecidos (tepetate, sillar, ñadis, masa, etc.)	Tobas, sílice, Fe, etc.	
	Endurecimiento reversible	Quebradizo en húmedo	Fragipán	Variables (físicos y/o químicos y/o mineralógicos)	Bx, Ex, Cx.
			H. autoestructurado (Hardsetting h).	-	
			Suelo cohesivo (Solo coeso, Brasil)	-	
			Suelo coalescente	-	
			Densipán (Nueva Zelanda)	-	Ex
		No quebradizo en húmedo (deformable)	Pan de arcilla (argipán o claypan)	Arcilla	Bt
Antrópico o inducido	Piso de arado (densificación subsuperficial)			-	Ad
	Materiales densesos (Pueden ser materiales naturales: till, mat. volcánicos, etc.)			-	
	Pan de tránsito (traffic pan, pressure pan)			-	Ad
	Material duro técnico (WRB)			Hormigón, asfalto, etc.	Cu

Panes cementados

La cementación se puede considerar un proceso general natural que se origina por unión de las partículas por sustancias cementantes, entre ellas humus, carbonato de calcio, yeso, sílice u óxidos de Fe o Al. Algunos autores, por ejemplo Veneman & Lindbo (1986), incluyen en los cementantes a los minerales de arcilla amorfos o débilmente cristalizados en el caso de los fragipanes.

Las capas resultantes de esta cementación se suelen denominar *duricostras* en sentido general. Se las ha definido como costras geoquímicas cercanas a la superficie, de dureza y espesor variables, formadas por procesos fisicoquímicos desarrollados dentro de la zona de meteorización. Se han originado por acumulación absoluta o relativa de minerales por reemplazo y/o cementación en suelos, sedimentos, mantos rocosos o materiales meteorizados. Las duricostras de mayor difusión areal son las cementadas por carbonato de calcio (calcretas) que ocuparían alrededor del 13 % de la superficie terrestre. Le siguen en abundancia las duricostras ricas en hierro y aluminio (ferricretas, alcretas), distribuidas especialmente en África, Australia y la India. Las duricostras cementadas por sílice (silcretas) tienen menor difusión, aunque son localmente importantes (sur de África, Australia, Europa). Otras acumulaciones calificadas como duricostras son las producidas por yeso (gipcretas), que no suelen persistir en el paisaje. En cambio, las duricostras más duras (por ej. ferricretas, silcretas) suelen actuar como controles en la evolución de los paisajes cuando quedan expuestas ya que pueden formar rocas de cobertura resistentes (Goudie, 1973; Wright & Tucker 1991; Nash, 2009). En Australia consideran que es difícil determinar si los panes cementados (calcretas, silcretas, ferricretas, etc.) son horizontes de suelo o materiales del sustrato, por lo cual no se los identifica como horizontes B sino como rasgos de diagnóstico del sustrato. (Isbell & Nat. Comm. on Soil and Terrain, 2016).

Existen pocos términos que definen específicamente a los procesos específicos que indican cementación, entre ellos *calcretización*, y *plintización*.

- *Calcificación*. Acumulación de carbonatos de Ca y Mg pedogénicos que, a partir de determinados niveles de obturación, origina *calcretas* y para el proceso de su formación existe el término *calcretización*. En algunas clasificaciones estas capas han recibido denominaciones específicas: *horizontes petrocálcicos* (TS, WRB), *horizons pétrocalcaires* (RP); también reciben nombres vernáculos tales como: *tosca*, *caliche*, *croûtes calcaires*, etc. Existen también *dolocostras* (*dolocrusts*) en las que el principal mineral cementante es la dolomita.
- *Lateritización o plintización*. Proceso desarrollado en regiones cálidas y húmedas con una meteorización profunda de la mayoría de los minerales, originando principalmente óxidos de Fe y Al. Su acumulación no es de tipo residual, como ocurre durante la *latosolización*, sino por movilización y concentración en determinados sectores del perfil en que se genera *laterita* o *plintita*. Este material es relativamente blando en húmedo, pero si por erosión queda expuesto a ciclos repetidos de humectación y desecamiento se endurece irreversiblemente (proceso de *cuirassement* según la escuela francesa). Esta característica hace que en algunos países el material sea extraído, cortado y expuesto a la acción del sol y el aire para fabricar ladrillos (los términos laterita y plintita derivan del latín *later* y del griego πλίνθος, *plinthos*: ladrillo). Las capas endurecidas reciben diversos nombres: *ferricretas*, *duricostras ferruginosas*, *cuirasses de fer*, etc. Taxonómicamente se denominan *horizontes petroplínticos* o *pisoplínticos* (WRB), *ironstones* (TS), *horizons pétroxydiques* (RP), *petroplintita*, *horizonte litoplíntico* (Sistema Brasileño).

Más comúnmente existen términos referidos a procesos de acumulación de distintas sustancias, que pueden conducir o no a la cementación, por ejemplo:.

- *Alitización*. Proceso desarrollado en condiciones extremas de meteorización por altas temperaturas y precipitaciones, con pérdida prácticamente completa de sílice y álcalis y acumulación residual de hidróxido de aluminio (gibbsita). El término *alcreta* designa costras cementadas principalmente por compuestos de Al.
- *Silicificación*. Acumulación de sílice secundaria neoformada o iluviada, que puede conducir a la formación de *silcretas* (TS: *duripanes*, WRB: *horizontes petrodúricos*; RP: *horizons pétrosiliciques*). En Australia se han identificado bajo clima árido panes cementados que constituirían una variedad de duripan, conocidos como “*red-brown hardpans*”. Son muy duros, densos, aunque de aspecto poroso, poseen estructura laminar irregular y algunas grietas verticales; el espesor varía de 0,3 a 30 m e incluye vetas de manganeso, lentes de arena y grava y más raramente vetas de carbonato de calcio (Isbell & Nat.Comm. on Soil and Terrain, 2016).
- *Gipsificación*. Acumulación de yeso secundario ya sea neoformado o traslocado en un horizonte. En algunos casos puede conducir a la formación de horizontes cementados subsuperficiales, menos comúnmente superficiales, denominados *gipcretas* (*horizontes petrogípsicos*, TS, WRB).
- *Salinización* Acumulación de sales solubles. El sistema WRB contempla el calificador *petrosálico* para aplicar a suelos que tienen capas cementadas por sales más solubles que el yeso, denominadas a veces *salcretas* y encontradas bajo clima árido.
- *Podzolización*. Origina en algunos horizontes espódicos bien desarrollados panes cementados por sesquióxidos de Fe y Al iluviales, pueden incluir materia orgánica y manganeso, denominados *horizontes plácicos* (TS) o *placón* (FitzPatrick, 1980) cuando son delgados (1-25 mm) u *ortstein* (TS) cuando son más espesos (>25 mm). El sistema WRB reconoce los calificativos *placic* y *orsteinic* que se aplican a Podzols que poseen algunos de los respectivos horizontes.
- *Hidromorfismo*. El sistema WRB incluye el calificativo suplementario *petrogleyic*, aplicable a Histosols y Gleysols que poseen dentro de los primeros 100 cm una capa ≥ 10 cm de espesor con moteados y que en ≥ 15 % (en volumen) está cementada por hierro de pantano (*bog iron*).

Panes con materiales volcánicos

Existen diversos suelos con capas u horizontes endurecidos formados a partir de materiales volcánicos; algunos de los cuales reciben nombres locales tales como *tepetate* (México), *talpetate* (Nicaragua), *cangahua* (Ecuador), *sillar* (Perú), *ñadis* (Chile), *nigatsuchi*, *kora* o *masa* (Japón), etc. En algunos casos heredaron sus cementantes y endurecimiento de procesos geológicos volcánico-sedimentarios; procesos pedogenéticos posteriores pueden haber consolidado los materiales por deposición de arcilla, sílice, hierro o carbonatos. En otros casos, la pedogénesis ha sido la principal responsable del endurecimiento por procesos de silicificación, encostramiento calcáreo o ferruginoso, etc. Así, algunos de estos suelos pueden incluir horizontes con endurecimiento irreversible que califican como duripanes, horizontes petrocálcicos, petrogípsicos o plácicos; un ejemplo de estos últimos son los *fierrillos*, capas de pocos centímetros cementadas por Fe que se encuentran en algunos suelos *ñadis* de Chile (Andisoles). También pueden haberse generado horizontes con endurecimiento reversible como los fragipanes

debido a argilización o silicificación moderada (Quantin, 1994). En el caso de los *tepetates* de México los horizontes endurecidos sin carbonatos, o en escasa cantidad, tienen comportamiento de fragipanes. Sin embargo, cuando estos horizontes afloran por erosión de los horizontes suprayacentes, el endurecimiento se torna irreversible, generalmente por enriquecimiento en sílice resultante de una evolución pedogenética y climática (Dubroeuq & Thiry, 1994). En algunos casos se menciona la acreción calcárea contribuyendo al endurecimiento (Federoff *et al.*, 1994). Comportamiento parecido se produce en los suelos *cangahua* de Ecuador y los *nigatsuchi* de Japón. Aliphath Fernández & Werner (1994) señalan que en el Altiplano Central de México la colonización europea favoreció la aparición de estas capas al provocar el abandono de prácticas agrícolas sustentables ejecutadas por los pueblos originarios; ello desencadenó procesos de erosión que, si bien existían en la época prehispánica, luego se aceleraron originando amplias superficies degradadas.

Panes no cementados

El término compactación (*compaction*) es definido en el Glosario de la SSSA (2001) como un proceso por el cual las partículas del suelo se reordenan poniéndose en contacto más cercano entre ellas, lo que reduce los espacios vacíos y aumenta la densidad aparente, es decir que se produce una densificación. Gliński & Lipiec (1990) definen a la compactación como un aumento en la densidad y un empaquetamiento más denso de las partículas sólidas o una reducción de la porosidad. Puede ocurrir por causas naturales como sobrecarga, impacto de la lluvia, saturación con agua y tensión hídrica interna. La compactación artificial se produce sobre todo por el paso de maquinaria o ganado y puede ser superficial, como suele producirse bajo siembra directa, o bien subsuperficial, cuando ocurre inmediatamente debajo de la profundidad de labranza (piso de arado). Pueden desarrollarse desde superficie hasta una profundidad variable (a veces hasta ~50 cm) dependiendo del tipo y humedad del suelo, peso, velocidad y número de pasadas de la maquinaria, etc. (Ver compactaciones antrópicas, este libro). La compactación es considerada por van den Akker & Soane (2005) un tipo de degradación física del suelo que origina una disminución de la actividad biológica y de la productividad. Es un proceso de densificación y distorsión que reduce la porosidad y permeabilidad, aumenta la resistencia mecánica, se destruye parcialmente la estructura y se inducen numerosos cambios en la fábrica del suelo y en varias características.

Estos suelos comprenden: panes de arcilla, densipanes, suelos autocompactados (*hardsetting soils*), suelos coesos, hidroconsolidación y coalescencia.

Panes de arcilla o argipanes (*claypans*) Se caracterizan por sus contenidos elevados de arcilla, aunque no está bien definido el alcance del término ya que no existen parámetros estrictos para su identificación, como ocurre con los horizontes de diagnóstico de TS o WRB. Una definición del Glosario de la SSSA (2001) lo define como “capa del subsuelo densa, compacta, de permeabilidad lenta que posee contenidos mucho más elevados de arcilla que el material suprayacente, del cual está separada por un límite neto. Es generalmente dura en seco y plástica y adhesiva en mojado”. La arcilla es propia del material original, a la que se puede sumar en algunos casos la arcilla iluvial y la neoformada.

Según Hillel (1998) un *claypan* es una capa subsuperficial con alto contenido de arcilla, compacta y restrictiva, que tiende a ser plástica y relativamente impermeable al agua y el aire. Según este autor, un alto contenido de arcilla no origina necesariamente un *claypan* ya que mucho depende de la estructura;

si ésta está bien desarrollada y con gran cantidad de poros interconectados que permitan el pasaje de los fluidos no se estaría en presencia de un *claypan*, pero si lo sería cuando la estructuración es débil, a veces con arcilla en estado disperso. También en estos casos se puede estar en presencia de capas masivas. La fragmentación mecánica por labranzas en estos suelos puede producir mejoramientos temporarios, pero las condiciones originales tienden a regenerarse espontáneamente.

Cuando existe una cantidad apreciable de arcilla iluvial, los argipanes corresponden en TS al horizonte de diagnóstico argílico (o nátrico), formado por el proceso de argiluvación o ilimerización. Antes de TS, los horizontes de acumulación de arcilla iluvial se denominaban “B texturales”, término que aún se utiliza. En el sistema WRB el horizonte equivalente se denomina *árgico*. Sin embargo, tiene diferente concepto ya que, además de la acumulación iluvial de arcilla, la diferenciación textural se puede originar también por: a) neoformación de arcilla, b) destrucción o erosión superficial selectiva de arcilla en el horizonte superficial, c) movimiento ascendente de partículas más gruesas debido a expansión y contracción, d) actividad biológica y e) una combinación de dos o más de estos procesos.

El horizonte argílico no constituye necesariamente un pan de arcilla, como señalan Taboada *et al.* (2008), ya que aquél es un término taxonómico que hace referencia a una acumulación iluvial de arcillas filosilicatadas, además de requerimientos de espesor y presencia de rasgos de iluviación. No hay una exigencia de contenidos mínimos de arcilla sino un determinado incremento de esta fracción respecto al horizonte eluvial suprayacente, incremento que varía según la textura del sector eluvial. En sus conversaciones sobre la Taxonomía de Suelos, Guy Smith (1986) explica que los incrementos de arcilla fueron elegidos por ser los mínimos detectables mediante la textura al tacto en el campo: 3 y 8 % (valores absolutos) para texturas gruesas (<15% arcilla en el horizonte eluvial) y finas (>40%), respectivamente, y 20 % (relativo) para texturas intermedias. Así, un horizonte de textura gruesa puede ser argílico; por ejemplo: si el horizonte eluvial tiene 10 % de arcilla, el horizonte iluvial puede ser argílico con sólo 13 % de esa fracción. En la sección “Panes en la Argentina” se dan ejemplos de horizontes argílicos contrastantes de la Región Pampeana.

La relación de arcilla entre horizontes B y eluviales es denominada “relación arcilla” y utilizada por Mosconi *et al.* (1981) para detectar si un horizonte B es *textural* y el grado de “texturalidad” mediante la siguiente escala: <1,2 no textural, 1,2-1,4 levemente textural, 1,4-1,6 moderadamente textural, 1,6-2,0 fuertemente textural y >2,0 muy fuertemente textural. Según estos autores se considera pan de arcilla (*claypan*) a los horizontes de las dos últimas categorías y cuando el límite superior es abrupto y el inferior claro o abrupto. Según Taboada *et al.* (2008) un horizonte B se considera textural cuando tiene por lo menos 20 % más de arcilla que el horizonte eluvial suprayacente.

En la clasificación de EE.UU. de 1938 (Baldwin *et al.*, 1938) los *claypans* eran característicos de un tipo de Planosoles (*claypan Planosols*), diferenciado de otros Planosoles que poseían capas endurecidas (*fragipan Planosols* y *duripan Planosols*) (Smith, 1986). De *Planosol*, término usado actualmente en la clasificación WRB y otros sistemas, deriva *planosolización*, que alude a un proceso de argiluvación acentuado desarrollado generalmente en condiciones de drenaje deficiente, con formación de un horizonte E y cambio textural abrupto con el horizonte B subyacente.

El sistema TS no prevé la existencia de taxones con *claypans*. Contempla en cambio una característica de diagnóstico: el “cambio textural abrupto” que consiste en un aumento considerable de arcilla en corta distancia ($\leq 7,5$ cm) entre los horizontes eluviales y un horizonte subyacente rico en arcilla. En

estos casos algunos horizontes B pueden tener altos contenidos de arcilla, ya que esta fracción debe duplicarse o aumentar en un 20% (valor absoluto), según el material sobreyacente tenga $<20\%$ o $\geq 20\%$ de arcilla, respectivamente. Este sistema también contempla a nivel de gran grupo la presencia de horizontes argílicos muy desarrollados, que han evolucionado en superficies estables a través de largo tiempo. Por ello, utiliza el prefijo *pale-* (del griego *παλαιός* -*palaiós*- viejo, antiguo) que se antepone a subórdenes de Alfisoles, Aridisoles, Molisoles y Ultisoles (*Paleustalfes*, *Paleargides*, *Paleudoles*, *Palexerultes*, etc.). La propiedad exigida en la mayoría de los casos se refiere al contenido de arcilla, que debe disminuir $<20\%$ (valor relativo) respecto al contenido máximo dentro de los primeros 150 cm. En varios taxones se exige además matices 7,5YR o más rojos. En *Paleustalfes*, *Palexeralfes*, *Paleustoles* y *Palexerroles* la presencia del horizonte petrocálcico exime del requerimiento relacionado con la arcilla. (por ej.: *Paleustalfes* o *Paleustoles* petrocálcicos).

El Sistema Brasileño de Clasificación de Suelos (Embrapa, 2006) reconoce un horizonte subsuperficial de diagnóstico que equivale a un argipán (*claypan*) denominado *Horizonte B Plânico*; es un tipo de horizonte B textural con altos contenidos de arcilla, masivo o con estructura prismática, columnar o en bloques y separado de los horizontes suprayacentes (A o E) por un límite abrupto. Es responsable de la formación de capas colgadas, caracteriza al orden de los *Planossolos* y a los fines taxonómicos tiene precedencia sobre el horizonte B textural (argílico).

Densipanes. Smith (1986), en sus entrevistas sobre Soil Taxonomy, hace referencia a horizontes muy duros encontrados en Australia y Nueva Zelanda que inicialmente consideró duripanes. Posteriormente encontró horizontes similares en otros países (Guyana, Venezuela, Trinidad, EE.UU., España) y consideró que no eran capas cementadas sino compactadas naturalmente, a las que denominó *densipanes* y las diferenció de los duripanes y fragipanes y de tills glaciales compactos. Las capas eran tan compactas que en seco las raíces no podían atravesarlas ni se podían excavar con pala sino que era necesario usar picos o herramientas similares; en húmedo se podían barrenar con dificultad, aunque los fragmentos secos se desleían en agua. Estas capas, cuya densidad era de 1,70-1,95, correspondían a horizontes E álbicos de Espodosoles (Acuodes), Ultisoles y Alfisoles (Albacualfes) que sobrayacían a los horizontes espódicos o argílicos. Propuso su inclusión como un horizonte de diagnóstico de TS y la creación del gran grupo Densiacuultes (Smith *et al.*, 1974), el cual no fue reconocido. TS incluye, pero con otro concepto, los *materiales denses* (*densic materials*) que comprenden materiales no cementados, relativamente inalterados tales como till, flujos de lodos volcánicos, algunas rocas no cementadas y materiales mecánicamente compactados como residuos de minas. Tienen densidad alta, al punto que las raíces no pueden penetrar excepto por grietas. El límite superior de los materiales denses constituye un *contacto denso* si no existen grietas o éstas están separadas por 10 cm o más. Estos materiales se pueden utilizar para diferenciar series de suelos si se encuentran dentro de la sección de control de serie.

Los densipanes son reconocidos en la clasificación de Nueva Zelanda (Hewitt, 1998) en los grupos (2° nivel taxonómico) *Densipan Podzols* y *Densipan Ultic Soils*, que poseen “panes de alta densidad no cementados que corresponden a horizontes E”. Por otra parte, a los suelos del orden Podzol que poseen un pan cementado en el horizonte B se los ubica en el grupo *Pan Podzols*. Otro ejemplo de esta acepción son las descripciones de Wells & Northey (1985) de tres tipos de horizontes endurecidos, presentes en un Espodosol de Nueva Zelanda formado en arenas eólicas bajo la influencia de la hojarasca del árbol kauri (*Agathis australis*): 1) “*densipan*” correspondiente a un horizonte álbico (Ex3) formado por partí-

culas de cuarzo de tamaño arena y limo con empaquetamiento denso; 2) "humus-pan" en un horizonte espódico (Bhs2) con puentes de materia orgánica entre partículas de cuarzo y 3) "clay-pan" (2Bhs1) en un suelo enterrado; cuyas partículas poseen revestimientos espesos de arcilla y humus y se encuentran agregadas en una disposición abierta.

En el sistema WRB algunas capas densificadas pueden corresponder al calificador suplementario *dénsico*, aplicado a suelos que tienen compactación natural o artificial a ≤ 100 cm de la superficie del suelo al punto en que las raíces no pueden penetrar o sólo lo pueden hacer con muchas dificultades.

Suelos autocompactados ("Hardsetting soils"). El término *hardsetting* fue introducido por Northcote (1960) para aplicarlo a la clasificación de algunos suelos de regiones con estaciones secas y húmedas bien definidas de Australia, que presentaban endurecimiento del horizonte A, y a veces de algún horizonte subyacente. Según una definición del *International Symposium on Sealing, Crusting and Hardsetting Soils* celebrado en Brisbane, Australia, en 1994 (So *et al.*, eds., 1995) se aplica a horizontes que forman una masa casi homogénea al secarse y pueden tener grietas ocasionales separadas normalmente ≥ 10 cm. Son duros y quebradizos secos al aire y no es posible hundir el dedo índice, mientras que en húmedo son blandos. Su resistencia a la tracción es normalmente ≥ 90 kN m⁻². En suelos cultivados su espesor es frecuentemente igual o mayor que el de la capa disturbada. Los terrones de un horizonte que ha sido cultivado se desintegran total o parcialmente al mojarse. Si el suelo ha sido suficientemente humectado -por riegos por inundación o por lluvias intensas- volverá a su estado duro al secarse.

Mullins (2000) señala que se han encontrado suelos con características similares en Brasil, Suecia, Sudán, Botswana, Tanzania, Zambia, Estados Unidos e India, en la mayoría de los casos en climas áridos, semiáridos y mediterráneos. En la India, según Abrol (según comunicación personal con Mullins) el proceso se denomina "*self-compaction*", término que por ser parcialmente latino, permitiría una traducción directa al castellano como *autocompactación*. El nombre *hardsetting* deriva del verbo *to set*, que, entre sus diversos significados, se encuentra *fraguar*, en el sentido del endurecimiento que experimenta una masa de cemento u otros materiales al secarse; así, otras traducciones posibles serían *fraguado* y *suelos fraguables*.

Para comprobar el agente causante de la autocompactación (*hardsetting*) en horizontes E de Albacualfes de Australia, Chartres *et al.* (1990) eliminaron Fe, Si y Al, observando una pérdida total de resistencia a la tracción y una disminución de la resistencia al corte, pero escasa afectación de la resistencia a la compresión. La sílice amorfa sería el principal agente cementante, aunque en cierta medida también participaría un aluminosilicato semejante a la imogolita, un feldespatóide y complejos sílice-Fe.

También se han descrito suelos autocompactables de Camerún, constituidos por una capa arenosa muy dura situada debajo de otra capa arenosa más o menos blanda. Algunos indicios sugerirían que el endurecimiento se debería a taponamiento gradual de los poros entre granos de arena por arcilla neoformada. Otro tipo de suelo de este país son las capas con arcillas muy duras que derivarían de Vertisoles degradados por el cultivo. Ambos tipos de suelos no están asociados a altos contenidos de Na sino a bajos niveles de Fe reflejado por sus colores pálidos (Fabiola *et al.*, 2011).

En Brasil se han encontrado suelos que presentan horizontes con un comportamiento parecido al de los suelos autocompactables denominados "*solos coesos*".

Según Smith (1986), la restricción sobre consistencia dura o muy dura y el carácter masivo para el epipedón mólico se introdujo para excluir de los Molisoles de algunos suelos del sur de California que

poseían un horizonte superficial que cumplía los requerimientos de color y carbono orgánico de dicho epipedón, pero era tan duro en seco que se requería un martillo neumático para atravesarlo (autocompactado según el concepto australiano). Las condiciones que favorecen la formación de estos horizontes son aquellas que predisponen a una baja estabilidad estructural, entre otras, bajo contenido de materia orgánica (aprox. <2 %), proporciones elevadas de limo y arena fina (texturas franco arenosas o francas), con arcillas illíticas o caoliníticas y, con frecuencia, altos niveles de sodio intercambiable. Los procesos que intervienen serían a) rotura de agregados al humectarse, que involucra dispersión y desleimiento, y b) endurecimiento sin volver al estado agregado durante el desecamiento. En esta última fase el mecanismo principal sería una elevación en la resistencia por un aumento del esfuerzo efectivo resultante de una disminución del potencial mátrico. Este proceso ocurre en todos los suelos; en la mayoría de ellos la estructura se regenera al secarse, pero en los horizontes autocompactados ello no ocurre. Este proceso físico puede ser complementado por cementaciones químicas cuando se produce precipitación de compuestos en zonas de contacto entre agregados y partículas primarias (sílice con iones Al-OH, Si con óxidos de Fe).

Suelos coesos. Los suelos *coesos* podrían traducirse como *suelos cohesivos*, aunque este término tiene significados específicos en mecánica de suelos y podría prestarse a confusión, por lo cual se mantendrá el significado en portugués. En el sistema de clasificación de suelos brasileño (Embrapa, 2006) se ha incluido el “carácter coeso” dentro de los atributos de diagnóstico. Se aplica a suelos con horizontes densificados, muy duros o extremadamente duros en seco y friables o firmes en húmedo, estado en que se pueden deformar al presionarlos. Una característica común con el fragipán es que se deslíen en agua. Los horizontes *coesos* son generalmente masivos con tendencia a formar bloques. Se encuentran entre 30 y 70 cm de profundidad y comprenden horizontes transicionales AB o BA, aunque pueden prolongarse en su totalidad o en parte hasta horizontes Bw o Bt. En suelos cultivados pueden afectar a los horizontes superficiales. Este carácter se destaca en la clasificación brasileña en el tercer nivel (gran grupo), por ejemplo: *Argilossolos Acizentados Distrocoesos*, *Latossolos Amarelos Distrocoesos*. Tienen difusión sobre todo en el noreste y sudeste del Brasil en la región de los “Tabuleiros Costeiros” (mesetas bajas costeras).

Giarola & da Silva (2002) comparan las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos *coesos* y los autocompactables (*hardsetting*) y encuentran varias coincidencias, por lo cual deducen que son suelos con comportamientos similares, que recibieron diferentes designaciones en distintos países. Ambos dificultan o imposibilitan los cultivos por su dureza, característica que puede ser inherente o adquirida a través de las labores agrícolas. Ambos suelos se desarrollan en climas con las estaciones seca y húmeda definidas. Estos suelos se diferencian de los fragipanes por: a) ser masivos, b) cuando se someten a compresión en húmedo se deforman lentamente en lugar de quebrarse súbitamente, c) se encuentran a menor profundidad.

Otra situación se produce en algunos suelos en que los agregados se ablandan parcialmente al humectarse sin que se alteren los macroporos, pero los agregados se unen por material parcialmente desleído; en este caso el suelo se puede tornar más duro después de un ciclo de humectación y secado sin experimentar una autocompactación completa.

Hidroconsolidación. Bryant (1989) elabora una hipótesis de endurecimiento del suelo por colapso de una capa por su propio peso en húmedo (*self-weight collapse*) o *hidroconsolidación*. Este proceso

es considerado como una de las causas de formación de los fragipanes y es tratado más adelante y en otro capítulo de este libro (Imbellone *et al.*, este libro).

Coalescencia. Otra forma de endurecimiento del suelo que se habría observado primeramente en algunos suelos de Australia es la *coalescencia* de agregados. El proceso, también observado en EE.UU. y Holanda, consiste en una degradación de la estructura del suelo no por desleimiento o dispersión sino por deformación plástica en húmedo y soldadura o fusión de los contactos entre agregados, cuando los esfuerzos de corte debido a fuerzas capilares exceden la resistencia al corte del suelo. Consiste en un endurecimiento lento del suelo producido por la soldadura de agregados entre sí, por expansión y presiones de sobrecarga y por el traslado de partículas finas a los puntos de contacto de agregados mayores. Se produce generalmente en la parte superior del suelo (2-8 cm) como resultado de ciclos de humectación y desecamiento, especialmente en cultivos bajo riego. Se origina una capa masiva, muy dura y quebradiza sin la presencia de agentes cementantes (Cockroft & Olsson, 2000). La densidad aparente y resistencia al penetrómetro son muy superiores a los suelos no coalescentes, tanto en húmedo como en seco; asimismo la densidad de raíces y materia orgánica son menores. Una consecuencia frecuente en los suelos coalescentes es una restricción en el crecimiento de las raíces, aun en capacidad de campo. Ghezzehei & Or (2000) consideran que este proceso es, junto con la compactación por implementos agrícolas y el encostramiento superficial, las principales causas de deterioro de la estructura. Los suelos con altos contenidos de materia orgánica, tienden a minimizar la coalescencia, en especial los carbohidratos, ya que aumentan la cohesión en los agregados y por ello su resistencia a la deformación y soldadura. Los sistemas radiculares densos, como los de los pastos, y los hongos también contribuyen a estabilizar los agregados. La absorción rápida de agua por los agregados tiende a aumentar la coalescencia; en este sentido Grant *et al.* (2001) señalan que en los suelos vírgenes la absorción es más lenta que en los suelos cultivados y lo atribuyen a la mayor presencia de compuestos hidrofóbicos como lípidos y materia orgánica particulada.

Costras superficiales

Aparte de las duricostras ya descritas existen las costras superficiales, que no entrarían en el concepto de panes, de las cuales se distinguen varios tipos, por ejemplo: *costras estructurales*, *deposicionales* y *de erosión*, en las dos primeras se pueden diferenciar a su vez varios subtipos (Bouza, 1995). Pueden ser el resultado de una densificación producida por colapso estructural cercano a la superficie por impacto de las gotas de lluvia (van der Akker & Soane, 2005). Estas costras pueden ser duras, pero por su reducido espesor -del orden de los milímetros- suelen ser frágiles. A pesar de ello, disminuyen la infiltración, lo que aumenta el escurrimiento superficial y el riesgo de erosión; asimismo obstaculizan la emergencia de plántulas. Por ello, Taboada *et al.* (2008) consideran que el encostramiento superficial es un tipo de impedancia mecánica, aunque con características propias. En su formación intervienen factores externos como la intensidad de las lluvias y la cobertura del suelo y factores internos del suelo como la estabilidad estructural que a su vez depende de: humedad antecedente, textura, mineralogía de arcillas, contenidos de materia orgánica y niveles de sodio intercambiable y sales solubles.

Un tipo especial son las *costras biológicas*, constituidas por una asociación compleja entre partículas de suelo y de cianobacterias y otras bacterias, líquenes, musgos, hepáticas, hongos y algas verdes (Belnap *et al.*, 2001; Castillo-Monroy & Maestre, 2011). Cubren la superficie del suelo en sectores sin vegetación, especialmente en regiones áridas y semiáridas de todos los continentes, incluida la Antártida. Entre los

estudios en Argentina se puede citar a Drewes *et al.* (1991); De Halperin (1976) y Bouza *et al.* (1993). Estas costras, también llamadas *criptogámicas*, *criptobióticas*, *microfíticas* o *microbióticas*, protegen al suelo de la acción erosiva del agua y el viento, regulan la infiltración y aportan carbono y nitrógeno; de todas maneras el comportamiento es variable ya que existen distintos tipos de costras que recubren distintos suelos.

Panes en la Argentina

Las descripciones de panes en la Argentina son disímiles; los más estudiados por su amplia distribución areal, son los horizontes petrocálcicos, comúnmente denominados “tosca”, ya descritos por Darwin (1846) y luego por Ameghino (1881), Burkhardt (1907), Frenguelli (1950) y más recientemente por Kilmurray (1966), Mazza & Grazzan (1971), Zárate (1985), Imbellone & Teruggi (1986), Buschiazzo (1986, 1988), entre otros. En menor medida se han estudiado los horizontes petrogípsicos (Ferrer & Ourracariet, 1996). En una publicación reciente (Imbellone, ed., 2014) se han reunido trabajos sobre estos dos tipos de panes. Moretti & Morrás (este libro) han estudiado las “líneas de piedra” del NE de la Argentina y presumen que en algunos casos un tipo de esas líneas (horizontes nodulares) constituirían un impedimento relativamente menor para el desarrollo vegetal, aunque en otro tipo (horizontes síliceos) las restricciones serían mayores ya que a veces pueden presentarse como planchas continuas duras. Otro tipo de panes de origen sedimentario, se describen y estudian en la provincia de Catamarca (Guichon & Parnasetti, este libro).

Además de los mencionados, también se han estudiado los horizontes B argílicos (Bt) de la Región Pampeana que, como ya se mencionó anteriormente (Taboada *et al.*, 2008), sólo cuando poseen altos contenidos de arcilla, pueden considerarse panes, específicamente argipanes (*claypans*). En los levantamientos cartográficos de la Pampa Ondulada se tuvo en cuenta el grado de expresión de los horizontes Bt para diferenciar series, ya que se encontró que es uno de los factores determinantes de las diferencias en los rendimientos de los cultivos (Etchevehere *et al.*, 1969; INTA, 1972). Así, se había observado menor densidad de raíces, o incluso su ausencia, en horizontes Bt muy desarrollados (>60 cm de espesor), arcillosos o arcillo limosos, con estructura prismática o columnar, duros o más duros en seco, densidad aparente $\geq 1,7 \text{ Mg m}^{-3}$, con poros <200 μm de diámetro y lentamente permeables. Ello se traducía en menores rendimientos en los suelos que lo poseían. De todas maneras, dichos efectos se manifestaban de distinta manera según los cultivos. Así, comparando el comportamiento de maíz y trigo en varias series, se observó que los menores rendimientos de maíz (2000-3000 kg ha^{-1}) se encontraban en la serie Ramallo (Argiudol vértico, Bt de 91 cm de espesor, 56 a 40 % de arcilla, estructura prismática gruesa) y los mayores (2800-4400 kg ha^{-1}) en las series Junín (Hapludol típico, B no textural, 40 cm de espesor, 16 % de arcilla, bloques subangulares) y Rojas (Argiudol típico, Bt de 42 cm de espesor, 31 % de arcilla, estructura en bloques subangulares medios). En cambio, los rendimientos de trigo tuvieron escasa variación entre las series (2050-2300 kg ha^{-1}). Se atribuyen las diferencias a que el maíz tiene mayores exigencias hídricas y durante el período de mayor evapotranspiración, por lo cual las raíces deben explorar profundamente el perfil. Por el contrario, el trigo tiene un ciclo que abarca en gran parte meses con baja evapotranspiración y las raíces son en su mayor parte superficiales (80% en el horizonte A). Rendimientos intermedios se han encontrado en las otras series con valores intermedios en los Bt.

Micucci & Taboada (2006) encuentran que las raíces de soja se acumulan en los primeros 30-40 cm en suelos con horizontes muy arcillosos. Además, relacionan la abundancia de raíces de soja de segunda con el contenido de arcilla en horizontes Bt de cuatro series de la región (Bragado, Peyrano, Ramallo y Yerua) encontrando la menor densidad de raíces con contenidos de arcilla superiores al 34 % (serie Ramallo). Al respecto,

Taboada *et al.* (2008) comparan dos series con horizonte argílico de esta región: la mencionada serie Ramallo que posee características de pan de arcilla, ya que posee un espesor de 91 cm (Btss + Bt) y los contenidos de arcilla son 56 y 40%, y la serie O'Higgins, un Argiudol típico cuyo horizonte Bt no constituiría un pan de arcilla por sus bajos contenidos de arcilla (24,5 %), apenas superiores a los horizontes eluviales (18,5 y 21,5 %), pero suficientes para cumplir los requerimientos de argílico (relación B/A 1,2). Mencionan también la serie Portela (Argiudol abruptico) como ejemplo de un pan de arcilla ya que posee un horizonte Bt muy fuertemente textural (relación B/A ~2,0) constituido por tres subhorizontes que totalizan 97 cm de espesor y con contenidos de arcilla que varía entre 58 y 40 %. En horizontes arcillosos con estructura prismática las raíces tienden a extenderse por las grietas y superficies de prismas, lo cuales permanecen húmedos en su interior y esa agua no aporta al balance hídrico del cultivo. En estos casos, las raíces captan agua de horizontes subyacentes (BC, C) (Taboada *et al.* 2008). Se han encontrado suelos con horizontes Bt con elevados contenidos de arcilla en la provincia de Entre Ríos, pertenecientes a los Vertisoles, Molisoles (sobre todo Argiudoles vérticos) y Alfisoles (Vesco, 1985).

Un caso especial en que los panes de arcilla afloran es cuando los horizontes A han sido extraídos para la fabricación de ladrillos y jardinería. Este proceso, comunmente denominado *decapitación*, afecta en especial a áreas periurbanas; por ejemplo, en el partido de La Plata cerca de 10.000 ha han sido afectadas (10 % de su superficie), principalmente Argiudoles vérticos. En el partido de Florencio Varela se han decapitado alrededor de 1500 ha (cerca del 8% de su superficie). En ambos casos se excluyen las áreas actualmente urbanizadas. Esta extracción origina una disminución drástica de la fertilidad física y química debido a los elevados contenidos de arcilla de los horizontes B (45-60 %), consistencia muy dura o extremadamente dura en seco y menores niveles de materia orgánica y nutrientes que los horizontes A. De tal manera, los suelos se tornan inaptos o marginalmente aptos para distintos cultivos, especialmente hortícolas, creándose un conflicto entre la actividad extractiva y la agrícola (Giménez *et al.*, 2002; Hurtado *et al.*, 2005, 2006).

El caso de los horizontes Bt y Btn sepultados. La presencia de horizontes argílicos y nátricos sepultados por un material más joven y poco edafizado es común en la Región Pampeana, especialmente en la Pampa Arenosa. En ésta y parte de la Pampa Deprimida se han descripto suelos poligenéticos como resultado de variaciones climáticas ocurridas principalmente desde el Pleistoceno (Imbellone *et al.*, este libro). En un esquema simplificado se encuentran suelos con secuencias A-AC-C-2Btb-2BCb-2C. Para entender la secuencia se debe suponer que durante períodos secos y fríos y con escasa cobertura vegetal se habrían erosionado los horizontes eluviales quedando en superficie los horizontes Bt más resistentes a la erosión. Posteriormente, y también durante períodos secos, se habrían depositado sedimentos que cubrieron los horizontes aflorantes. Luego, un mejoramiento climático permitió el aumento de la cobertura vegetal y formación de horizontes A. Estos suelos con horizontes Bt enterrados han sido reconocidos y clasificados primeramente por INTA como *Hapludoles tapto-árgicos* y *Hapludoles tapto-nátricos*. Es decir que se ha clasificado a nivel de gran grupo el primer material como Hapludol por presencia de horizonte mólico y escaso desarrollo. A nivel de subgrupo se consideró la presencia del horizonte 2Btb argílico (o 2Btb nátrico) indicando que se halla sepultado por material más reciente mediante el adjetivo "tapto" (del griego θάπτειν -*thaptein*- enterrar). En el mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires (INTA, 1989) dichos suelos ocupan una superficie de 42.000 km². Los Hapludoles tapto-árgicos constituyen el subgrupo más extenso de los Hapludoles, con 27.568 km², mientras que los Hapludoles tapto-nátricos se encuentran en el tercer lugar con 14.432 km². Ambos son suelos con algunos problemas de hidromorfismo debido al

contraste de permeabilidades que originan “capas colgadas” sobre los horizontes Bt. En 16 perfiles con subgrupos “tapto” de esa publicación, el promedio de arcilla de los horizontes Bt es de 31,5 % (variando entre 18 y 46 %) y de los horizontes eluviales es 18,7% (9-29 %), con una relación de arcilla B/A de 1,7 (fuertemente textural). Debe advertirse que está relación es ficticia ya que se está en presencia de una discontinuidad litológica y se ha calculado a los fines de mostrar el contraste textural.

En la Pampa Arenosa es común encontrar sectores con menor desarrollo y clorosis de los cultivos (“manchoneo”), particularmente en áreas planas y deprimidas y en épocas de déficit hídrico, atribuyéndose el problema a causas edáficas. Utilizando información cartográfica del INTA, Sobral *et al.* (1993) elaboraron un mapa de riesgo de “manchoneo” del NO de la provincia de Buenos Aires y pequeños sectores del sur de Santa Fe y Córdoba. Según los autores, dicho riesgo está en función de la proporción de suelos “tapto” (*Hapludoles tapto-árgicos* y *tapto-nátricos*) de cada unidad cartográfica, considerando riesgo alto un 60-75 % y muy alto >75 % de suelos tapto. Sobre una superficie estudiada de 2.582.380 hectáreas esas dos clases representan un 33,8%. Esta superficie puede corresponder en parte a suelos con fragipán. En la sección “Fragipanes” se incluye aspectos aplicados de este tema.

En la Región Pampeana también se han descripto Epiacuoles y Endoacuoles tapto-nátricos (Schiavo, *et al.*, 1995, este libro; Imbellone *et al.*, este libro).

En otras provincias, y con una génesis distinta a la antes descripta, el INTA (1990) ha identificado unidades taxonómicas adicionales con subgrupos “tapto”, entre ellas: Torrifluventes tapto-cámbicos (Catamarca, Jujuy, Salta), Fluvacuantes tapto-árgicos (Corrientes), Torriortentes tapto-árgicos (Río Negro), Torriortentes tapto-cámbicos (Salta), Udipsamentes tapto-árgicos (Santa Fe), etc.


Los suelos con subgrupos “tapto” parecen no tener gran difusión en EE.UU. o en otras regiones del mundo pues no han sido reconocidos por Taxonomía de Suelos, que al respecto establece: “*los horizontes de diagnóstico del suelo enterrado no se consideran para seleccionar los taxones, a menos que en las claves se indiquen específicamente los horizontes sepultados, como en el caso de los subgrupos Tapto-Hísticos*” (Soil Survey Staff, 2014). Se deduce entonces que el sistema sólo admite dicho subgrupo pues es el único incluido hasta ahora en las claves. Debe señalarse en este sentido que en muchos casos los perfiles descriptos cumplen las exigencias de suelo enterrado, el que debe tener: 1) manto superficial reciente de ≥ 50 cm de espesor; 2) cualquier epipedón pero se admite sólo el horizonte subsuperficial cámbico y 3) la base del material ($\geq 7,5$ cm de espesor) no debe formar parte de ningún horizonte de diagnóstico (debe ser horizonte C o AC).

Sin embargo, Guy Smith en sus conversaciones relacionadas con el sistema (1986) reconocía la importancia de los subgrupos “tapto” cuando, refiriéndose a algunos suelos de Venezuela, afirmaba (p. 171): “*El problema de utilizar un subgrupo “tapto” dependería de la importancia de la naturaleza del suelo enterrado. Si se advierte que la presencia de ese horizonte argílico enterrado es importante para el uso del suelo, se podría considerar dicho subgrupo. En este caso, podría ser un Thaptoaqualfic Troporthent. En los Llanos Centrales de Venezuela los suelos tienen un manto eólico de 50 a 100 cm de espesor, que sobreyace a un suelo enterrado que podría ser por ejemplo un Tropaqualf*”. Esta afirmación parecería sugerir que el uso de los subgrupos *tapto-árgico* o *tapto-nátrico* -tal como se realiza “extraoficialmente” en la Argentina y especialmente en la Región Pampeana- es bastante razonable y no se opone a la filosofía de Taxonomía de Suelos.

■ FRAGIPANES

Antecedentes y definiciones

La primera descripción en Estados Unidos de capas equivalentes a lo que actualmente se denomina “fragipán” se debe a Winters (1942), quién reconoció panes endurecidos por sílice (“*silica hardpans*”) en suelos podzólicos rojos y amarillos (Ultisoles) cercanos a la ciudad de Washington. Anteriormente, Whitson (1927) había hecho referencia a un “*hardpan*” en suelos del norte de Wisconsin, EE.UU., aunque sin describirlo. Luego, Smith & Browning (1946) describieron en West Virginia horizontes quebradizos y con cementación reversible, identificados como “*hardpan*” o “*siltpan*”. Guy Smith (1986) se atribuye la acuñación hacia 1948 del término “*fragipan*” (del latín *fragilis*: frágil, quebradizo. Según el sistema WRB deriva del latín *frangere*: romper) para identificar horizontes endurecidos reversiblemente, antes denominados “*brittle pans*” (panes quebradizos) o “*silt pans*” (panes de limo). El término fue introducido oficialmente en el Soil Survey Manual (Soil Survey Staff, 1951) donde se los define como horizontes muy compactos, ricos en limo, arena o ambos y contenidos relativamente bajos de arcilla; se encuentran en suelos desarrollados a partir de materiales residuales o transportados. Luego Carlisle *et al.* (1957) definieron a los fragipanes como horizontes compactos, duros a extremadamente duros en seco y firmes o muy firmes en húmedo y quebradizos. El término fue utilizado por Grossman *et al.* (1957, 1959) para describir horizontes con estas características en los estados de New York e Illinois; luego tuvo mayor difusión con la publicación del nuevo sistema de clasificación de los Estados Unidos (Séptima Aproximación; Soil Survey Staff, 1960).

Según el concepto clásico de la escuela norteamericana (Soil Survey Staff, 1999), fragipán es un horizonte de diagnóstico subsuperficial denso, que puede constituir una grave limitación para el crecimiento de las plantas. Posee estructura prismática muy gruesa o poliédrica con lenguas verticales de material grisáceo a lo largo de las caras de los agregados, formando un diseño poligonal en planta y la matriz en el interior de los prismas posee consistencia firme o muy firme y quebradiza en húmedo, es decir que al ser presionados se quiebran súbitamente sin experimentar una deformación plástica previa; los agregados se deslían o fracturan al sumergirlos en agua; posee escasas raíces y sólo entre agregados y las texturas son más finas que arenosa fina, generalmente con menos del 35% de arcilla. Adicionalmente algunos fragipanes poseen mayor densidad aparente que los horizontes suprayacentes y/o infrayacentes. Actualmente, el fragipán constituye un horizonte de diagnóstico subsuperficial de Taxonomía de Suelos y las características exigidas se indican en la **Tabla 2** *1; asimismo esta clasificación incluye las “propiedades frágicas” que se aplican a horizontes que poseen las propiedades esenciales de un fragipán pero carecen de algunas de características exigidas, tales como espesor, estructura, etc. (Soil Survey Staff, 2014). Otras clasificaciones han introducido el concepto de fragipán a distintos niveles, lo que se describe en la sección “Clasificación de fragipanes”.

Los fragipanes han sido intensamente estudiados debido a las limitaciones que presentan para distintos usos, especialmente para el uso agrícola, y por su extensa distribución areal en algunas regiones del mundo. Las restricciones para el crecimiento de las raíces es uno de los principales problemas, a lo que se suma la disminución en la permeabilidad que puede dar origen a capas colgadas con creación de un medio anóxico, riesgo de anegamiento y aumento del escurrimiento superficial con mayor riesgo de erosión; existe asimismo movimiento lateral del agua sobre el techo de los fragipanes, sobre todo, en áreas con mayor pendiente. Se produce también una reducción en la capacidad de almacenamiento de

agua, especialmente en los fragipanes más someros. Los usos ingenieriles son asimismo afectados por las dificultades que ofrecen para las excavaciones para cimientos, cañerías, pozos ciegos, etc.

Factores de formación

Material originario. El material originario es importante en la génesis de los fragipanes. Considerando que en éstos predominan las texturas medias, como se indica más adelante, un material común en los fragipanes es el loess. En la Argentina este material se ha encontrado en fragipanes de la Región Pampeana (Imbellone & Giménez, 1998; Imbellone *et al.*, este libro, y Schiavo *et al.*, 1995) y en el Chaco (Ledesma *et al.*, 1983-2007). Según Bockheim & Hartemink (2013), el 41 % de las series de EE.UU. que poseen fragipán tiene al loess como material originario. Se considera que en ese país los fragipanes están mejor expresados cuando los espesores de loess oscilan entre 0,75 y 2 m (Grossman *et al.*, 1959). La presencia del loess o sedimentos loessoides también se ha mencionado en fragipanes de Francia, Bélgica (van Vliet & Langohr, 1981) y Polonia (Szymański *et al.*, 2011; Kołodyńska-Gawrysiak *et al.*, 2017), entre otros.

En áreas periglaciales son comunes los fragipanes desarrollados en till glacial. En EE.UU. el 20 % de las series con fragipán están desarrolladas en till con bajo contenido de calcáreo (Bockheim & Hartemink, 2013). Weisenborn & Schaetzl (2005a,b) han caracterizado en el estado de Michigan fragipanes desarrollados en till ácido o calcáreo. Veneman & Lindbo (1986) describen en el noreste de EE.UU. tills de hasta 10 m de espesor, cuya parte superior (hasta 1 m) poseen evidencias de pedogénesis en forma de vetas verticales blanquecinas en un patrón poligonal visto en planta y revestimientos de limo fino en caras de agregados. Este sector reúne los requisitos de fragipán, no así el till basal denso que carece de desarrollo pedogenético. Estos materiales también han sido descriptos en Escocia (FitzPatrick, 1956), Canadá (de Kimpe, 1970; Wang *et al.*, 1974) y Suecia (Lyford & Troedsson, 1973). Al referirse a fragipanes del estado de Pennsylvania, Petersen *et al.* (1970) encuentran que son raros los formados en saprolitos; asimismo, afirman que los fragipanes formados en till están mejor expresados que los formados en sedimentos eólicos y lacustres, si se compara la densidad aparente entre horizontes con propiedades frágicas y sin ellas.

En Irán se han estudiado fragipanes formados en depósitos de playa pleistocenos y holocenos, cercanos a la costa del mar Caspio, sepultados por materiales aluviales en los que se cultiva arroz (Eghbal *et al.*, 2012). También se han descripto fragipanes desarrollados en regolitos y en materiales coluviales, aluviales y fluvio-lacustres en Tailandia (Phunmuang *et al.*, 2011), España (Gallardo *et al.*, 1988), entre otros, y también en la Argentina (Irisarri & Ayala Torales, 1993; Apcarian *et al.*, 2014; Ledesma *et al.* 1983-2007; Brest *et al.*, este libro). Características especiales tienen los panes formados a partir de materiales volcánicos, los que han sido tratados en una sección anterior. Dichos panes pueden tener a veces endurecimiento reversible y ser considerados fragipanes; algunos de ellos han sido denominados en México “fragipanes blancos” (Acevedo Sandoval & Flores Román, 2000).

Clima. Los fragipanes se desarrollan bajo gran variedad de climas aunque tienen mayor difusión con climas templados o frescos y húmedos, de tipo continental o marítimo. Según el inventario realizado en EE.UU. por Bockheim & Hartemink (2013) cerca del 80 % de las series corresponden al régimen de humedad del suelo údico, seguido por el régimen ácuico y, en muy pequeña proporción (aprox. 2 %), por el régimen xérico. Respecto al régimen de temperatura del suelo, la mayoría de las series (60 %) poseen

régimen méxico y el resto se dividen en partes aproximadamente similares entre los regímenes frígido y térmico. Los valores medios anuales de precipitación de los climas templados varían generalmente entre 700 y 1400 mm y las temperaturas entre 7 y 16 °C. En el estado de Michigan se mencionan temperaturas medias de invierno y verano de aproximadamente -8 y 18 °C (Weisenborn & Schaetzl, 2005a,b). En el sur del estado de Illinois dichos valores son 1,4 y 24,7 °C (Wilson *et al.*, 2010). En el sur de Polonia se han reconocido fragipanes bajo clima continental, con temperatura media anual de 6 a 8 °C y precipitación media anual de 700-900 mm (Kołodzyńska-Gawrysiak *et al.*, 2017). Se han descrito fragipanes en altura: a 1800 m snm en la Sierra de Guadarrama (España), con temperaturas medias de 6,5 °C (anual), 14,8 °C (verano) y -1 °C (invierno), siendo el régimen de temperatura del suelo crítico (Gallardo *et al.*, 1988) y en los Apeninos del norte (Italia) a 800-1100 m snm, con precipitación media anual de 1400 mm y temperatura media anual de 10,2 °C con abundante caída de nieve. (Certini *et al.*, 2007).

Los fragipanes descritos en Irán se encuentran en regiones con clima templado húmedo (temperatura y precipitación media anual 16 °C y 1600 mm). En climas tropicales, los fragipanes tienen mayor difusión en regiones con una temporada seca más o menos bien marcada; por ejemplo, en Brasil (estado de Río de Janeiro) se han descrito Haplustultes y Haplustoxes con fragipán con precipitación media de 1000-1500 mm y 1-3 meses de estación seca en invierno, con temperatura media de 18 °C (Souza dos Santos Moreau *et al.*, 2006; Ribeiro Ramos *et al.*, 2015). En Tailandia se han caracterizado fragipanes en regiones con clima tropical de sabana con valores medios anuales de precipitación y temperatura de 1000 mm y 28 °C (Phunmuang *et al.*, 2011).

En las provincias de Buenos Aires y Córdoba, Argentina, los suelos con características frágicas se hallan bajo los regímenes de humedad údico y ácuico y de temperatura térmico (Imbellone *et al.*, este libro; Schiavo *et al.*, este libro). En la provincia del Chaco la mayoría de esos suelos se hallan bajo los regímenes de humedad ústico y ácuico y de temperatura hipertérmico, con lluvias mas abundantes en verano (Brest *et al.*, este libro). Los fragipanes de Catamarca y Salta se localizan en áreas con régimen de humedad ácuico, aunque el régimen de la región es arídico (INTA, 1990).

Relieve. Según la recopilación de Bockheim & Hartemink (2013), en EE.UU. los fragipanes se encuentran más comúnmente en posiciones topográficas bajas o en pendientes inferiores al 12 %. Sin embargo, en la Sierra de Guadarrama (España) se encontraron fragipanes en pendientes de 32 y 37 % orientadas al norte (Gallardo *et al.*, 1988). En dos transectas con pendientes promedio de 8,5 % descritas por Wilson *et al.*, (2010) en el sur del estado de Illinois se encontró que los fragipanes eran más abundantes en la parte media de las pendientes. El drenaje natural de los fragipanes mejor expresados de la región oriental de EE.UU. corresponde a las clases imperfecta y pobre. En el estado de Pennsylvania “pobremamente drenada” es la clase de drenaje más abundante y “bien drenada” la clase más escasa. Así, es común la presencia de fragipanes en depresiones en llanuras de till glacial cubiertas de loess con acumulación de agua superficial y subsuperficial (Park *et al.*, 2006) También se han descritos fragipanes en depresiones cerradas en mantos de loess en Polonia (Kołodzyńska-Gawrysiak *et al.*, 2017) y en depresiones situadas en mesetas costeras (*tabuleiros costeiros*) del noreste de Brasil; en este caso los fragipanes están más desarrollados en las depresiones más profundas, de 0,5-3 m (Filizola *et al.*, 2001). En la Argentina, los fragipanes tienden a estar en áreas planas o en depresiones de distinto tipo (interdunas, paleocauces, planicies aluviales, bordes de lagunas, etc.), siendo frecuente el régimen de humedad ácuico (Imbellone *et al.*, Schiavo *et al.*, Brest *et al.*, este libro; INTA, 1990).

Vegetación. Los fragipanes serían más comunes en áreas que tienen o han tenido vegetación de bosque, tanto de coníferas, latifoliadas o mixtos. En bosques de coníferas de EE.UU. se mencionan especies como abeto (*Abies sp.*, *Pseudotsuga sp.*), pino (*Pinus sp.*), y de latifoliadas como haya (*Fagus sylvatica*), castaño (*Castanea sativa*), roble (*Quercus robur*) etc. Grossman & Carlisle (1969) muestran que en los EE.UU. los fragipanes se extienden hacia el oeste hasta el límite entre la vegetación de bosque y pradera. En Canadá también se encuentran en bosques de coníferas (Wang *et al.*, 1974). En muchos casos se ha desforestado para implantar pasturas o cultivos de cereales y leguminosas. En Polonia los fragipanes están difundidos en bosques de latifoliadas o en áreas desforestadas dedicadas a cultivos (trigo, maíz, soja, papas, pasturas) y en Italia se han encontrado en bosques mixtos de abeto (*Abies alba*), castaño (*Castanea sativa*) y haya (*Fagus sylvatica*). En Brasil se han descrito fragipanes en bosque tropical subperennifolio con cultivos de pasturas y plantaciones de eucalipto (Souza dos Santos Moreau *et al.*, 2006).

Franzmeier *et al.* (1989) consideran que las raíces más profundas de los árboles, en comparación con las de los pastos, aumentan la evapotranspiración y por consiguiente concentran en mayor medida la sílice en la solución del suelo, la que actuaría como cementante. Por otra parte, las gramíneas absorben más Si que las especies arbóreas. Sin embargo, en la Argentina los fragipanes se han encontrado preferentemente bajo vegetación de pastizal (Imbellone *et al.*, este trabajo). En la provincia del Chaco se encuentran fragipanes en bosques de madera dura (por ej.: quebracho, *Schinopsis balansae*, *S. lorentzii*) y en pastizales de abras de bosque o áreas deprimidas, aunque gran parte de la vegetación natural ha sido modificado por el uso agropecuario (Ledesma *et al.*, 1983-2007; Brest *et al.*, este libro).

Tiempo. Según Ciolkosz *et al.* (1995) los fragipanes bien desarrollados requerirían para su formación 18.000 años como mínimo. Coinciden con esta edad Kołodyńska-Gawrysiak *et al.* (2017) quienes dataron un fragipán (Btxg) de Polonia en 17.600 ± 1.800 años AP por luminiscencia ópticamente estimulada. Creemens *et al.* (1998) estimaron en 4500 años el tiempo de formación de un fragipán desarrollado en un aluvio en Lock Haven (EE.UU.), aunque Ciolkosz & Waltman (2000) señalan que no calificaría como fragipán y sería en realidad un *protofragipán*. Petersen *et al.* (1970) afirman que en el estado de Pennsylvania los fragipanes formados en sedimentos fluviales sólo se encuentran en terrazas altas, estando ausentes en planicies aluviales recientes.

Según Ciolkosz *et al.* (1995), si el paisaje permanece estable los fragipanes se degradarían con el tiempo y lo harían más rápidamente en los suelos bien drenados que en los pobremente drenados. Según Waltman (1981) los indicadores de degradación incluyen meteorización de minerales de arcilla, acumulación de óxidos de Fe, acumulación de arcilla y disminución de la densidad aparente. Al respecto, Yaalon (1971) considera que los fragipanes son con frecuencia horizontes que llegan a su estado estable lentamente (>1000 años) y son relativamente persistentes en el tiempo como paleosuelos.

Propiedades morfológicas

Los fragipanes pueden abarcar un solo horizonte, pero comúnmente incluyen dos, tres o aún más subhorizontes, como en los EE.UU. donde las series Providence (Fragiudalf oxiácuico) y Calloway (Fraglosudalf ácuico) comprenden cinco (Btx1 a Btx5) y Volusia (Fragiacuept aérico) seis (Bgx1 a Bgx6). A los horizontes con características de fragipán se les asigna el sufijo “x” en la nomenclatura de horizontes de diversos países. Generalmente afectan a horizontes B (Bx), aunque también puede asignarse a horizontes E (Ex) o transicionales a éstos: Btx/E, (E/B)x, BCx. Los

fragipanes poseen características adicionales tales como cutanes de iluviación de arcilla (Btx) o colores glei o rasgos redoximórficos (Bgx), entre otros. Estos rasgos son la evidencia de diversos procesos pedogenéticos que acompañan a la formación de los fragipanes, por ejemplo, argiluviación e hidromorfismo. A los fragipanes con evidencias de iluviación de arcilla en forma de argilanes o puentes de arcilla se los denomina a veces “fragipanes iluviales”; se contraponen a los “fragipanes eluviales” que afectan a los horizontes E que pueden calificar a veces como horizontes álbicos (Weisenborn & Schaetzl, 2005a,b). A pesar de que los fragipanes se consideran horizontes genéticos, en algunos casos se los ha identificado como “Cx”.

En EE.UU. y Canadá muchos perfiles con fragipanes son bisecuales, con una secuencia de Espodosol (E-Bs) en el secuo superior y una de Alfisol (E'-Bt) en el secuo inferior, en la cual se encuentra el fragipán, tanto en la parte eluvial (E'x), en la iluvial (Btx) o en ambas (Wang *et al.*, 1974; Weisenborn & Schaetzl, 2005a,b; Bockheim & Hartemink, 2013). En España también se han caracterizado fragipanes en perfiles bisecuales, con un secuo superior úmbrico-cámbico y un secuo inferior ócrico-fragipán (Gallardo *et al.*, 1988). En la Argentina se han descripto fragipanes en horizontes Bt y BC enterrados que subyacen a un material reciente poco evolucionado o a horizontes Bt sin fragipán en dos o más ciclos pedogenéticos; un ejemplo de una secuencia simplificada de dos ciclos sería: A-AC-C-2Btxb-2BCxb. Es común que los horizontes B y BC posean niveles elevados de sodio intercambio y/o carbonatos secundarios (2Btngx, 2Btkxb, 2Btngx, 2BCkxb) (Imbellone *et al.*, este libro; Schiavo *et al.*, este libro).

Profundidad y espesor. Una característica común de muchos fragipanes es el límite superior abrupto y el inferior gradual o difuso. En cambio, los espesores y profundidades de techo y base son muy variables; así, a partir del análisis de la base de datos de las series de EE.UU. del Natural Resources Conservation Service (NRCS), Bockheim & Hartemink (2013) determinan que la profundidad promedio del techo del fragipán es 63 cm (intervalo: 13-114 cm) y de la base 130 cm (56-241 cm); mientras que el espesor promedio es de 67 cm (15 -218 cm).

Lozet & Herbillon (1971) analizan Fragiudultes y Fragiudalfes de Bélgica, tanto monosecuales como bisecuales. Los fragipanes corresponden a horizontes Bx con espesores de 83 y 60 cm y situados entre 67 y 150 cm o, en un caso, un horizonte Cx (138-153 cm). Según van Vliet & Langohr (1981) los fragipanes de Bélgica y norte de Francia se encuentran entre 35 y 90 cm profundidad y, para materiales similares, son más someros en suelos con drenaje más deficiente; su espesor varía desde pocos centímetros hasta alrededor de 1 metro; los panes más delgados son generalmente discontinuos y se observan en suelos bien drenados. Wang *et al.* (1974) describen en Canadá dos suelos (Fragiacuod y Fragiortod), en los que el fragipán se extiende entre los 64 y 153 cm. En Italia se encuentran fragipanes a una profundidad de 40-55 cm con espesores de 120-150 cm (Certini *et al.*, 2007). En Polonia se han descripto fragipanes profundos, con techo entre 124 y 162 cm y base entre 193 y 220 cm, sepultados por coluvios (Kołodzyńsk-Gawrysiak *et al.*, 2017) y otros más someros, con techo a 30-70 cm, base a 70-180 cm y espesores entre 20 y 135 cm (Szymański *et al.*, 2011). En Irán se han identificado fragipanes que se extienden entre los 50 y 120 cm de profundidad (Eghbal *et al.*, 2012). En algunas regiones de EE.UU. el desarrollo de fragipanes es más acentuado en presencia de contactos líticos y paralíticos o de discontinuidades litológicas.

En la Argentina, los suelos con características frágicas de la provincia de Córdoba tienen su techo entre los 24 y 44 cm y la base entre 66 y 90 cm (Schiavo *et al.*, este libro). En la provincia de Buenos Aires el área estudiada es más extensa que en el caso anterior y por ello se ha encontrado mayor varia-

bilidad en estos parámetros, especialmente en un área de las dunas parabólicas, donde el techo varía entre 46 y 119 cm y la base entre 54 y 156 cm (Imbellone *et al.*, este libro). En cambio, el espesor promedio en ambas provincias es más o menos similar: ~37 cm. En Río Negro tienen un espesor promedio de 30-40 cm (Irisarri & Ayala Torales, 1993; Apcarian *et al.*, 2014).

Color. Los colores son variables, aunque tienden a dominar los matices 10YR y 7,5YR. Sin embargo cuando en los fragipanes la saturación con agua es acentuada se observan colores gley que afectan todo el horizonte o que alternan en mayor o menor medida con colores de material oxidado; por ejemplo en dos horizontes con características de fragipán de Polonia se observaron los siguientes colores (húmedo): Btxg: 10YR 4/6 (50%) y 2,5Y (50%) y Btx: 10YR 5/8 (90%), 2,5Y 7/1 (10%) (Kolodyńsk-Gawrysiak *et al.*, 2017).


En la provincia de Buenos Aires los fragipanes tienen casi siempre matices en húmedo 7,5YR (4/4, 4/6, 5/4). En cambio, en Córdoba predominan los matices 10YR (4/4, 5/3, 5/5). Los fragipanes del Chaco tienen también matices 7,5YR y 10YR, aunque debido al clima más cálido, en muchos casos se observan matices más rojos: 5YR (2/2, 3/3, 3/4). En todos los casos no se observan diferencias marcadas con respecto a los horizontes supra- e infrayacentes.

Granulometría. En general, los fragipanes se forman en materiales de texturas medias. Se considera que las clases texturales de los fragipanes no son demasiado finas, con ≤ 30 % de arcilla (Norfleet & Karathanasis, 1996; Mc Daniel *et al.*, 2008), aunque no hay límites texturales exactos. Las clases por tamaño de partículas en general varían desde franca gruesa hasta limosa fina; los fragipanes desarrollados en loess tienden a tener clases franco limosas y los desarrollados en till texturas más gruesas, por ejemplo franco arenosa y franca en Canadá (Wang *et al.*, 1974). Considerando las clases texturales de 80 fragipanes de EE.UU. Lindbo & Veneman (1989) determinaron que alrededor del 70 % se concentran en las clases franco limosa y franco arenosa en proporciones más o menos similares; alrededor del 20 % se hallan en la clase franca y el resto corresponden a las clases franco arcillo limosa, franco arcillosa y limosa. Según la base de datos de EE.UU. consultada por Bockheim & Hartemink (2013), el 73 % de las series con fragipán se concentra en las clases por tamaño de partículas limosa fina (111 series), franca fina (88 series) y franca gruesa (66 series). Se deduce de esto que muchos fragipanes tienen alto contenido de limo y arena muy fina que contribuyen a un empaquetamiento denso. En fragipanes del estado de Pennsylvania formados en diferentes materiales originales, Petersen *et al.* (1970) determinaron que la clase textural predominante es franca, extendiéndose a la franca arenosa y franco limosa. Wilson *et al.* (2010) describen en el sur de Illinois fragipanes con cantidades elevadas de limo (70-80 %) constituido en proporciones parecidas de limo fino y grueso y cantidades muy escasas de arena (<2 %). En Polonia, varios fragipanes desarrollados en loess la granulometría responde al material originario y es franco limosa, dominando ampliamente el limo (62-72 %), con cantidades subordinadas de arcilla (17-23 %) y arena (10-17 %) (Szymański *et al.*, 2011).

Los fragipanes descriptos en Irán, formados en depósitos de playa, tienen textura franco arcillo arenosa, con valores de arena de 52 a 70 %, predominando ampliamente la arena fina, y contenidos de arcilla de 20 a 34 % y de limo de 9 a 14 % (Eghbal *et al.*, 2012). Algunos fragipanes de regiones tropicales tienden a apartarse de la granulometría media más común; así, en algunos perfiles de Tailandia predomina la arena (~50 %), mientras que el limo y arcilla participan en cantidades parecidas (Phunmuang *et al.*, 2011). En cambio, en fragipanes del noreste de Brasil (*Argilossolos Amarelos distróficos fragipânicos*) la textura es arcillosa, con ~56 % de arcilla, y arena subordinada (~30 %), revelando el análisis mineralógi-

co el predominio de cuarzo y caolinita poco cristalizada y, en forma subordinada, la presencia de óxidos de Fe, principalmente goethita (Filizola *et al.*, 2001).

En los horizontes frágicos de la provincia de Buenos Aires el tamaño medio mayoritario está en los intervalos 62-31 μm (4-5 \emptyset), 31-16 μm (5-6 \emptyset) y 16-8 μm (6-7 \emptyset), comprendidos en la clase textural franco limosa. La media gráfica (Mz), que determina el tamaño promedio del material, es ligeramente más gruesa en estos horizontes (6,02 \emptyset) que en los horizontes B suprayacentes (6,50 \emptyset) (Imbellone *et al.*, este libro). En los fragipanes de la provincia de Córdoba la clase textural predominante es la franco arenosa y, en menor medida, franca (Schiavo *et al.*, este libro). En suelos con características frágicas del Alto Valle (provincia de Río Negro) la clase por tamaño de partículas más común es limosa fina (Apcarian *et al.*, 2014).

Estructura. Según características exigidas a los fragipanes en TS, la clase de estructura debe ser prismática, columnar o en bloques, aunque puede ser masivo. La clase debe ser muy gruesa y se admite cualquier grado; si es débil, los agregados pueden tener cualquier tamaño. La separación entre unidades estructurales que permiten el paso de las raíces tiene que ser ≥ 10 cm en dimensiones horizontales. El sistema WRB no exige un tipo específico de estructura; aunque requiere una separación entre agregados igual a la indicada en TS **Tabla 2** *. Park *et al.* (2006) describen en fragipanes de Wisconsin, EE.UU. prismas muy gruesos (hasta 30 cm de ancho) cuya parte superior se encuentra a ~50 cm y se extienden hasta ~2 m de profundidad, aunque el desarrollo de estructura es más débil por debajo de ~1,5 m. Las caras de los prismas poseen revestimientos arcillo-húmicos que rellenan en gran parte las grietas de los horizontes Bt/2Bx, que subyacen a horizontes Ex. Respecto a estos horizontes eluviales los autores señalan que se formarían por degradación de los prismas gruesos subyacentes que originan episaturación y procesos derivados como por la ferrólisis.

Los fragipanes de Bélgica y Francia poseen en general estructura laminar o lenticular y en algunos casos pueden ser masivos (Lozet & Herbillon, 1971; van Vliet & Langohr, 1981). La estructura laminar/lenticular también se encontró en Escocia y Noruega (FitzPatrick, 1956), Canadá (Wang *et al.*, 1974), Polonia (Kołodziej-Gawrysiak *et al.*, 2017) y España (Gallardo *et al.*, 1988) en fragipanes asociados a permafrost antiguos. Coincidiendo con algunos fragipanes de Europa y Canadá, en los suelos con características frágicas de la Pampa Arenosa predomina la estructura lenticular o laminar, cuya génesis se explica en Imbellone *et al.* (este libro). Esta propiedad impide clasificar a estos horizontes como “fragipanes” según TS, pero poseerían “propiedades frágicas” según este sistema o pueden calificar como “horizonte frágico” en el sistema WRB pues en estos casos no se exige un tipo de estructura. En los fragipanes de Córdoba también se reconoce la estructura laminar o como subestructura de otras estructuras (prismas) (Schiavo *et al.* este libro). En el Chaco estos horizontes son principalmente masivos o, en algunos casos, tienen estructura en bloques.

Micromorfología. Diversos rasgos comunes a los fragipanes se han observado mediante microscopía óptica en cortes delgados o microscopía electrónica de barrido; entre ellos: 1) empaquetamiento denso; 2) fábrica sépica; 3) puentes de arcilla o sílice amorfa entre granos de esqueleto; 4) arcilla orientada en forma de revestimientos sobre granos, agregados o vacíos o en pedotúbulos y 5) revestimientos de arcilla degradados dentro del fragipán o en sus cercanías (Weisenborn & Schaetzl, 2005a). Los fragipanes formados en horizontes iluviales tienen abundantes revestimientos de arcilla en caras de agregados, en vesículas y en canales verticales de raíces. En cambio, en los horizontes Cd que subyacen a fragipanes desarrollados en till glacial dichos rasgos y los ferranes son escasos (Lindbo & Veneman,

1989). Es común también la presencia de puentes de arcilla entre granos de arena. Se han encontrado también revestimientos de limo. Es generalizada la presencia de rasgos redoximórficos que incluyen nódulos de Fe-Mn moteados de Fe y Mn entre agregados tanto en los fragipanes como en los horizontes suprayacentes.

En suelos con propiedades frágicas de la provincia de Buenos Aires un rasgo importante revelado mediante microscopía electrónica es la presencia de puentes de arcilla uniendo granos del material grueso, que originaría el carácter quebradizo (Imbellone & Giménez, 1998). La microestructura es principalmente en bloques subangulares y angulares; la microestructura lenticular es menos visible a este nivel de observación que a simple vista, observándose la laminar fina; en cambio, la macroestructura laminar gruesa y lenticular posee a nivel microscópico subagregados en forma de bloques, que sería una estructura terciaria o cuaternaria formada por microagregados en forma de bloques. Además de la argiluvación, se observaron rasgos generados por procesos de carbonatación e hidromorfismo, con expresión relativa variable en los distintos suelos. Los procesos pedológicos no habrían sido coetáneos en la mayoría de los suelos; la argiluvación habría sido previa, tanto a la carbonatación como al hidromorfismo, como lo muestra la posición relativa de los rasgos pedológicos (Imbellone *et al.*, este libro). En fragipanes del SE de Córdoba Schiavo *et al.* (1995) observan a nivel micromorfológico, aparte de una alta densidad de empaquetamiento, la presencia de fisuras bien marcadas orientadas horizontalmente.

Propiedades físicas

Densidad aparente. Los valores de densidad aparente oscilan en la mayoría de los casos entre 1,6 y 2,0 Mg m⁻³. En los fragipanes eluviales (Ex) los valores tienden a ser menores por ejemplo 1,43 Mg m⁻³ (Park *et al.*, 2006). En Pennsylvania, EE.UU., se ha encontrado que este parámetro es mayor en till glacial y coluvio que en loess; en los aluvios antiguos (depósitos de terrazas) los valores son aproximadamente intermedios (Ciolkosz & Waltman, 2000). Wang *et al.* (1974) han encontrado valores de 1,77 a 2,06 Mg m⁻³ en fragipanes de Canadá formados en till. La densidad es marcadamente menor en los horizontes suprayacentes; en cambio en los horizontes subyacentes es común que los valores se mantengan elevados, lo que puede atribuirse a herencia del material original (Smith & Callahan, 1987). En suelos en que el carácter frágico está menos expresado, la densidad tiende a ser menor, por ejemplo, los Hapludalfes oxiácuicos frágicos descritos por Wilson *et al.* (2010), cuyos horizontes Btx tienen 1,4-1,5 Mg m⁻³; estos horizontes no poseen el carácter firme y quebradizo en ≥60% de su volumen, como se exige para ser fragipanes, aunque poseen condiciones frágicas. En el Alto Valle del río Negro Apcarian *et al.* (2014) consignan valores de 1,4-1,9 Mg m⁻³. Ribeiro Ramos *et al.* (2015) consignan para el estado de Rio de Janeiro, Brasil, densidades aparentes de 1,67 y 1,34 Mg m⁻³ para fragipanes y horizontes no frágicos, respectivamente. Sin embargo, Lindbo *et al.* (1994) no encontraron las densidades más altas en fragipanes de suelos del valle inferior del río Mississippi, existiendo mayor relación con el contenido de arena, lo que sugiere mayor influencia de factores litológicos que de la densificación pedogénica.

Porosidad. En Espodosoles de Quebec (Canadá), de Kimpe (1970) encuentra que el diámetro medio de los poros es de 0,5 µm en el fragipán y 25 a 120 µm en los horizontes no frágicos. En horizontes Cx de suelos del Alto Valle de río Negro la macroporosidad es generalmente <6 % (Apcarian *et al.*, 2014). En Brasil se ha determinado que en seis horizontes con fragipanes de dos perfiles la porosidad total promedio es 42 % y la macroporosidad 3 %; en seis horizontes no endurecidos de dos suelos vecinos

dichos valores son 50 y 24 %, respectivamente; en los primeros el contenido promedio de arena es de 55,7 % y en los segundos de 29,4 %. Según los autores, los granos de arena de los fragipanes tienden a tener tamaños muy heterogéneos, lo que facilita el rellenamiento de poros mayores y la reducción de la porosidad total (Ribeiro Ramos *et al.*, 2015). En fragipanes de Tailandia se encontró una porosidad total de 29 a 34%, siendo los valores menores en materiales derivados de tobas, en comparación con materiales coluviales y aluviales. (Phunmuang *et al.*, 2011).

Conductividad hidráulica (CH). La CH en los fragipanes suele ser baja o muy baja. Grossman *et al.* (1959) consignan un intervalo aproximado de 0,25 a 25 mm/hora. Miller *et al.*, (1971a,b) determinaron una CH de <0,25 mm/hora en fragipanes de Ohio y Pennsylvania; atribuyen este valor muy bajo a un importante movimiento lateral de agua sobre la superficie del fragipán, que habría originado un horizonte E por degradación de un horizonte Bt que sobreyace al fragipán. En Canadá, Wang *et al.* (1974) determinaron CH de 9,5 a 17,2 mm/hora en fragipanes formados en till, mientras que en horizontes suprayacentes no endurecidos los valores oscilaban entre 42,5 y 82,5 mm/hora, siendo casi siempre franco arenosas las clases texturales en ambos tipos de horizontes, con predominio de la arena fina y el limo. En fragipanes de Quebec (Canadá) de Kimpe (1970) determinó una CH de 2 mm/hora y en los horizontes no endurecidos valores de 200 mm/hora. En Tailandia los valores oscilaron entre 0,04 y 1,8 mm/hora y en los horizontes suprayacentes entre 30 y 80 mm/hora (Phunmuang *et al.*, 2011). Esta diferencia en CH entre ambos sectores de los perfiles origina capas colgadas (episaturación) y procesos hidromórficos, incluida la ferrólisis. En fragipanes de Brasil la CH promedio de seis horizontes con fragipán fue de 14,3 mm/hora y en los horizontes sin fragipán de 35,1 mm/hora (Ribeiro Ramos *et al.*, 2015).

Resistencia mecánica. Según el sistema WRB el horizonte frágico debe tener una resistencia a la penetración a capacidad de campo de ≥ 4 MPa en ≥ 90 % de su volumen. Se considera que con resistencias mecánicas inferiores a 0,5 MPa no se afecta el crecimiento de las raíces (Hunt & Gilkes, 1992). En el Alto Valle del río Negro se encontró una resistencia a la penetración (penetrómetro de cono, humedad aprox. 1 atm.) de 3,8 MPa. en horizontes Cx a una profundidad de ~80 cm (Apcarian *et al.*, 2014). En fragipanes de Tailandia se determinaron valores más bajos que los exigidos por WRB: 0,46 a 2,02 MPa, mientras que en los horizontes suprayacentes este parámetro era ~0,2 MPa. En estos suelos se encontró correlación entre resistencia al corte y densidad aparente, que se debería a una mayor trabazón entre las partículas y por ello un mayor ángulo de fricción interna con densidades altas. (Phunmuang *et al.*, 2011). A título comparativo se indican algunos valores críticos de resistencia para distintos cultivos. En algodón, a partir de 0,72 MPa comienza a producirse problemas y el crecimiento cesa con valores superiores a 3,0 MPa (Taylor & Ratiff, 1969). En maíz, con valores de ~1,0 MPa la velocidad de crecimiento se reduce a la mitad. El crecimiento de las raíces de cebada se reduce un 50 % con una resistencia de 1,3 a 3,7 MPa (Willatt, 1984). En el caso de la avena el crecimiento se detuvo con valores entre 3,6 y 5,1 MPa (Ehlers *et al.*, 1983).

Propiedades químicas

Los fragipanes no poseen casi ninguna propiedad química específica que permita identificarlos de manera indubitable, como ocurre con otros horizontes endurecidos. La única característica de este tipo exigida en los sistemas TS y WRB es la ausencia de carbonatos. Otras propiedades comunes a muchos fragipanes son la acidez y el bajo contenido de materia orgánica, aunque tienen un margen de variación

amplio y no son definitorias. Se han propuesto algunos componentes como responsables del endurecimiento (por ej. Fe, Al, SiO₂) pero no son aplicables en todos los casos, como se indica en la sección “Génesis” (“Hipótesis química”).

El contenido de carbono orgánico es bajo, generalmente <1 %. Young (1992) considera que el límite superior en los fragipanes es 2 %. Ello se debería a la escasa penetración de las raíces en estas capas y a la profundidad en que se encuentran. En la mayoría de los casos la reacción de los fragipanes tiende a ser ácida. Autores de Minnesota y Michigan (EE.UU.) señalan que los fragipanes tienen pH más bajo que los horizontes supra- e infrayacentes. Los valores oscilan aproximadamente entre 4,6 y 6,8, influyendo el material original, siendo más bajos en tills ácidos –más comunes y con fragipanes más desarrollados– y más altos en tills calcáreos (Miller *et al.*, 1993; Weisenborn & Schaetzl, 2005a,b). En fragipanes del E y S de EE.UU. se encontraron valores similares (4,5-6,0), aunque con escasas diferencias con los horizontes suprayacentes. En esta región la capacidad de intercambio catiónico es media a baja (2 a 17 cmolc/kg) y la saturación con bases es variable: alta en los Alfisoles (55-90 %), baja a media en los Inceptisoles (13-35 %) y baja en Espodosoles y Ultisoles (5-26 %) (Bockheim & Hartemink, 2013). En la mayoría de los fragipanes de América del Norte y Europa los contenidos de sales solubles y sodio de intercambio son bajos, mientras que el carbonato de calcio está ausente o en escasa cantidad.

Al contrario de los suelos mencionados, varios de los horizontes con propiedades frágicas en la Argentina poseen niveles altos de sodio intercambiable y sales solubles, con pH desde ligeramente ácido a fuertemente alcalino, y además son calcáreos (Apcarian *et al.*, 2014; Irisarri y Ayala Torales, 1993; Imbellone *et al.*; Brest *et al.*; Schiavo *et al.*, este libro).

Génesis

El conocimiento de la génesis de los fragipanes es crítico para comprender sus propiedades inherentes y para el desarrollo de criterios adecuados para su clasificación taxonómica. Sin embargo, no existe acuerdo entre los investigadores sobre los mecanismos responsables de la formación de estos horizontes. Tampoco se conoce con certeza la influencia de los distintos factores de formación o de los procesos que han actuado. En este sentido, llama la atención que no exista un nombre que designe un proceso específico que describa la formación de fragipanes, como ocurre con otras capas endurecidas naturales en que existe un proceso o subproceso que es el punto de partida para el endurecimiento, por ejemplo: horizonte petrocálcico (calcificación), petrogípsico (gipsificación), duripán (silicificación), petroplintita (laterización); ortstein y horizonte plácico (podzolización). Lo que existen son procesos actuales o del pasado que se superponen a la formación del fragipán, más comunmente argiluviación e hidromorfismo.

Se han propuesto diversos mecanismos para explicar la génesis de estos horizontes y algunos autores han tratado de ordenarlos de acuerdo a distintos criterios. Para entender su origen, Calhoun (1980) propuso agrupar a los suelos con características frágicas del NE de EE.UU. en tres clases: 1) suelos con fragipanes verdaderamente genéticos; 2) suelos formados en till basal denso prácticamente inalterado y 3) suelos formados en till basal denso alterado pedogenéticamente. Franzmeier *et al.* (1989) clasifican las teorías sobre la base del momento en que el fragipán adquirió sus propiedades, a saber: 1) Propiedades heredadas (suelos formados en un till glacial). 2) Rasgos relictos (formados en una pedogénesis del pasado). 3) Formación rápida (producida en condiciones periglaciales que prevalecieron más allá del

límite glacial) y 4) Formación constante. Weisenborn & Schaetzl (2005b) consideran que la génesis de los fragipanes debe ser abordada en términos de tres componentes: 1) propiedades del material original; 2) procesos físicos asociados al desarrollo de alta densidad, empaquetamiento denso y estructura y 3) procesos químicos y físicos asociados al desarrollo de enlaces. Un modelo que intente explicar la génesis debe tener en cuenta tantos de estos componentes como sea posible. Bockheim & Hartemink (2013) resumen las distintas hipótesis en tres clases: físicas, químicas y físicoquímicas, algunas de las cuales se indican a continuación.

Hipótesis físicas. *Presencia de discontinuidades litológicas o contactos líticos.* Varios autores han demostrado que la mayoría de los suelos con fragipanes se han desarrollado en el contacto o en la zona de mezcla de dos unidades litológicas. Aún en suelos desarrollados sólo en loess se advierte un ligero cambio en la distribución de arena y limo sobre base no arcillosa. Estas características influyen al retardar la percolación de soluciones con cementantes como la sílice (Bockheim, 2003). Sin embargo, debe señalarse que esta hipótesis no es solamente física, sino que tiene un componente químico ya que involucra la concentración de la sílice.

Hidroconsolidación. Consiste en el reordenamiento de fábrica, densificación y reducción de volumen de sedimentos, generalmente loess, al estar sometidos a determinadas condiciones de sobrecarga y humectación hasta la saturación o cerca de ella. En estos casos, los sedimentos colapsan por su propio peso. La hidroconsolidación requiere 1) Cantidades adecuadas de arcilla (5-30 %); 2) Profundidad para que la sobrecarga produzca suficiente esfuerzo por comprensión (40-80 cm) y 3) Suficiente cantidad de agua que llegue a la profundidad antedicha (Bryant, 1989).

Ciclos de humectación y desecación. Según esta hipótesis los fragipanes experimentan ciclos de agrietamiento en seco y expansión en húmedo. Durante el período seco el limo y la arcilla de los horizontes suprayacentes se translocan por las grietas, definiendo una estructura en bloques subangulares. Luego, durante la fase húmeda la matriz se expande y esas partículas de las grietas se comprimen contra la matriz. Por una repetición de este proceso la densidad aumenta y la separación entre grietas disminuye, originando una estructura prismática gruesa. Sin embargo, algunos estudios micromorfológicos no han confirmado la sucesión de agrietamientos y rellenado en el interior de los prismas (Carlisle, 1954; Miller *et al.*, 1971; Bryant, 1989).

Rasgos periglaciales relictos de un permafrost. Las características del permafrost asociadas a procesos de segregación del hielo, contracción térmica y agrietamiento por desecación tienen gran semejanza con los rasgos estructurales de los fragipanes de regiones que estuvieron sometidas a condiciones periglaciales. Algunos de estos rasgos son: 1) la estructura laminar o lenticular o bien prismática que coincide con el patrón de segregación del hielo en “cuerpos” verticales y en lentes horizontales; 2) la presión engendrada por el crecimiento de las lentes de hielo explica la suavidad de los vacíos planares y cóncavos y la muy baja porosidad de los agregados; 3) la cantidad de hielo segregado es mayor en suelos mal drenados, y es allí donde los fragipanes están mejor expresados; 4) el límite superior abrupto del fragipán y su profundidad (aprox. 35-90 cm) se correlacionan bien con el nivel de permafrost (van Vliet & Langohr, 1981; Payton, 1992, 1993).

Compactación glacial y pedogénesis. El origen geológico o pedológico de los fragipanes en suelos formados en depósitos de till es motivo de controversias. La alta densidad aparente de los horizontes subsuperficiales de dichos suelos se ha atribuido a compactación por la masa del glacial; en estos casos los horizontes no se consideran fragipanes porque el proceso de compactación es más geológico

que pedológico. Sin embargo, en algunos suelos formados en till glacial (por ej.: estado de New York, EE.UU.) se ha observado que la densidad disminuye por debajo del fragipán, lo cual no sería de esperar si la compactación fuera por sobrecarga pues la densidad debería aumentar con la profundidad; por ello, en estos casos habría que considerar un origen pedológico (Grossman, 1954; Hanna *et al.*, 1975).

Hipótesis químicas. Se han mencionado diversos componentes como responsables del endurecimiento relativo de los fragipanes. Dentro de los más comunes figuran Fe, Si, Al y arcilla, actuando en forma aislada o en combinación de dos o más agentes. Los tres elementos son extraídos generalmente con: 1) *ditionito-citrato-bicarbonato* que extrae prácticamente todas las formas libres cristalinas y no cristalinas (Fe_d , Si_d , Al_d); 2) *oxalato de amonio ácido*, que extrae las formas no cristalinas (amorfos, complejos orgánicos) (Fe_o , Si_o , Al_o) y 3) *pirofosfato* de Na, que extrae Fe y Al asociados a la materia orgánica.

Respecto al Fe, en muchos casos se ha encontrado una relación directa en los perfiles entre este elemento y la presencia de fragipanes. En horizontes Btx de Frigidudalfes de Inglaterra Payton (1992) encuentra contenidos de Fe_d significativamente superiores (0,84-1,10 %) a los de los horizontes Eb/Eg suprayacentes (0,12-0,47 %), atribuibles a una co-migración de arcillas y óxidos de Fe. En dos catenas en Indiana, EE.UU. Steinhardt & Franzmeier (1979) determinaron que los contenidos de Fe_d fueron 0,97 % en los horizontes Bx y 0,84 en los horizontes supra- e infrayacentes sin características de fragipán. En ambas catenas los contenidos de Fe_d fueron ligeramente mayores en los suelos de la parte inferior con drenaje pobre. En Albeluvisoles (ahora Retisoles) de Polonia, Szymański *et al.* (2011) los horizontes con fragipán tienen contenidos promedio de Fe_d de 0,8 %, disminuyendo a 0,57 % en los horizontes eluviales e iluviales no endurecidos. A pesar de esta diferencia significativa, los autores consideran que la alta densidad de los fragipanes sería heredada del material original y se acentuaría por hidroconsolidación antes de la pedogénesis. En horizontes Btx y Btxg de ese país se encontraron valores similares de Fe_d (~0,7-0,8 %), marcadamente superiores a los horizontes supra- e infrayacentes (Kołodzyńska-Gawrysiak *et al.*, 2017). En los fragipanes del SE de Córdoba se atribuye el endurecimiento a ferriargilanes que enlazan las partículas de esqueleto y llenan los espacios del empaquetamiento (Schiavo *et al.*, 1995, este libro).

En otros casos no se ha encontrado relación directa entre Fe y fragipanes. Así, de Kimpe *et al.* (1972) encuentran contenidos promedio de Fe_d significativamente menores en horizontes Bx de Gleisoles de Canadá (0,69 %) respecto a los horizontes sin fragipán (1,62 %). Algo similar ocurre en suelos de Illinois (EE.UU.) donde los contenidos de Fe_d promedio son 1,50 y 1,76 % en horizontes Bx y horizontes suprayacentes, respectivamente (Wilson *et al.*, 2010). Wang *et al.* (1974) en Canadá y Park *et al.* (2006) en EE.UU., encuentran valores similares en horizontes Bx y en horizontes B sin fragipán. Weisenborn & Schaetzl (2005a,b) en Michigan tampoco encuentran asociación entre las distintas formas de Fe, Al y Si y el carácter de fragipán (o protofragipán), aunque no descartan una combinación de estos elementos.

En los primeros trabajos sobre estos panes (Winters, 1942) se consideraba a la sílice como un agente cementante, considerando que pequeñas cantidades poseen ese efecto entre las partículas. Posteriormente, Grossman & Carlisle, (1969) utilizando varios extractantes, mostraron que no había mayor concentración de sílice en los horizontes endurecidos. No obstante, Ajmone-Marsan & Torrent (1989) calculan que hay suficiente sílice para mantener las partículas unidas cuando la relación Si_d/Fe_d es cercana a 0,04.

Steinhardt & Franzmeier (1979) encontraron en fragipanes de Indiana (EE.UU.), valores medios de Si_d de 0,08 % (0,05 % en horizontes sin fragipán) Los autores consideran que son valores bajos, pero que

alcanzan siempre el máximo en los horizontes con fragipán. Distintas investigaciones demostraron que el Si se puede disolver en horizontes superiores ácidos y redepositarse en horizontes inferiores donde aumenta el pH. Además, las soluciones que percolan deben concentrarse por capas menos permeables, tales como las discontinuidades litológicas. Influye asimismo el desecamiento estacional del subsuelo y absorción por la vegetación arbórea. Wang *et al.* (1974) describen en Canadá dos suelos (Fragiacuod y Fragiortod), en los que el fragipán se extiende entre los 64 y 153 cm y su carácter quebradizo sería originado por puentes de arcilla.

En fragipanes de Indiana, Duncan & Franzmeier (1999) postulan que su alta resistencia a la ruptura se debe principalmente a enlaces con materiales ricos en Si_d . Encuentran alta correlación positiva con la resistencia a la ruptura cuando la relación molar $\text{Si}_d / (\text{Si}_d + \text{Al}_d)$ es $>0,5$ y señalan además que los contenidos de Si_d son aproximadamente un décimo de los de Fe_d . Wilson *et al.* (2010) encuentran en suelos con características frágicas de Illinois (EE.UU.) valores promedio de Si_d de 0,198 %, algo mayores a los hallados en los horizontes sin fragipán (0,12%); asimismo, las relaciones molares Si_d/Fe_d y $\text{Si}_d/(\text{Si}_d + \text{Al}_d)$, utilizadas por algunos autores como indicadores de agentes cementantes en fragipanes, aumentan en los horizontes con propiedades frágicas en relación con los horizontes suprayacentes indicando abundancia de la sílice asociada a los óxidos de Fe pedogenéticos.

Franzmeier *et al.* (1989) proponen un mecanismo con participación importante de la sílice en fragipanes del Medio Oeste de EE.UU. formados en loess, con vegetación arbórea y exceso de agua en invierno y déficit en verano. Incluye: 1) Meteorización de minerales silicatados, especialmente feldspatos ricos en Na, en condiciones ácidas con liberación de H_4SiO_4 , Na, óxidos hidratados de Al y Fe y otros componentes. 2) Adsorción de óxidos e hidróxidos de Fe y Al sobre arcillas y su traslocación. 3) Movimiento descendente de la solución del suelo en invierno y principios de primavera, retenida por horizontes menos permeables donde queda casi saturada con H_4SiO_4 . 4) Absorción de agua por los árboles en verano excluyendo activamente el H_4SiO_4 , que se concentra en los poros menores al aumentar el desecamiento y 5) Formación de puentes de polímeros de SiO_2 que tienden a hacerse más fuertes en sucesivos ciclos.

Hipótesis físicoquímica. La hipótesis físicoquímica pertenece a Weisenborn & Schaetzl (2005b) y consiste en una combinación de reorganización de poros (hidroconsolidación y maduración) y enlace por compuestos amorfos. Se trata del llamado “modelo de Michigan” por haber sido elaborado en ese estado. El modelo presupone las siguientes condiciones iniciales en un material original profundo: estructura con contactos granulares abierta; texturas medias (5-40 % arcilla), material fino que se debilita al humedecerse, ausencia de zonas de saturación con agua persistentes, presencia de una discontinuidad litológica o de meteorización cerca de una potencial zona de colapso y bajo COLE. En dichas condiciones se origina una zona colapsable que, cuando se humecta hasta casi la saturación, colapsa por su propio peso, originando un empaquetamiento denso de los granos. Durante el secado se produce la “maduración física” que da origen a un fragipán incipiente o “proto-fragipán”. Si continúa la pedogénesis con procesos de humectación-secado, acidificación, argiluviación, pervección (traslocación de limo) y podzolización se forma una discontinuidad de meteorización entre un solum superior y uno inferior. La interacción entre los productos de meteorización del solum superior y el material menos meteorizado subyacente produce precipitación de agentes ligantes amorfos durante la desecación, generándose un fragipán u horizonte con propiedades frágicas. Cuando el fragipán se convierte en un acuitardo y se forman capas colgadas estacionales se desencadenan procesos de redox, eluviación, microerosión y

argiluviación, desarrollándose un horizonte Ex por encima del fragipán y entre caras de prismas. La zona eluvial puede invadir el fragipán y producir su degradación y en casos extremos su destrucción.


Discusión. Si bien todos los fragipanes poseen algunos rasgos comunes como consistencia dura en seco, quebradiza en húmedo y desleimiento en agua, diferirían en otras propiedades morfológicas, físicas y químicas por haber evolucionado en diferentes materiales originarios y posiciones en el paisaje tales como ambientes aluviales, coluviales, periglaciales, etc. (Wilson *et al.*, 2010). En este sentido Lindbo & Veneman (1989) afirman que es posible que varios procesos diferentes produzcan un producto final similar: el fragipán. De esto se deduce que los horizontes Bx de similar morfología podrían formarse de distintas maneras, por lo cual habría que invocar la Ley de Equifinalidad (Buntley *et al.*, 1977), tomada de la Teoría General de Sistemas, según el cual en un sistema abierto resultados iguales pueden deberse a causas diferentes.

Sin embargo, la cuestión también se puede enfocar de otra manera. Se podría afirmar que no existe una entidad singular llamada “fragipán”, sino que existen diversas capas u horizontes que tienen en común el endurecimiento reversible, desleimiento en agua y alta densidad, pero otras propiedades pueden ser distintas, (estructura, textura, cementantes, espesor, etc.) porque los factores de formación y por consiguiente los procesos pedogenéticos son asimismo diversos. Coincide con esto Hallmark (2000), quien afirma que una de las razones de la diversidad de ideas sobre la génesis es que pueden existir varios tipos de horizontes incluidos en el concepto de fragipan, cada uno con sus propios procesos de formación.

Las clasificaciones se han empeñado en darle a todos estos horizontes el mismo nombre, especialmente la clasificación moderna de EE.UU., la cual desde sus primeras ediciones (Séptima Aproximación, 1960) hasta la actualidad (Soil Taxonomy, 1999) repite la frase “la genesis de los fragipanes es oscura”. Habría que decir al respecto que no se trata que la génesis sea oscura sino que hay muchas génesis.

Sin embargo, algunos autores han advertido esta diversidad y han propuesto una diferenciación en diversas “variantes” de fragipanes. Así, FitzPatrick (1980) establece en su clasificación dos clases: *Ison*, originado por desaparición de un permafrost precedente y formación de revestimientos de limo, y el *Fragon*, de génesis desconocida (las características de ambos horizontes se indican en la sección “Clasificación”). Duchaufour (1977) distingue dos tipos de fragipanes similares a los antes mencionados: uno antiguo, un paleosuelo, en suelos de evolución policíclica y compleja, heredado de procesos periglaciales y otro más reciente, pedogenético, resultante de la degradación de la estructura en materiales limosos. Bryant (1989) afirma que en la mayoría de los casos las definiciones de fragipanes incluyen: carácter quebradizo, texturas medias, alta densidad aparente respecto a los horizontes suprayacentes y bajo contenido de materia orgánica, siendo difícil describir características adicionales aplicables a todos los horizontes clasificados como fragipanes; así reconoce que puede haber distintos “tipos” de fragipanes, cada uno con sus características propias, como por ejemplo, los horizontes Bx con estructura prismática gruesa con caras de agregados decoloradas o gleizadas, para los cuales, según este autor, se debería reservar el término “fragipán”. Asimismo, en un mismo perfil pueden coexistir “fragipanes iluviales” y “fragipanes eluviales” formados en horizontes B y E, respectivamente.

Por otro lado, existen variaciones en el grado de expresión de los fragipanes por estar en diferentes estadios de su evolución. Así, se han diferenciado “fragipanes incipientes” (Grossman *et al.*, 1959) y “protofragipanes” (Lindbo *et al.*, 1994; Ciolkosz & Waltman, 2000; Weisenborn & Schaetzl, 2005a,b).

Smith & Daniels (1989) diferencian fragipanes de las llanuras costeras del SE de EE.UU. según su grado de desarrollo en tres categorías: débiles, moderados y fuertes, principalmente sobre la base de la densidad aparente y el porcentaje de volumen con carácter quebradizo. Así, consignan los siguientes valores medios e intervalos: *Débiles*: 1,72 Mg m⁻³ (1,61-1,78), 10-25 %; *Moderados*: 1,73 Mg m⁻³ (1,67-1,93), 25-75 % y *Fuertes*: 1,98 Mg m⁻³ (1,93-2,04), 50-100 %. Implícitamente, el sistema TS reconoce la presencia de panes con mayor o menor grado de desarrollo al diferenciar el horizonte de diagnóstico “fragipán” y las “propiedades frágicas” **Tabla 2** *³. Ucha *et al.* (2002), al referirse a fragipanes del estado de Bahía (Brasil), afirman que constituyen una fase intermedia en el proceso de formación de un duripán y por ello deberían denominarse “proto-duripanes”. En México, Acevedo Sandoval & Flores Román (2000) describen fragipanes formados a partir de materiales volcánicos a los que denominan “fragipanes blancos”; se hallan asociados a duripanes y ambos suelos se denominan popularmente “tepetates”. Otras denominaciones que reciben estos horizontes en otros países se han indicado en la sección “Panes con materiales volcánicos”.

De todas maneras, consideramos que en el futuro se debería tener en cuenta la gran diversidad de factores de formación, procesos pedogenéticos involucrados y propiedades para establecer sobre esas bases una nomenclatura diferenciada, pues las denominaciones actuales de los “tipos” de fragipanes son insuficientes e imprecisas, debiendo ampliarse y formalizarse.

Clasificación

La presencia de fragipanes no ha sido reconocida en ningún sistema en el nivel taxonómico más alto, como ocurre por ejemplo con otros horizontes endurecidos como el duripán o la petroplintita, en el sistema WRB (*Durisoiles* y *Plintosoiles*). En este y en otros sistemas se incluyen en niveles inferiores como los de Estados Unidos (Taxonomía de Suelos), Canadá, Nueva Zelanda y Brasil, entre otros. Según Hudnall & Williams (1989) el fragipán es el único horizonte de diagnóstico que no tiene un procedimiento de laboratorio para su identificación, debiéndose utilizar para ello una combinación de características de campo.

Clasificaciones de Estados Unidos. Los Estados Unidos ha sido el país en que se lo reconoció por primera vez en el nuevo sistema de clasificación que comenzó a elaborarse a principios de la década de 1950. A partir de esa fecha el Servicio de Conservación de Suelos advirtió la insuficiencia del sistema vigente para ordenar en niveles superiores las aproximadamente 5500 series existentes en esa época. Se resolvió así crear un nuevo sistema sobre bases totalmente nuevas, comenzado con esquemas provisionales denominados “Aproximaciones”.

La Primera Aproximación de 1951 tuvo escasa difusión y tenía poca semejanza con el sistema actual. Un ejemplo es el quinto orden que agrupaba a los suelos con panes endurecidos denominado *Durobods* (donde la terminación *bod* derivaría del alemán *Boden*, suelo), el cual se subdividía en cuatro subórdenes: *Natrisols*, *Planosols*, *Durosols* y *Fragisols*. De todas maneras, este taxón fue efímero pues en la segunda aproximación fue suprimido y los mencionados subórdenes se distribuyeron en grandes grupos de otros órdenes.

El Anuario de Agricultura de EE.UU. de 1957 (USDA, 1957) incluía una definición, que podría considerarse oficial, de los fragipanes: “Panes o capas densas y quebradizas cuya dureza se debe principalmente a densidad o compactación extremas más que a un alto contenido de arcilla o a cementación.

Los fragmentos aislados del fragipán son friables, pero el material *in situ* es tan denso que las raíces no lo pueden atravesar y el agua circula a través de él muy lentamente debido al pequeño tamaño de los poros”.

La Séptima Aproximación (Soil Survey Staff, 1960) tuvo mayor difusión que las anteriores versiones y en la Argentina se la tradujo al castellano (INTA, 1962). En esta versión se incluían a los fragipanes dentro de los panes (horizontes endurecidos) junto con los duripanes. Se describían sus características generales, pero no se establecían requerimientos estrictos. Los autores reconocen que la “génesis es oscura” y que se requieren mayor conocimientos para dilucidarla; sin embargo, consideran que los fragipanes son horizontes de suelo basados en las siguientes evidencias: a) son casi siempre paralelos a la superficie; b) el límite superior está generalmente entre 45 y 60 cm de profundidad; c) se encuentran en distintos materiales que tienen en común texturas francas, con cantidades importantes de limo o arena muy fina; d) subyacen a diversos horizontes (espódico, argílico, cámbico o álbico), pero no se encuentra en materiales calcáreos; e) en los perfiles bisecuales el fragipán se puede formar en el horizonte argílico más profundo y aún en el horizonte eluvial que separa a dos horizontes B.

Posteriormente, se hicieron ajustes a la Séptima Aproximación hasta que en 1975 se consideró que el sistema estaba suficientemente consolidado y se publicó la versión completa denominada “*Soil Taxonomy*” o Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1975). En esta versión se incluía a los fragipanes dentro de los horizontes de diagnóstico subsuperficiales y se indicaban con mayor precisión las características de un fragipán: a saber: 1) Puede subyacer a un horizonte eluvial. 2) Si hay un horizonte argílico o cámbico por encima de un fragipán, comúnmente hay un horizonte E entre ambos. 3) Tiene vetas blancuecinas verticales que forman un patrón poligonal visto en planta, si el suelo no está saturado durante períodos prolongados. 4) La matriz entre vetas es muy firme cerca del punto de marchitez y quebradiza cerca de la capacidad de campo. 5) Las raíces secundarias están prácticamente ausentes en las partes quebradizas del fragipán. 6) La textura es más fina que arenosa fina, normalmente es franca, franco limosa o franco arenosa y el contenido de arcilla es generalmente <35%.

Según el concepto clásico de la escuela norteamericana, un fragipán es un horizonte de diagnóstico denso subsuperficial que puede constituir una severa limitación para el crecimiento de las plantas. Su identificación no siempre resulta sencilla porque algunas propiedades requeridas incluyen una gran variedad de tipos, como por ejemplo la estructura, y otras más específicas como el carácter quebradizo. De todas maneras, hay acuerdo entre diferentes autores europeos y norteamericanos que los fragipanes poseen un conjunto de propiedades morfológicas tales como: estructura prismática muy gruesa o poliédrica, lenguas verticales de material grisáceo a lo largo de las caras de los agregados, separadas entre sí más de 10 cm, formando un diseño poligonal en planta. Estas lenguas poseen barnices de arcilla y revestimientos de limo. Las acumulaciones de hierro y manganeso se encuentran entre las lenguas decoloradas y en el interior de los agregados. La matriz en el interior de los prismas posee consistencia en seco firme o muy firme y quebradiza en húmedo más del 60 %. Muy pocas raíces se encuentran en las lenguas verticales. El material en el interior de los agregados se deslie en agua. Las texturas son más finas que arenosa fina con menos del 35% de arcilla.

A partir de la versión 1996 de Claves de Taxonomía de Suelos (Keys to Soil Taxonomy) se establecen cinco características que debe reunir necesariamente el fragipán para ser considerado como tal, ligeramente modificada en la versión de 2014 **Tabla 2** *4.

En la versión 2014 de TS la presencia de fragipanes se reconoció en los órdenes *Alfisolos*, *Entisolos*, *Inceptisolos* y *Ultisolos* y en los siguientes grandes grupos: *Fragiacuulfes*, *Fraglosudalfes*, *Fragiudalfes*, *Fragixeralfes*, *Fragiacuodes*, *Fragihumodes*, *Fragiortodes*, *Fragiacueptes*, *Fragiudeptes*, *Fragixereptes*, *Fragiacuultes* y *Fragiudultes*. En los Alfisolos y Ultisolos el fragipán debe tener cutanes de arcilla de ≥ 1 mm de espesor en algunas de sus partes.

Además de los fragipanes, Taxonomía de Suelos reconoce las “*propiedades frágicas del suelo*” que se aplica a horizontes o capas que poseen las características esenciales de un fragipán pero no incluye exigencias sobre espesor y estructura, como se indica para el horizonte de diagnóstico **Tabla 2**.

Tabla 2: Requerimientos de fragipanes y de propiedades frágicas según Taxonomía de Suelos y el horizonte frágico según el sistema WRB.

Table 2: Required characteristics of fragipans and fragic properties according to Soil Taxonomy and the fragic horizon according to the WRB system.

Taxonomía de Suelos (2014)		Sistema WRB (2015). Horizonte frágico.
Fragipán. <i>La capa debe poseer la totalidad de las siguientes características:</i>	Propiedades frágicas. <i>Los agregados deben poseer:</i>	
Espesor: ≥ 15 cm.		Espesor ≥ 15 cm.
Evidencias de pedogénesis en el horizonte o en caras de agregados.	Evidencias de pedogénesis en el interior de agregados o, al menos, sobre su superficie.	Evidencias de alteración según definición del horizonte cámbico*, por lo menos en caras de agregados.
Estructura prismática, columnar o en bloques, muy gruesa, de cualquier grado. Si es débil puede tener cualquier tamaño o puede ser masivo. Separación entre agregados ≥ 10 cm.	Restricción a la penetración de las raíces en la matriz cuando el agua del suelo está a capacidad de campo o cercana a ella.	Las unidades estructurales no permiten el paso de raíces. La separación entre esas unidades debe ser ≥ 10 cm. (No se especifica tipo de estructura).
Fragmentos ≥ 5 -10 cm de diámetro (de $>50\%$ de la capa) se deslíen al sumergirlos en agua.	Fragmentos de 5-10 cm de diámetro secos al aire provenientes de la fábrica natural se deslíen al sumergirlos en agua.	Fragmentos ≥ 5 -10 cm de diámetro (de $>50\%$ de la capa) se deslíen en agua antes de los 10 minutos.
En $\geq 60\%$ del volumen, la resistencia a la ruptura es firme o muy firme, es quebradizo cerca de capacidad de campo y carece prácticamente de raíces.	Clase de resistencia a la ruptura firme o más firme y quebradizo cuando el agua del suelo está a capacidad de campo o cercana de ella.	La resistencia a la penetración en capacidad de campo es ≥ 4 MPa en $\geq 90\%$ del volumen.
.No se produce efervescencia con HCl diluido.		No se produce efervescencia con HCl 1 M.
		No se cementa luego de humectaciones y desecaciones sucesivas.
		$<0,5$ % de carbono orgánico.


*Criterios de diagnóstico del horizonte cámbico (simplificados): 1) Evidencias de alteración pedogénica en alguna de las siguientes formas: a) Comparando con la capa subyacente (sin discontinuidad lítica): matiz más rojo o intensidad (chroma) más alta en húmedo; o contenido mayor de arcilla; o evidencias de eliminación de carbonatos o yeso.; o b) Comparando con la capa suprayacente (sin discontinuidad lítica): Estructura de suelo en $\geq 50\%$ del volumen de la tierra fina y matiz más rojo, o luminosidad (value), o intensidad (chroma) más altos en húmedo; y 2) Textura franco arenosa o más fina; y 3) Espesor ≥ 15 cm.

Los suelos de los cuatro órdenes mencionados que no reúnen las exigencias de fragipán, pero que poseen condiciones frágicas, se reconocen a éstas a nivel de subgrupo. Existen así los subgrupos *frágico* y *fragiácuico* aplicados a distintos grandes grupos de los cuatro órdenes mencionados.

En total se reconocen 35 subgrupos, encontrándose una proporción importante (16) en los Alfisoles. En estos subgrupos las propiedades frágicas deben presentarse en $\geq 30\%$ del volumen de una capa ≥ 15 cm de espesor, cuyo límite superior se encuentra dentro de los primeros 100 cm. Si dicha capa aparece por debajo de esta profundidad, las propiedades frágicas deben ocupar $\geq 60\%$ de su volumen. Los subgrupos *fragiácuicos* deben cumplir las condiciones antedichas y además tener condiciones ácuicas y algunos rasgos hidromórficos, por ejemplo, intensidades (cromas) ≤ 2 , a distintas profundidades.

Adicionalmente se indica que los regímenes en que se desarrollan todos estos suelos son údico, xérico y ácuico y algunos fragipanes suelen poseer mayor densidad aparente que los horizontes su-prayacentes (entre 1,65 a 2,15 Mg m⁻³ en el noreste de Estados Unidos) y a veces decrece debajo del fragipán.

El sistema WRB (World Reference Base for Soil Resources). El sistema FAO (1974), antecesor del actual sistema WRB, no reconocía a los fragipanes ni en el primer ni el segundo nivel. Se consideraba que la lista era incompleta porque se utilizó para elaborar la leyenda del mapa mundial de suelos en escala 1:5.000.000, y sólo incluyó unidades suficientemente grandes para ser representadas en el mapa.

La última versión del sistema WRB (IUSS Working Group WRB, 2015) distingue al *horizonte frágico* definido como un horizonte subsuperficial natural no cementado, con una agregación y porosidad tales que las raíces y el agua sólo pueden penetrar entre caras de agregados y grietas. Por su carácter natural excluye los pisos de arados o capas densificadas por tránsito. Las características que debe poseer se indican en la **Tabla 2** *⁵. Además de dichas exigencias este horizonte puede tener otras propiedades, por ejemplo: estructura prismática y/o en bloques; las partes internas de los agregados pueden tener alta porosidad total pero, debido a que las partes externas son densas, no hay continuidad entre los poros intragregados, los interagregados y las fisuras. Como consecuencia de esto, 90% o más del volumen de suelo no puede ser explorado por las raíces ni atravesado por el agua.

La textura es comúnmente media (clases franca, franco limosa, etc.), aunque no se excluyen las clases areno franca y arcillosa, en este último caso la clase mineralógica es predominantemente caolinítica. Los agregados secos son duros a extremadamente duros, en húmedo son firme a extremadamente firmes y quebradizos (se quiebran súbitamente y no se deforman lentamente bajo presión).

Puede subyacer, aunque no siempre directamente, a materiales álbicos, y horizontes cámbicos, espódicos o árgicos. Puede presentar lenguas albelúvicas o propiedades réticas, especialmente en la parte superior, como así también condiciones reductoras y propiedades estágnicas. No existe ningún Grupo de Suelo de Referencia (primer nivel) definido por la presencia de fragipanes. Aparece en el segundo nivel como calificadores principales en Retisols, Cambisols, Planosols, Stagnosols, Umbrisols, Acrisols, Lixisols, Alisols y Luvisols y como calificadores suplementarios en Andosols y Podzols. En versiones anteriores caracterizaba en particular a los Albeluvisoles (ahora Retisoles), por ejemplo, en Polonia donde se identificaron *Stagnic Fragic Albeluvisols (Siltic)* (Szymański *et al.*, 2011). Un suelo con fragipán sepultado por dos coluvios en Polonia fue clasificado como *Dystric Cambisol (Colluvic, Siltic) over Dystric Cambisol (Colluvic, Siltic) over Stagnic Fragic Umbrisol (Anthric, Siltic)*; otro suelo de la misma región sepultado por un solo coluvio se clasificó como *Cambic Umbrisol (Anthric, Colluvic) over Luvic Stagnic Phaeozem (Siltic, Fragic)* (Kołodzyńska-Gawrysiak *et al.*, 2017). Ejemplos de suelos con

fragipanes clasificados por el sistema WRB en la Región Pampeana se pueden ver en Imbellone *et al.* (este libro).

Otras clasificaciones. En la clasificación de Canadá (Soil Classification Working Group, 1998) el concepto de fragipán coincide en gran parte con el de Taxonomía de Suelos. Es un horizonte subsuperficial identificado como Bx o BCx. Tiene alta densidad aparente, consistencia firme y quebradiza en húmedo y dura a extremadamente dura en seco. Su textura es generalmente media (franco). Posee a menudo planos de fractura decolorados que separan prismas muy gruesos con estructura secundaria laminar. Los agregados secos se deslíen en agua. Tienen en general límite superior abrupto o claro y límite inferior difuso. En algunos casos poseen revestimientos de arcilla (horizonte Btx). Una característica particular es que comúnmente se debe excavar hasta alrededor de 3 m para exponer claramente el límite inferior del fragipán.

La nueva clasificación francesa (*Référentiel Pédologique*; AFES, 2008) no contempla ningún horizonte de referencia que corresponda a un fragipán. Sólo se utiliza el sufijo “x” que se aplica a distintos horizontes (Ex, Sx, BTx) que poseen caracteres frágicos, aunque éstos no son definidos; asimismo, se emplean los calificativos “*fragique*” (frágico), “*à fragipan*” (con fragipán) o “*bathyfragique*” (batifrágico o con fragipán profundo) que se utilizan, junto con otros calificativos, para definir a un suelo con mayor precisión en *Types* (Tipos), por ejemplo: “*LUVISOL DÉGRADÉ glossique, à fragipan*” (LUVISOL DEGRADADO glósico con fragipán).

En el Manual de Clasificación de Suelos del Brasil (Embrapa, 2006) se define al fragipán (“*fragipã*”) como un horizonte mineral subsuperficial, generalmente de textura media, con contenidos muy bajos de materia orgánica y alta densidad aparente en relación con los horizontes suprayacentes; tiene consistencia dura, muy dura o extremadamente dura en seco. En húmedo es débil o moderadamente quebradizo y los agregados tienden a romperse súbitamente al presionarlos. Cuando se sumerge en agua, un fragmento seco se fractura y deslíe en relativamente poco tiempo. La presencia de fragipanes está prevista en tres de los trece órdenes (primer nivel): Argissolos, Espodossolos y Neossolos; se indica en el cuarto nivel (subgrupo) mediante el adjetivo “*fragipânico*”, acompañado cuando corresponde por otros adjetivos adicionales (*planossólico*, *espódico*, etc.); por ejemplo: *Argissolo amarelo distrocoeso fragipânico plíntico*; *Espodossolo ferrilúvico órtico fragipânico*.

La clasificación de Nueva Zelanda (Hewitt, 1998) reconoce el adjetivo “*fragic*” utilizado en el segundo y tercer nivel taxonómico (grupo y subgrupo, respectivamente) de algunos órdenes (primer nivel); dos ejemplos son el grupo *Fragic Pallic Soils* y el subgrupo *Fragic Allophanic Brown Soils*.

El sistema de FitzPatrick (1971) reconoce dos horizontes de referencia con características de fragipán: *Fragón* (simbolizado Fg) e *Isón* (In). El Fragón tiene textura franca o más gruesa, estructura lenticular, laminar o bien es masivo; consistencia firme a dura; está compactado o levemente cementado, se rompe súbitamente al ser presionado entre los dedos, el pH varía de 5,5 a 7, no posee (Ca/Mg)CO₃. Desde el punto de vista micromorfológico es masivo, tiene poros escasos a ocasionales, dominios ausentes y revestimientos de arcilla raros a ocasionales. El Isón (del inglés antiguo *is*, hielo) comparte varias de las propiedades del Fragón (textura, estructura, consistencia, forma de ruptura, reacción); se diferencia de éste en que el (Ca/Mg)CO₃ puede variar de ausente a dominante y a nivel micromorfológico posee revestimientos de limo prominentes sobre caras superiores de clastos y a veces sobre paredes de poros. La otra diferencia es la génesis: desconocida para el Fragón y originada por desaparición del hielo de un permafrost del pasado en el Isón.

Distribución de fragipanes

Distribución mundial. Los fragipanes han sido estudiados con mayor intensidad en los Estados Unidos, tal vez debido a que allí fueron descriptos por primera vez, a que los levantamientos cartográficos son más antiguos y su amplia difusión areal, calculada en alrededor de 200.000 km². Bockheim & Hartemink (2013) identifican 362 series distribuidas en 28 estados, en su mayor parte en las regiones más húmedas del Este (con regímenes údico y ácuico), especialmente en los estados de Pennsylvania, Mississippi, Nueva York, Missouri y Kentucky, donde cubren una superficie de alrededor de 100.000 km².

En América también se han descripto fragipanes en México (Peña & Zabrowski, 1992; Flach *et al.*, 1994), Brasil (Filizola *et al.*, 2001; Souza dos Santos Moreau *et al.*, 2006; Ribeiro Ramos *et al.*, 2015) y en Canadá (de Kimpe, 1970; Wang *et al.*, 1974; Witty & Knox, 1989), donde cubren una superficie de alrededor de 5000 km² principalmente en las provincias marítimas del Este, en especial Terranova y Nueva Escocia.

En Europa tienen difusión en diversos países, varios de ellos afectadas por el periglacialismo del último Máximo Glacial: Escocia (FitzPatrick, 1956), Francia y Bélgica (Lozet & Herbillon, 1971; Van Vliet & Langhorn, 1981), Suecia (Lyford & Troedsson, 1973), Inglaterra (Payton, 1992, 1993), Rusia (Lapenis *et al.*, 2004), Italia (Certini *et al.*, 2007), Polonia (Szymański *et al.*, 2011; Kołodyńska-Gawrysiak *et al.*, 2017) y España (Gallardo *et al.*, 1988). Existen también estudios en Nueva Zelanda (Smalley & Davin, 1982), Irán (Eghbal *et al.*, 2012) y Tailandia (Phunmuang *et al.*, 2011).

Witty & Knox (1989) informan sobre la superficie (en km²) ocupada por asociaciones de suelos que incluyen fragipanes o sus fases basados en datos de FAO-UNESCO (1974) o aportados en forma personal por otros autores: Nueva Zelanda 23170, Checoslovaquia 5320, Rumania 3740, Polonia 360 y Hungría 170.

Distribución en la Argentina. La primera mención de fragipanes en la Región Pampeana podría atribuirse a Bonfils *et al.* (1960) quienes, en un estudio regional de la Pampa Arenosa, describen dos series situadas en áreas deprimidas correspondientes a “suelos planosólicos” o de “pradera planosólicos” (serie Carlos Tejedor) y a “solonetz solodizados” (serie Rufino).

La serie Carlos Tejedor tiene debajo del horizonte A una capa más clara (A_2/A_3) y luego un “horizonte planosólico” (B_{2m}) situado entre los 40 y 50 cm de profundidad, el cual posee las siguientes características: “*infiltraciones de materia orgánica y manchas ferruginosas, franco arenoso, duro (fragipán), masivo...*”. Le subyace un horizonte B_{3ca} que llega a 100 cm, también masivo y duro. La serie se insinúa dónde comienza una depresión y las características planosólicas del horizonte B se tornan más pronunciadas a medida que se descende en el terreno. La serie fue establecida en el partido homónimo en 1956 y no correspondería a la actual serie Carlos Tejedor, con la cual sólo tiene similitud parcial.

La serie Rufino tiene similitudes con la serie Carlos Tejedor, de la cual se diferencia por tener debajo del horizonte A_2/A_3 , entre los 28 y 47 cm, un horizonte B_2 franco arcillo arenoso y plástico; a éste le subyace entre los 47 y 90 el horizonte B_{2mca} definido de la siguiente manera: “*franco arenoso, duro a quebradizo (fragipán), estructura laminar? poco definida, manchas negras de manganeso: nódulos calcáreos, medianamente salino; reacción netamente alcalina...*”. Este horizonte tiene mayor alcalinidad (pH 8,8, PSI 17,6) que el correspondiente a la serie Carlos Tejedor (pH 6,9, PSI 11,2). La serie, establecida en 1957, tiene difusión en el sur de Santa Fe y extremo noroeste de la provincia de Buenos Aires.

En un mapa simplificado de la distribución de los suelos de la Región Pampeana, en que utiliza la clasificación de EE.UU. antigua (Thorp & Smith, 1949), Bonfils (1966) describe dentro de los Suelos Hidromórficos a los Suelos Planosólicos, algunos de los cuales pueden tener un fragipán (horizonte C1x) a mayor o menor profundidad. Incluye a estos suelos en una unidad cartográfica denominada “Planosoles y suelos halo-hidromórficos” situada en la parte central de la Pampa Arenosa. Según el nuevo sistema (Séptima Aproximación; Soil Survey Staff, 1960) este autor afirma que los Planosoles corresponderían a Argialbolls, Albaqualfs y *Fragiaqualfs*.

En un estudio realizado por el Instituto de Pedología (Miaczynski & Ferrer, 1973) en un sector de 45.000 ha de los partidos de Daireaux y Bolívar, se describe la serie Don Roque, cuya secuencia de horizontes es: A1-A2/A3-B2t-B3/C1x-IIC2. El horizonte afectado por el sufijo “x” se encuentra entre los 53 y 100 cm, tiene textura franco arcillo arenosa, es masivo con tendencia a laminar y es duro en seco. El horizonte subyacente (IIC2) tiene estructura laminar fina con revestimientos de materia orgánica entre láminas. El suelo se encuentra generalmente formando anillos alrededor de depresiones alargadas con orientación SO-NE. Se ha clasificado como Solonetz solodizado según la clasificación antigua de EE.UU. (Thorp & Smith, 1949), equivalente a Typic Natralboll (Séptima Aproximación) o Mollic Solonetz (FAO).

A partir de la clasificación a nivel de gran grupo del mapa de suelos de la República Argentina en escala 1:500.000 del INTA (1990) se ha calculado la superficie de los suelos con fragipán en distintas provincias, que llega a 1480 km². Los suelos más difundidos son los Fragiacualfes con una superficie de 621 km², distribuidos en Córdoba (447 km²), Chaco (134 km²) y Buenos Aires (39 km²). Los Fragiocrepes están representados principalmente en el centro-sur del Chaco (356 km²), en Salta y en Catamarca

Tabla 3

Tabla 3: Superficies y porcentajes de suelos con fragipán en la Argentina según INTA (1990).

Table 3: Areas and percentages of soils with fragipans in Argentina according to INTA (1990).

Provincia	Superficie. (km ²)	% respecto a suelos con fragipán en el país	% respecto a la provincia
Chaco	490	33,2	0,49
Córdoba	447	30,2	0,26
Salta	375	25,3	0,24
Catamarca	129	8,7	0,13
Buenos Aires	39	2,6	0,01
TOTAL	1480		

Debe señalarse sin embargo que la superficie indicada se ampliaría considerablemente si se incluyen los suelos que poseen horizontes afectados por el sufijo “x”, como se indica a continuación para las provincias de Buenos Aires y Chaco. Adicionalmente, los suelos con fragipanes se encuentran formando complejos o asociaciones a escalas de semidetalle o menores y es imposible o muy difícil discriminar su distribución geográfica a partir de las cartas de suelos.

En el Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires en escala 1:500.000 (INTA, 1989) la presencia de fragipanes se ha reflejado taxonómicamente en un solo suelo: los *Fragiacualfes típicos*, serie La


Pluma, ubicado en el noroeste de la provincia (Dominio 21, partido de General Villegas), aunque estaría más representado en el sudeste de Córdoba. El suelo tiene una secuencia Ap-A2-B21t-B22m-B3m-C. Los horizontes endurecidos se encuentran entre 51 y 96 cm, tienen textura franco limosa, estructura en prismas y bloques, fuerte alcalinidad (pH 9, PSI 58 y 57) y presencia de carbonatos.

Por otro lado, se incluyen en dicha publicación descripciones de 14 perfiles modales que poseen horizontes con carácter de fragipán (sufijo “x”). Se trata en todos los casos de horizontes B3x (BCx en la nueva nomenclatura) a los que se suma en algunos perfiles el horizonte Cx subyacente. Los suelos se hallan principalmente en la Pampa Arenosa y en la Pampa Deprimida (5 perfiles cada uno) y luego en la Pampa Interserrana (3 perfiles), en casi todos los casos en posiciones deprimidas del paisaje. Las unidades taxonómicas son diversas, con una alta proporción de suelos con régimen ácuico y/o horizontes nátricos, por ejemplo: Natracuol típico y Natracualf típico (3 perfiles cada uno) y Hapludol tauto-nátrico (2 perfiles). Las texturas son asimismo muy variadas, de franco arcillosa a franco arenosa, con contenidos de arcilla que no superan el 30%; las estructuras en muchos casos no están bien definidas (masivo) y en otros se encuentran los tipos laminar y en bloques (INTA, 1989).

En las cartas de suelos de la provincia de Buenos Aires en escala 1:50.000 publicadas por el INTA principalmente en la década de 1990, se describen varias series, sobre todo en Pampa Arenosa y Pampa Deprimida con horizontes afectados por el sufijo “x”, pero en ningún caso la presencia de dichos horizontes es reflejada por la designación taxonómica. Algunos ejemplos de tales series son: Castelli, Coronel Bunge, Drabble, Estación Doce de Octubre, Estancia La Salada, La Libertad, Las Hermanas, Los Mochos, Monsalvo, Tronconi y Villa Moll.

En las nuevas versiones actualizadas de la taxonomía y de la nomenclatura de horizontes (accesibles por Internet: www.inta.gov.ar/documentos/cartas-de-suelos-de-la-provincia-de-buenos-aires. Último acceso: 11/12/2017) el sufijo “x” fue suprimido en varias series (ej. La Libertad, Villa Moll, Las Hermanas) o reemplazado por “m” (endurecimiento irreversible), por ejemplo, en las series Coronel Bunge, Estación Doce de Octubre, Tronconi y Castelli. Inversamente, en la serie Cañada Seca el horizonte B32m fue reemplazado por BCnx. Por otro lado, en las series Los Naranjos (Hapludol tauto-árgico y Maipú (Argiudol vértico) los horizontes B3 pasaron a denominarse BCx.

En un estudio detallado de suelos de la Chacra Experimental Bellocq del Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires se caracterizaron diversos perfiles con horizontes que poseían características frágicas (Giménez & Hurtado, 1988). El sitio se encuentra en Bellocq, a 36 km al SSO de Carlos Casares, dentro del ambiente de las dunas longitudinales. Gran parte del predio se extiende en una interduna, donde se encontraron dichos horizontes que forman parte de suelos poligenéticos (principalmente Epiacuoles tauto-nátricos). Están constituidos generalmente por un material superficial, donde ha evolucionado un suelo incipiente (A-AC-C) franco y franco arenoso, al que subyace un horizonte 2Btb franco a franco arcilloso, el que a su vez sobreyace a los horizontes endurecidos identificados como 3Btnkxb y/o 3BCnkxb de textura franca. Estos tienen casi siempre estructura laminar o laminar con tendencia amasiva; son muy duros o extremadamente duros en secos y quebradizos en húmedo. El drenaje es imperfecto o pobre y el agua freática afecta con frecuencia a los perfiles (nivel promedio: 80 cm, 54-116 cm, durante el ciclo húmedo 1983-1984)..

De acuerdo con la cartografía de suelos nacional del INTA (1990), el Chaco es la provincia con mayor superficie ocupada por fragipanes **Tabla 2** *. Así, en varios departamentos cartografiados a ni-

vel de semidetalle (Ledesma *et al.* 1983-2007; Brest *et al.*, este libro) se han descrito distintas series que incluyen horizontes subsuperficiales con características de fragipán. (Bx, Cx), frecuentemente masivos y de texturas diversas. Estos suelos se encuentran en posiciones de media loma y pie de lomas en áreas con sedimentos loésicos y aluviales con problemas de anegabilidad y nivel freático elevado. En algunos casos la taxonomía refleja la presencia de este horizonte, a nivel de gran grupo, por ejemplo, las series Julián (Fragiacuulf aérico), Villordo (Fragiudalf ácuico) y Samuhú (Fragiocrept ácuico); en la mayoría de los casos ello no ocurre, tampoco a nivel de subgrupo, por ejemplo: las series Pumita (Natracuulf típico), Tres Mojones (Natrudalf mólico), Doce de Octubre (Natrustalf ácuico), entre otras.

En la provincia de Córdoba, segunda en superficie ocupada por fragipanes, el INTA (1990) identifica Fragiacuulfes típicos en el sudeste de la provincia, principalmente en los ambientes Pampa Arenosa y Pampa Arenosa Anegable (departamentos Presidente R. Sáenz Peña, Marcos Juárez y General Roca). Ocupan principalmente áreas deprimidas y es común la presencia de altos niveles de sodio intercambiable y sales solubles; una secuencia de horizontes típica es A2-B2t-B3x (E-Bt-BCx). Schiavo *et al.* (1995 y este libro) describen en el departamento Presidente R.S. Peña las características y génesis de tres series tentativas, de las cuales sólo en una se identifica al fragipán en la taxonomía (Serie La Providencia, Fragiacuulf típico); las otras dos series corresponden a un Epiacuol tapto-nátrico (Serie Río Bamba) y a un Endoacuol tapto-nátrico (Serie Curapaligüe).

En las provincias de Catamarca y Salta se encuentran los Fragiacueptes aéricos, distribuidos en ambientes similares de la Puna: llanuras aluviales de lagunas, salares y arroyos. Tienen una secuencia A1, B2, B3x (actualmente: A, Bw, BCx), con epipedón ócrico arcillo limoso y horizonte B cámbico franco arenoso; su clase drenaje es imperfecta y el nivel freático se encuentra generalmente entre 50 y 70 cm (INTA, 1990).

En las terrazas fluviales pleistocenas del valle medio del río Negro, y posiblemente en todo el valle, se encuentran numerosos suelos que poseen horizontes y/o capas con propiedades frágicas (Irisarri, *com. personal*; Irisarri & Ayala Torales, 1993). La superficie aproximada del alto valle y valle medio es de 120.000 ha y dichos suelos ocuparían alrededor de 30.000 ha (25 %), distribuidas en forma aproximadamente similar entre ambas regiones. Estos horizontes y/ capas no poseen las propiedades necesarias para denominarse *fragipanes* según Taxonomía de Suelos (2014), pero están endurecidas con respecto a los horizontes/capas supra- e infrayacentes de los suelos y en algunos casos poseerían propiedades frágicas.

En las terrazas holocenas formadas durante períodos de alto caudal vinculadas a desglaciaciones, los suelos poseen contrastes texturales abruptos y a veces capas densas. En cambio, en las terrazas artificiales formadas por regulación de cauces durante la construcción de presas, no se observaron capas densas o con propiedades frágicas. Los materiales originarios aluviales posiblemente tengan influencia en la naturaleza frágica de las capas/horizontes mencionados, con alguna participación pedológica, ya que se encuentran solo en las terrazas más antiguas del Río Negro.

Los suelos con horizontes que poseen propiedades frágicas se encuentran en ambientes ligeramente cóncavos y planos tendidos llanos con pequeñas depresiones. Dichos horizontes han sido identificados como Cx o Cxk y poseen algunas propiedades comunes: 1) distinto grado de calcificación y se deslíen en agua y/o HCl; 2) son duros o muy duros en seco y firmes o quebradizos en mojado; en cambio las capas densas no son quebradizas en húmedo, ni se deslíen en agua. Se encuentran entre los

40 y 80 cm de profundidad, raramente hasta los 120 cm, con espesores promedios de 30 a 40 cm. Son generalmente franco limosos y masivos y poseen más del 15 % de sodio intercambiable. Los suelos se han clasificado como: Natrargides dúricos, Calciortides típicos, Natrargides dúricos, Argiustoles cálcicos arídicos, Calciortides típicos y Torriortentes durinódicos.

A diferencia de los mencionados anteriormente para las terrazas del río Negro, en las terrazas del río Colorado, Irisarri (*com. pers.*) no identificó suelos con propiedades frágicas sino capas densas, duras en seco, no quebradizas con alta densidad aparente, que no se deslíen en agua.

En el Alto Valle del río Negro, Apcarian *et al.* (2014) caracterizaron las propiedades de suelos representativos en las tres terrazas del río entre las localidades de Allen, Guerrico y General Roca, en una superficie de aproximadamente 8000 ha. En la segunda terraza describen suelos que en su mayoría presentan horizontes con características de fragipán, situados casi siempre en la parte inferior de los perfiles y generalmente en discontinuidad con los materiales suprayacentes. Corresponden a suelos con distinto grado de evolución: Ap-Bw-C-2Cx (Haplocambides, Acuicambides) y Ap-Bt-BC(x)-2Cx o Ap-Bt-Ck-2Ckx (Natrargides, Haplocalcides). Las texturas son medias o finas, predominando los limos sobre las arcillas y la clase por tamaño de partículas limosa fina, con muy escasa participación de la clase limosa gruesa. En la fracción arcilla dominan ampliamente las esmectitas (62-76 %), seguidas por la illita y en escasa cantidad la caolinita. Los horizontes C son masivos, excepto cuando tienen características frágicas (Cx) en que presentan bloques subangulares, a menudo con sectores con estructura laminar y en otros casos poros vesiculares; son muy duros a extremadamente duros en seco y quebradizos en húmedo y presentan rasgos redoximórficos bien marcados. El espesor promedio es de 38 cm, variando entre 10 y 80 cm; el límite superior se encuentra generalmente por debajo de los 50 cm, con una profundidad media de alrededor de 80 cm. La densidad aparente de los horizontes Cx varía entre 1,41 y 1,90 g/cm³, con una porosidad total promedio de 44 % (40 - 47 %) y una macroporosidad que varía entre 2 y 14 %, siendo generalmente inferior a 6 %. El agua útil oscila entre 11 y 20 %. Los valores de agua muy fácilmente y fácilmente aprovechable son bajos, aumentando los contenidos de agua retenidos a tensiones mayores a 3 atm, que indicarían predominio de poros menores a 2,87 y 0,96 μm . La resistencia a la penetración (penetrómetro de cono, humedad aprox. 1 atm.) es de 1,2 MPa en superficie, llega hasta 2,6 MPa en los horizontes Bt y aumentan marcadamente en los horizontes Cx hasta 3,8 MPa. Todos los suelos presentan reacción alcalina (pH 7 a 9) ya que poseen calcáreo en distintas proporciones, a lo que se suma la presencia de sodio de intercambio que, en muchos casos, supera el valor de 15 %, siendo menor en las familias granulométricas más gruesas. Asimismo, es común que la conductividad eléctrica supere los 4 dS m⁻¹. En esta terraza el nivel freático está más cercano a la superficie en verano, período en que puede llegar en promedio a alrededor de 140 cm, aunque en los sectores deprimidos puede alcanzar los 40 cm y los 100 cm en invierno.

Aspectos aplicados

Ya se mencionó la influencia negativa que ejercen los fragipanes en el crecimiento de las raíces de las plantas por las restricciones de tipo mecánico (impedancia). A ello se deben sumar las limitaciones de tipo químico por la generación de un ambiente anóxico al producirse capas colgadas de agua en la profundidad de enraizamiento y por la reacción ácida de muchos casos; a ello debe sumarse la menor capacidad de almacenamiento de agua lo que se traduce en menores rendimientos en el caso de los cultivos.

Respecto a las impedancias mecánicas en general, en un trabajo clásico de Pfeiffer (1894, citado por Fiskell *et al.*, 1968) se demostró que las raíces de maíz desarrollan presiones longitudinales de hasta 11 bares y presiones radiales de 7 bares. Así, las raíces pueden modificar la configuración de agregados y granos de arena. De todas maneras, Vehmeyer & Hendrickson (1948) observaron que el crecimiento de las raíces casi se detenía en suelos arenosos con densidad aparente de $1,75 \text{ g cm}^{-3}$, en condiciones favorables de humedad. La capacidad de las raíces para superar resistencias en el suelo depende además de una adecuada difusión de oxígeno. Cuando los poros son más estrechos que las raíces éstas deben desplazar las partículas del suelo para ensancharlos, ejerciendo una presión superior a la resistencia mecánica del suelo (Hillel, 1998). Según Russell & Goss (1974) cuando las raíces de cebada (*Hordeum sp.*) deben vencer una presión de 20 kPa para ensanchar los poros, la velocidad de alargamiento se reduce en un 50 % y si la presión es de 50 kPa el alargamiento se reduce en un 80 %. Según Taylor (1983) las máximas presiones que las raíces pueden ejercer en la matriz del suelo oscilan entre 900 y 1500 kPa (0,9-1,5 MPa). Pilatti & de Orellana (2000) consignan que una impedancia mecánica de 1,5 MPa es un valor crítico para el alargamiento de las raíces y el normal suministro de agua y nutrientes. De todas maneras, es variable el comportamiento de las plantas respecto a la profundidad en que aparecen las impedancias. Por ello, el sistema de evaluación de tierras de la FAO (1985) establece clases de profundidad efectiva para cada cultivo; por ejemplo, para maíz (*Zea mays*) fija los siguientes límites: clase sumamente apta (A1): >120 cm, moderadamente apta (A2): 50-120 cm; marginalmente apta (A3): 30-50 cm; no apta (N): <30 cm.

Las prácticas de manejo orientadas a paliar las restricciones mecánicas de los fragipanes se basan en dos mecanismos principales: labranzas profundas e incorporación de enmiendas destinadas a degradar los fragipanes. Una de las prácticas destinadas a romper las capas endurecidas es el subsolado. Entre las primeras experiencias en EE.UU. Van Doren & Haynes (1961) describen dos ensayos realizados en Ohio entre 1915 y 1926 orientados a romper capas endurecidas equivalentes a lo que más tarde se denominaron fragipanes. Se trabajó en dos series que tenían el fragipán entre 35 y 90 cm. Se utilizó como testigo una arada con arado de reja-vertedera hasta 19 cm; el segundo tratamiento fue una arada como la anterior a la que se sumó con arada con subsolador profundizando 19 cm adicionales hasta los 38 cm. El tercer ensayo consistió en una arada profunda hasta 38 cm con un arado de discos Spalding. En una de las series los rendimientos de maíz y trigo no aumentaron significativamente y en la otra hubo disminución de los rindes debido probablemente a que se incorporaron a la zona radicular horizontes subsuperficiales ácidos poco fértiles. Se trató de explicar estos resultados suponiendo que los nutrientes más que las condiciones físicas habían sido el factor limitante. Para verificar esta hipótesis se hizo en la misma serie un ensayo similar con maíz, pero agregando los fertilizantes necesarios, y los rendimientos no tuvieron variaciones significativas. En Nova Scotia (Canadá) los fragipanes constituyen uno de los principales problemas para la agricultura ya que además de restringir el enraizamiento impiden el drenaje de la parte superior del perfil retardando el acceso al terreno y con frecuencia impidiendo la cosecha. Las prácticas de drenaje y subsolado tampoco han resultado eficaces (Wang *et al.*, 1974).

Se ha tratado de reducir las limitaciones de las labranzas profundas se restricciones físicas que plantean los fragipanes mediante prácticas de zanjeo (*trenching*), procurando que la excavación atraviese la totalidad de la capa endurecida y que se produzca una mezcla con el material situado por encima y por debajo de dicha capa. Esta mezcla es necesaria porque se ha comprobado que si solamente se disturba el fragipán, éste se puede volver a endurecer con bastante rapidez (Eck & Unger, 1985); ade-

más, una fragmentación parcial no es suficiente para un buen enraizamiento. Esto fue comprobado por Van Doren & Haynes (1961) quienes realizaron un subsolado hasta los 38 cm y cincelado hasta los 46 cm en suelos de Ohio, con fragipán entre los 36 y 90 cm de profundidad. Los rendimientos de maíz, avena y trigo no aumentaron respecto al testigo debido a que las operaciones afectaron sólo a un pequeño espesor del fragipán.

Mediante un zanjeado más profundo (hasta 152 cm) y ancho (50 cm), Bradford & Blanchard (1977) modificaron el perfil de un Fragiudalf típico, familia franca fina, sílica, mésica, de Missouri. El fragipán era arenoso y tenía 30 a 80 cm de espesor y su techo se encontraba a una profundidad de ~50 cm. En este caso se logró un aumento del agua útil y del rendimiento de sorgo granífero (*Sorghum bicolor*) que llegó 4322 kg/ha, siendo en el testigo de 1851 kg/ha y en el área entre trincheras de 3229 kg/ha. Los rendimientos aumentaron aun más con la incorporación de enmiendas y fertilizante (nitrato de amonio), a saber: cal: 4906 kg/ha; cal + fertilizante: 5145 kg/ha; cal + fertilizante + aserrín 5987 kg/ha. La reexcavación del sitio 16 años después no mostró regeneración del fragipán ya que no se registró aumento de la densidad y la resistencia mecánica. Los autores señalan además que el mayor beneficio de esta práctica es permitir un mayor aprovechamiento del agua, por lo cual sería más ventajosa en regiones con riesgo de déficit hídrico en el período de crecimiento. No se discute en qué medida estos tratamientos drásticos pueden llevarse a la práctica.

Existe un sistema denominado “zanjeo segmentado” (*segmental trenching*) o “*slotting*” desarrollado originariamente en Australia para mejorar la percolación del agua y corregir limitaciones del subsuelo (acidez, sodicidad, etc.). Consiste en excavar mediante implementos especiales franjas angostas (~0,15 m de ancho) hasta una profundidad variable (0,6-1,0 m), separadas por ~1 m, dejando el resto del campo sin disturbar. El suelo removido puede ser mezclado con fertilizantes, enmiendas, rastrojos o en determinados casos, residuos urbanos tales como barros cloacales. (Jawardane & Blackwell, 1985; Jawardane *et al.*, 1995). Una práctica de zanjas angostas a 61 y 102 cm de profundidad había sido utilizada por Heilman & Gonzalez (1973) en un suelo arcilloso (Haplustert sódico) de Texas, para aumentar la profundidad de enraizamiento. Se implantó un cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*) cuyos rendimientos pasaron de 815 kg/ha (testigo) a 995 kg/ha (61 cm) y 1018 kg/ha (102 cm). Se consiguió además aumentar la velocidad de infiltración y disminuir la densidad aparente.

En una investigación llevada a cabo en Fraglosudalfes oxiácuicos de Tennessee, EE.UU., Graveel *et al.* (2002) encontraron que los fragipanes más cercanos a la superficie se encontraban en los suelos más erosionados. En un área boscosa virgen cercana el fragipán se hallaba a una profundidad promedio más o menos constante de 90 ± 10 cm. Además, se observó que la erosión acelerada produce en dichos suelos una disminución relativamente rápida de la productividad de soja y maíz en comparación con suelos sin capas restrictivas. Cuando los fragipanes se hallaban a 107 y 76 cm, los rendimientos fueron similares para ambas profundidades: soja 2,8 y maíz 10 ton/ha; a profundidades de 56 y 51 cm los rindes fueron para soja 2,4 y 1,7 ton/ha y para maíz 8,7 y 8,9 ton/ha, respectivamente. Los rendimientos experimentaron una disminución significativa cuando los fragipanes se encontraban por encima de los 50 cm; así a los 38 y 15 cm se obtuvieron 1,4 y 1,3 ton/ha de soja y 7,4 y 6,7 ton/ha de maíz, respectivamente. En sectores donde el fragipán afloraba, los rindes de soja y maíz fueron de 0,5 y 5,5 ton/ha. Los autores consideran que la disminución en la capacidad de retención de agua es el principal factor limitante de los rendimientos.

Teniendo en cuenta que los fragipanes tienen en algunos casos a la sílice como el principal agente cementante se consideró la posibilidad de su disolución mediante diversos materiales. La solubilidad de la sílice (cristalina y amorfa) se mantiene prácticamente constante entre pH 2 y 8,5, aumentando rápidamente por encima de pH 9, aunque influyen otros factores tales como complejos orgánicos, filosilicatos, sesquióxidos, superficie específica. Rothon *et al.* (2001) realizaron un ensayo de laboratorio con agregados de fragipanes del valle inferior del río Mississippi (EE.UU.) para evaluar la capacidad de desleimiento de las cenizas de combustión de lecho fluido (FBC, *fluidized bed combustion*). Este es un subproducto de las centrales eléctricas alimentadas por carbón que tiene un pH 12 y se ha utilizado en algunos casos como enmienda en suelos ácidos en reemplazo de la cal. La mayoría de las dosis no redujeron significativamente la resistencia del fragipán; sólo las dosis más altas la disminuyeron ligeramente debido tal vez al efecto dispersante de los altos niveles de Mg que poseen esas cenizas. Se considera que el poder dispersante de las cenizas probablemente disminuyó por reprecipitación de silicatos de Mg en un sistema cerrado de laboratorio, mientras que en condiciones de campo los productos de la disolución se habrían lixiviado.

Karathanakis *et al.* (2014) realizaron ensayos de laboratorio para determinar el poder de diversos compuestos para desintegrar agregados del horizonte Btx de un Fragiudalf oxiácuico de Kentucky, EE.UU. En este estado se calcula que los fragipanes originan una merma en el rendimiento de maíz y soja del 20 al 25 % por disminución del agua disponible en verano. Se utilizó agua desmineralizada como testigo y soluciones de: 1) gallinaza, 2) residuos de biosólidos digeridos aeróbicamente, 3) cenizas de combustión en lecho fluido, 4) CaCO_3 , 5) NaF, 6) hexametáfosfato de Na y 7) extractos de tejidos de raíces de raigrás (*Lolium perenne*). La mayor fragmentación se obtuvo con los tres últimos compuestos y se atribuye a que producen soluciones con fuerza iónica relativamente baja (bajo contenido salino) y, además en el caso de raigrás, a que sus raíces tendrían capacidad de penetrar en la parte superior de fragipanes. Estas soluciones penetran más rápidamente en los capilares y generan la presión de expansión y el esfuerzo de corte requeridos para desintegrar el fragipán. Una fragmentación adicional se produce en una etapa posterior, durante la cual los potenciales agentes ligantes Si, Al, Fe y Mn son solubilizados. Se están realizando ensayos de campo para comprobar los resultados.

Sobral *et al.* (1993), en su descripción de suelos “tapto” ya mencionadas, relatan que es común encontrar en campos cultivados de la Pampa Arenosa sectores con plantas cloróticas y de menor desarrollo por lo cual se los denomina campos “overos” o “manchoneados”. El manchoneo se debería principalmente a capas densificadas a profundidades variables originadas por: cementaciones de sílice o Fe, horizontes Bt muy duros, densidad aparente elevada o reacción excesivamente alcalina. Entre las prácticas ensayadas en la década de 1960 se mencionan: a) fertilización con sulfato de amonio, urea o superfosfato; b) labranzas con cincel y arado de reja utilizando achicoria y aplicando fertilizantes fosforados; c) subsolados a diferentes profundidades y con distintos equipos. En general los resultados fueron negativos o el efecto producido tuvo poca duración.

■ BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo Sandoval, OA & D Flores Román. 2000. Genesis of white fragipans of volcanic origin. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 17(2): 152-162.
- AFES. 2008. Référentiel Pédologique. D Baize & MC Girard (Coordinadores). Association Française pour l'Étude du Sol. Éditions Quæ. Versailles, Francia. 405 pp.

- Ajmone-Marsan, F & J Torrent. 1989. Fragipan bonding by silica and iron oxides in a soil from northwestern Italy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53 (4): 1140-1145.
- Aliphat Fernández, M & G Werner. 1994. The tepetates of the Central Mexican Highlands: prehispanic and modern impact of agriculture and water management. Transactions 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México. Vol. 6a: 528-540.
- Ameghino, F. 1881. La formación pampeana. Paris, Buenos Aires.
- Apcarian, A; PM Schmid & MC Aruani. 2014. Suelos con acumulaciones calcáreas en el Alto Valle de Río Negro, Patagonia norte. En: PA Imbellone (ed.). Suelos con acumulaciones calcáreas y yesíferas de Argentina. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Ediciones INTA. Buenos Aires. 149-181.
- Baldwin, M; CE Kellogg & J Thorp. 1938. Soil classification. En: Soils and Men. Yearbook of Agriculture 1938. USDA. 979-1001.
- Bauzá, HF. 1989. Las "Geórgicas" de Virgilio. Estudio y traducción (Edición bilingüe). EUDEBA, Editorial Universitaria de Buenos Aires. 1a. edición. 212 pp.
- Belnap, J; JH Kaltenecker; R Rosentreter; J Williams, S Leonard & D Eldridge. 2001. Biological soil crusts: ecology and management. Bureau of Land Management, U.S. Department of the Interior. Technical Reference 1730-2. 110 pp.
- Bockheim, JG. 2003. Genesis of bisequal soils on acidic drift in the upper Great Lakes region, USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 612-619.
- Bockheim, JG & AE Hartemink. 2013. Soils with fragipans in the USA. *Catena*, 104:233-242.
- Bonfils, CG; JE Calcagno; PH Etchevehere; J Ipucha Aguerre; CRO Miaczynski. & LA Tallarico. 1960. Suelos y erosión en la región pampeana semiárida. *R.I.A.*, XIII (4): 319-407.
- Bonfils, CG; 1966. Rasgos principales de los suelos pampeanos. INTA. 66 pp.
- Bouza, PJ. 1995. Evolución de pavimentos de desierto y costras superficiales en un sector del Noreste del Chubut: Su relación con las propiedades físico-químicas y micromorfológicas del suelo superficial. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Biblioteca Digital FCEN-UBA (www.digital.bl.fcen.uba.ar).
- Bouza P, HF Del Valle & PA Imbellone. 1993. Micromorphological, physical, and chemical characteristics of soil crust types of the central Patagonia region, Argentina. *Arid Soil Res. Rehab.* 7: 355-368.
- Bradford, JM & RW Blanchar. 1977. Profile modification of a Fragiudalf to increase crop production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 127-131.
- Brest, EF; AE López & JJ Zurita. Fragipanes en la provincia del Chaco: identificación, propiedades y distribución. Este libro.
- Bryant, RB. 1989. Physical processes of fragipan formation. En: NE Smeck & EJ Ciolkosz (eds.): Fragipans: Their occurrence, classification, and genesis. Soil Sci. Soc. of America. 141-150.
- Buntley, GJ; RB Daniels & EE Gamble. 1977. Fragipan horizons in soils of the Memphis-Loring-Grenada sequence in west Tennessee. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 400-407.
- Buol, SW ; FD Hole & RJ McCracken. 1989. Soil genesis and classification. 3rd. ed. Iowa State University Press, Ames. 446 pp.
- Burkhardt, C. 1907. La formation pampéene de Buenos Aires et Santa Fe. En : R. Lehmann-Nitsche (ed.). Nouvelles recherches sur la formation pampéene et l'homme fossile de la République Argentine. *Revista del Museo de La Plata*. Tomo XIV: 146-171.
- Buschiazzo, DE. 1986. Estudio sobre la tosca. Parte I: Evidencias de un movimiento descendente del carbonato en base a la interpretación de características macro y geomorfológicas. *Ciencia del Suelo* 4(1): 55-65.
- Buschiazzo, DE. 1988. Estudio sobre la tosca. Parte II: Evidencias de un movimiento descendente del carbonato, características micromorfológicas. *Ciencia del Suelo* 6(1): 44-49.
- Calhoun, TE. 1980. Recommended reclassification or disposition of Northeast region series now classified as having fragipans. En: EJ Ciolkosz (ed.). Proc. Northeast Coop. Soil Survey Conference. University Park, PA. Agron. Series No. 65.
- Carlisle, FJ. 1954. Characteristics of soils with fragipan in a Podzol region. Ph. D. diss. Cornell Univ. Ithaca, NY. (Diss, Abstr. 14: 1861-1862),.
- Carlisle, FJ; EG Knox & RB Grossman. 1957. Fragipan horizons in New York soils. I, General characteristic and distribution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 21: 320-321.

- Castillo-Monroy, AP & FT Maestre. 2011. La costra biológica del suelo: Avances recientes en el conocimiento de su estructura y función ecológica. *Revista Chilena de Historia Natural*. Sociedad de Biología de Chile. 84: 1-21.
- Certini, G; FC Ugolini; I Taina; G Bolla; G Corti & F Tescari. 2007. Clues to the genesis of a discontinuously distributed fragipan in the northern Apennines, Italy. *Catena*. 69: 161-169.
- Chartres, CJ; JM Kirby & M Raupach. 1990. Poorly ordered silica and aluminosilicates as temporary cementing agents in hard-setting soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1060-1067.
- Ciolkosz, EJ & WJ Waltman. 2000. Pennsylvania's fragipans. Pennsylvania State University Agronomy Series 147. 37 pp.
- Ciolkosz, EJ; WJ Waltman & NC Thurman. 1995. Fragipans in Pennsylvania soils. *Soil Survey Horizons* 36: 5-20.
- Cockroft, B & KA Olsson. 2000: Degradation of soil structure due to coalescence of aggregates in no-till, no-traffic beds in irrigated crops. *Aust. J. Soil Res.* 38, 61-70.
- Creemens, DL; JP Hart & RG Darmody. 1998. Complex pedostratigraphy of a terrace fragipan at Memorial Park site, central Pennsylvania. *Geoarcheology* 13: 339-359.
- Darwin, C. 1846. Geological observations of South America. Smith, Elder and Co. London. 280 pp.
- De Halperin DR, MCZ de Mule & GZ de Caire. 1976. Algal crusts as sources of nitrogen in subhumid and semiarid soils (Chaco and Formosa provinces, Argentina). *Darwiniana*. 20: 341-370.
- de Kimpe, CR. 1970. Chemical, physical and mineralogical properties of a podzol soil with fragipan derived from glacial till in the province of Quebec. *Can. J. Soil Sci.* 50(3): 317-330.
- de Kimpe, CR; RW Baril & R Rivard. 1972. Characterization of a toposequence with fragipan: the Leeds-St. Marie-Brompton series of soils, province of Québec. *Can. J. Soil Sci.* 52(2): 135-150.
- Díaz-Zorita, M; GA Duarte & JH Grove. 2002. A review of no till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65: 1-18.
- Drewes SI, RS Lavado & LG de López Camelo. 1991. Flora algal en un suelo de pastizal de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revue D'Écologie et de Biologie du Sol* 28: 413-419.
- Dubroeuq, D & M Thiry. 1994. Indurations siliceuses dans des sols volcaniques. Comparaison avec des silcrètes anciens. Transactions 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México. Vol. 6a: 445-459.
- Duchaufour, P. 1977. Pédologie. 1. Pédogenèse et classification. Masson. Paris. 477 p.
- Duncan, MM & DP Franzmeier. 1999. Role of free silicon, aluminum, and iron in fragipan formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 923-929.
- Eck HV & PW Unger. 1985. Soil profile modification for increasing crop production. En: BA Stewart (ed.) Advances in Soil Science. Vol 1. Springer, New York. Vol. 1: 65-100.
- Eghbal, MK; J Givi; M Torabi & M Miransari. 2012. Formation of soils with fragipan and plinthite in old beach deposits in the south of the Caspian Sea, Gilan province, Iran. *Applied Clay Science*. 64: 44-52.
- Ehlers, W; U Köpke; F Hesse & W Böhm. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in a tilled and untilled loess soil. *Soil Till. Res.* 3: 261.
- Embrapa. 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Solos. 2a. edición. Brasília, DF. 306 pp.
- Etchevehere, PH; JC Musto & JE Olmos. 1969. Características y distribución de las principales series de suelos de la Pampa Ondulada. Actas 5a. Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Santa Fe. 302-310.
- Fabiola, N; B Giarola, H Veras de Lima & A Pires da Silva. 2011. Hardsetting soils: physical properties. En: J Gliński, J Horabik & J Lipiec (eds.). Encyclopedia of Agrophysics. Springer Science and Business Media. 360-365.
- FAO-UNESCO. 1974. Legend of the soil map of the world. United Nations Food and Agriculture Organization. Rome.
- FAO. 1985. Directivas: evaluación de tierras para la agricultura de secano. Servicio de Recursos, Manjeo y Conservación de Suelos, Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Boletín de Suelos de la FAO 52. Roma. 228 pp.
- Federoff, N; MA Courty; E Lacroix & K Oleschko. 1994. Calcitic accretion on indurated volcanic materials (example of tepetates, Altiplano, México). Transactions 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México. Vol. 6a: 460-473.

- Ferrer, JA & G Ourracariet. 1996, Riesgos de colapso en suelos yesosos incorporados al riego. Actas XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Santa Rosa, La Pampa.
- Filizola, MF; M Lamotte; E Fritsch; R Boulet; JC Araujo Filho; FBR Silva & JC Leprun. 2001. Os fragipãs e duripãs das depressões dos tabuleiros costeiros do nordeste brasileiro: uma proposta de evolução. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 25 (4): 947-963.
- Fiskell, JGA; VW Carlisle; R Kashirad & CE Hutton. 1968. Effect of soil strength on root penetration in coarse-textured soils. *Trans. 9th Int. Cong. Soil Science*. 1: 793-802.
- FitzPatrick, EA., 1956. An indurated soil horizon formed by permafrost. *J. of Soil Science*. 7:248-257.
- FitzPatrick, EA. 1971. *Pedology, a systematic approach to Soil Science*. Oliver and Boyd, Edinburgh. 306 pp.
- FitzPatrick, EA. 1980. *Soils. Their formation, classification and distribution*. Longman Inc. New York. 353 pp.
- Flach, KW, TJ Nimlos & RJ Engel. 1994, Criteria and classification of indurated volcanic soil horizons. *Transactions 15th World Congress of Soil Science*. Volume 6a, Commission V: Symposia. Acapulco, México. 481-486.
- Franzmeier, DP; LD Norton & GC Steinhardt. 1989. Fragipan formation in loess of the Mid-western United States. En: NE Smeck & EJ Ciolkosz (eds.): *Fragipans: Their occurrence, classification, and genesis*. Soil Sci. Soc. America- 69-97.
- Frenguelli, J. 1950. Rasgos generales de la morfología y la geología de la provincia de Buenos Aires. *Publicaciones del Laboratorio de Ensayos de Materiales y Tecnología (LEMIT)*. Serie II, No. 33. La Plata.
- Gallardo, J; A Alvarez & V Cala. 1988. Horizontes de fragipán de tipo "Ison" formados por permafrost en la Sierra de Guadarrama. *Estudios Geológicos*. 44: 83-91.
- Giarola, NFB & AP da Silva. 2002. Conceitos sobre solos coesos e "hardsetting". *Scientia Agricola*. 59(3): 613-620.
- Ghezzehei, TA & D Or. 2000. Dynamics of soil aggregate coalescence governed by capillary and rheological processes. *Water Resour. Res.* 36(2): 367-379.
- Giménez, JE & MA Hurtado, 1988. Mapa detallado de suelos de la Chacra Experimental Bellocq del Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires. Informe técnico. CISAUA (inédito).
- Giménez, JE; MI Salerno & MA Hurtado. 2002. Rehabilitation of desurfaced soils by afforestation in La Plata county, Argentina. *Land Degrad. Dev.* 13:69-77.
- Gliński, J & J Lipiec, 1990. *Soil physical conditions and plant roots*. CRC Press Inc., Boca Raton. 250 pp. .
- Goudie, AS. 1973. *Duricrusts in tropical and subtropical landscapes*. Clarendon Press. Oxford.
- Grant, CD; DA Angers; RS Murray; MH Chantigny & U Hasanah. 2001. On the nature of soil aggregate coalescence in an irrigated swelling clay. *Aust. J. Soil Res.* 39: 565-575.
- Graveel, JG; DD Tyler; JR Jones & WW McFee. 2002. Crop yield and rooting as affected by fragipan depth in loess soils in the southeast USA. *Soil Till. Res.* 68(2): 153-161.
- Grossman, RB & MG Cline. 1957. Fragipan horizons in New York soils. II. Relationships between rigidity and particle-size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 21: 322-325.
- Grossman, RB. 1954. *Studies of physical properties of fragipan in New York State*. M.S. Thesis. Cornell Univ. Ithaca, N.Y.
- Grossman, RB; JB Fehrenbacher & AH Beavers. 1959. Fragipan soils of Illinois. I. General characterization and field relationships of Hosmer silt loam. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23: 65-75.
- Grossman, RB & FJ Carlisle. 1969. Fragipan soils of the Eastern United States. *Adv. Agron.* 21: 237-279.
- Guichon, BA & O Parnasetti. Dos casos de suelos con horizontes compactados en la provincia de Catamarca. Este libro.
- Hallmark, CT. 2000. Alfisols. En: ME Sumner. *Handbook of soil science*. CRC Press LLC. E338-E358.
- Hanna, WE; LA Daugherty & RW Arnold. 1975. Soil-geomorphology relationships in a first-order valley in central New York. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 716-722.
- Heilman MD & CL Gonzalez. 1973. Effect of narrow trenching in Harlingen clay soil on plant growth, rooting depth, and salinity. *Agron. J.* 65: 816-819.
- Hewitt, A.E. 1998. *New Zealand Soil Classification*. 2a. edición. Maanaki Whenua Landcare New Zealand Ltd., Dunedin, Landcare Research Science Series No. 1. Lincoln, Canterbury, New Zealand. 122 pp.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press. San Diego, USA. 771 pp.

- Hudnall, WH & D Williams. 1989. Fragipan distribution in the south central states. En: NE Smeck & EJ Ciolkosz (eds.): *Fragipans: Their occurrence, classification, and genesis*. Soil Sci. Soc. America. 42-68.
- Hunt, N. & R Gilkes. 1992. *Farm monitoring hanbook. A practical down-to-earth manual for farmers and other land uses*. University of Western Australia Publishing, Perth. 280 pp.
- Hurtado, MA; JE Giménez; OR Martínez & MG Cabral. 2005. Elaboración de cartografía temática integrada a Sistema de Información Geográfica (SIG) y propuesta de ordenamiento territorial y zonificación según usos. Partido de Florencio Varela. Instituto de Geomorfología y Suelos. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. Informe técnico. 91 pp. y mapas.
- Hurtado, MA ; JE Giménez & MG Cabral. 2006. Análisis ambiental del partido de La Plata. Aportes al ordenamiento territorial. Instituto de Geomorfología y Suelos. Consejo Federal de Inversiones. 124 pp. y mapas.
- Imbellone, PA (ed). 2014, *Suelos con acumulaciones calcáreas y yesíferas de Argentina*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Ediciones INTA. 219 pp.
- Imbellone PA & ME Teruggi, 1986. Morfología y micromorfología de toscas de algunos paleosuelos en el área de La Plata. *Ciencia del Suelo* 4(2): 209-215.
- Imbellone, PA & JE Giménez. 1998. Parent materials, buried soils and fragipans in northwestern Buenos Aires province, Argentina. *Quatern. Int.* Vol 51/52: 115-126.
- Imbellone, PA; JE Giménez & ML Mormeneo. 2004. Ciclos pedogenéticos del oeste bonaerense. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelos. Actas. (En: C.D.Rom).
- Imbellone, PA; JE Giménez & ML Mormeneo. Suelos con propiedades frágicas de la Pampa Arenosa. Centro y oeste de la provincia de Buenos Aires. Argentina. Este libro.
- INTA, 1962. Séptima Aproximación. Un sistema comprensible de clasificación de suelos. Versión castellana por Pedro H. Etchevehere. Publicación Miscelánea No. 3. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 144 pp. y Apéndices.
- INTA. 1972. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3360-32, Pergamino. Escala 1:50.000. Centro de la Investigación de Recursos Naturales. Reconocimiento de Suelos. 108 pp. y mapas.
- INTA, 1989. Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires. 525 pp. y mapas.
- INTA. 1990. Atlas de suelos de la República Argentina Escala 1:500.000 y 1:1.000.000. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 2 tomos y mapas.
- Irisarri, JA & E Ayala Torales. 1993. Estudio de suelos para selección de sitios forestales. Valles de Colonia Josefa, Negro Muerto y Guardia Mitre. Provincia de Río Negro. C.F.I., 88 pp. y anexos.
- Isbell, RF & National Committee on Soil and Terrain. 2016. *The Australian Soil Classification*. 2nd edition. CSIRO Publishing.
- IUSS Working Group WRB. 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 106. FAO, Roma.
- Jawardane, NS & J Blackwell. 1985. Effect of gypsum enriched slots on moisture movement and aeration in an irrigated swelling clay soil. *Aust. J. Soil Res.* 23: 481-492.
- Jawardane, NS; J Blackwell; G Kirchhof & WA Muirhead. 1995. Slotting A deep technique for ameliorating sodic, acid and other degraded subsoils and for land treatment of waste. En: NS Jawardane & BA Steward (eds.). *Subsoil management techniques*. CRC Press Inc. 109-146.
- Johnson, DL & D Watson-Stegner. 1987. Evolution model of pedogenesis. *Soil Sci.* 143: 349-366.
- Johnson DL & FD Hole. 1994. Soil formation theory: a summary of its principal impacts on Geography, Geomorphology, Soil-Geomorphology, Quaternary Geology and Paleopedology, *Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ.* 33: 111-126.
- Johnson, DL, EA Keller & TK Rockwell. 1990. Dynamic pedogenesis: new views on some key soil concepts, and a model for interpreting Quaternary soils. *Quaternary Res.* 33: 306-319.
- Karathanasis, AD; LW Murdock; CJ Matocha; J Grove & YL Thompson. 2014. Fragipan horizon fragmentation in slaking experiments with amendment materials and ryegrass root tissue extracts. *Scientific World Journal*. Publicación online (Último acceso: 7/12/2017).
- Kilmurray, JO. 1966. Rasgos petrográficos y físicos de toscas de la provincia de Buenos Aires. *Anales LEMIT, La Plata.* 104: 1-68.

- Kołodyńska-Gawrysiak, R; J Chodorowski; P Mroczek; A Plak; W Zglobicki; A Kiebała; J Trzciński & K Standzikowski. 2017. The impact of natural and anthropogenic processes on the evolution of closed depressions in loess area. A multi-proxy study from Nałęczów Plateau, Eastern Poland. *Catena* (en prensa).
- Lapenis, AG; GB Lawrence; AA Andreev; AA Bobrov; MS Torn & JW Harden. 2004. Acidification of forest soil in Russia: From 1893 to present. *Global Biogeochemical Cycles*. 18 (1). GB 1037.
- Ledesma, LL. *et al.* 1983-2007. Suelos de departamentos de la provincia del Chaco. Estación Experimental Agropecuaria Pres. R. Saénz Peña. Convenio INTA-Provincia del Chaco. Ediciones digitales.
- Lindbo, DL & PLM Veneman. 1989. Fragipans in the Northeastern United States. En: Smeck, N.E. y Ciolkosz, E.J. (Eds.): *Fragipans: Their occurrence, classification, and genesis*. Soil Sci. Soc. America. 11-31.
- Lindbo, DL; FE Rhoton; JM Bigham; FS Jones; NE Smeck; WH Hudnall & DD Tyler. 1994. Bulk density and fragipan identification in loess soils of the Lower Mississippi River Valley. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 487-500.
- Lozet, JM & AJ Herbillon. 1971. Fragipan soils of Condroz (Belgium): Mineralogical, chemical and physical aspects in relation with their genesis. *Geoderma* 5, 325-343.
- Lyford, WH & T Troedsson. 1973. Fragipan horizons in soils on moraines near Garpenberg, Sweden. *Studia Forestalia Suecica*. Stockholm. No. 108: 5-21.
- Mazza CA & AM Grazzán. 1971. Contribución al conocimiento de las costras y encostramientos calcáreos del sur de la Provincia de Buenos Aires. República Argentina. *Rev. Asoc. Geol. Arg.* 26: 475-485.
- McDaniel, PA; MP Regan; E Brooks; J Boll; S Barndt; A Falen; SK Young & JE Hammel. 2008. Linking fragipans, perched water tables, and catchment-scale hydrological processes. *Catena* 72, 166-173.
- McIntosh, PD & RA Kemp. 1991. Consolidated horizons in soils formed in aeolian deposits in Southland, New Zealand. *Geoderma* 50, 109-124.
- Miaczynski, CRO & JA Ferrer. 1973. Levantamiento semidetallado de suelos en el sector Daireaux-Pirovano. Instituto de Pedología. Fac. de Ciencias Naturales y Museo. 46 pp. y mapas.
- Micucci, FG & MA Taboada. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 86: 152-162.
- Miller, FP; N Holowaychuk & LP Wilding. 1971a. Canfield silt loam, a Fragiudalf: I. Macromorphological, physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 319-324.
- Miller, FP; LP Wilding & N Holowaychuk. 1971b. Canfield silt loam, a Fragiudalf: II. Micromorphology, physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 324-331.
- Miller, MB; TH Cooper & RH Rust. 1993. Differentiation of an eluvial fragipan from dense glacial till in northern Minnesota. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 787-796.
- Moretti, LM & HJM Morrás. "Líneas de piedra" en suelos del noreste argentino. Origen e implicancias. Este libro.
- Mosconi, FP; LJJ Priano; NE Hein; G Moscatelli; JC Salazar; T Gutiérrez & L Cáceres. 1981. Mapa de suelos de la provincia de Santa Fe. INTA (EERA Rafaela, CIRN Castelar), Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Santa Fe. 2 tomos y mapas.
- Muhs, DR. 1984. Intrinsic thresholds in soil systems. *Physical Geography*. 5: 99-110.
- Mullins, CE. 2000. Hardsetting soils. En: *Handbook of soil science*. ME Sumner (Ed.). CRC Press, Boca Raton, USA. G65-87.
- Nash, DJ. 2009. Duricrusts. En: *Encyclopedia of paleoclimatology and ancient environments*. V Gornitz (ed.). Series Encyclopedia of Earth Sciences. Springer Netherlands. 284-285.
- Norfleet, ML & DA Karathanasis. 1996. Some physical and chemical factors contributing fragipan strength in Kentucky soils. *Geoderma* 71, 289-301.
- Northcote, KH. 1960. A factual key for the recognition of Australian soils. Divisional Report No. 4/60. CSIRO, Division of Soils.
- Park, SJ; P Almond; K McSweeney & B Lowery. 2006. Fragipan formation within closed depressions in southern Wisconsin. *Journal of the Korean Geographical Society*. 41:150-167.
- Payton RW. 1992. Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. I. Evidence for a periglacial stage of development. *J. Soil Sci.* 43(4): 621-644.

- Payton, RW. 1993. Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. II. Post Devensian developmental processes and the origin of fragipan consistence. *J. Soil Sci.* 44(4): 703-723.
- Peña, D & C Zabrowski. 1992. Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra, Vol. 10, número especial. México.
- Petersen, GW; RW Ranney; RL Cunningham & RP Matelski. 1970. Fragipans in Pennsylvania soils: A statistical study of laboratory data. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34: 719-722.
- Phunmuang, C; S Anusontpornperm, I Kheoruenromne, A Suddhiprakarn & W Wiriyakitnatekul. 2011. Morphological and physical properties of fragipan in contrasting material derived soils. *Thai Journal of Agricultural Science.* 44(2):103-113.
- Pilatti, MA & JA de Orellana. 2000. The Ideal Soil. II. Critical values of the ideal soil, for Mollisols in the north of the Pampean Region (in Argentina). *J. of Sustainable Agriculture* 17(1): 89-111.
- Quantin, P. 1994. Introduction à la connaissance et à la mise en valeur des sols volcaniques à horizons indurés. Transactions 15th World Congress of *Soil Sci.* Acapulco, México. Vol. 6a: 430-444.
- Raeside, JD. 1964. Loess deposits of the South Island, New Zealand, and soils formed on them. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics.* 7(4): 811-838.
- Rhoton, FE; JH Edwards & LD Norton. 2001. Physical and chemical properties of fragipan horizon materials amended with fluidized bed combustion ash. *Soil Sci.* 166(7): 465-474.
- Ribeiro Ramos, M; V Freitas Melo; A Uhlmann; RA Dedeczek & G Ribas Curcio. 2015. Clay mineralogy and genesis of fragipan in soils from Southeast Brazil. *Catena* 135: 22-28.
- Russell, RS & MJ Goss. 1974. Physical aspects of soil fertility. The response of roots to mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science.* 22:305-318.
- Schaetzl, R & S Anderson. 2005. Soils. Genesis and Geomorphology. Cambridge University Press. 817 pp.
- Schiavo, HF; A Becker & MP Cantú. 1995. Caracterización y génesis de los fragipanes de la depresión de Curapaligüe. Departamento. Sáenz Peña, Córdoba. Argentina. *Ciencia del Suelo* ,13: 28-34.
- Schiavo, HF; MT Grumelli & AR Becker. Fragipanes en la Planicie Central de Argentina. Este libro.
- Schmidt, ES & NM Amioti. 2015. Propiedades edáficas superficiales en sistemas de agricultura de conservación en la Región Pampeana semiárida sur. *Ciencia del Suelo.* 33(1): 79-88.
- Smalley, IJ & JE Davin. 1982. Fragipans horizons in soils: A bibliographic study and review of some of hard layer in loess and other materials. New Zealand Soil Bureau Bibliographic Report 30.
- Smith, GD. 1986. The Guy Smith interviews: Rationale for concepts in Soil Taxonomy. Soil Management Support Serv. Tech. Monogr. 11. Dep. of Agronomy. Cornell University, Ithaca, NY.
- Smith, BR & RB Daniels. 1989. Occurrence and characteristics of fragipans on the Coastal Plain of the southeastern United States. En: NE Smeck & EJ Ciolkosz (eds.): Fragipans: Their occurrence, classification, and genesis. *Soil Sci. Soc. America.* 33-42.
- Smith, BR & LL Callahan. 1987. Soils with Bx horizons in the upper coastal plains of South Carolina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 158-164.
- Smith RM & DR Browning. 1946. Occurrence, nature, and land-use significance of "siltpan" subsoils in West Virginia. *Soil Science* 62: 307-317.
- Sobral, R; A Vignale; A Alfieri & C Pecorari. 1993. Suelos overos del noroeste bonaerense. Antecedentes, descripción evaluación y conclusiones. Boletín de Divulgación Técnica No. 101. INTA. 27 pp. y mapas.
- Smith, GD; LM Arya & J Stark. 1974. The Densipan, a diagnostic horizon of Densiaquults for Soil Taxonomy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 39 (2): 369-370.
- So, HB; GD Smith; SR Raine; BM Schafer & RJ Loch. (eds). 1995. Sealing, crusting and hardsetting soils: productivity and conservation. Proceedings 2nd International Symposium on Sealing, Crusting and Hardsetting Soils: University of Queensland, Brisbane, Australia. 7-11 Febr. 1994. Australian Society of Soil Science 527pp.
- Soil Classification Working Group. 1998. The Canadian System of Soil Classification 3rd edition. Agriculture and Agri-Food Canada Publication 436. Ottawa, 187 pp.
- Soil Science Society of America, 2001. Glossary of soil science terms. Madison, USA. 140 p.

- Soil Survey Staff. 1951. Soil Survey Manual. U.S. Department of Agriculture Handbook No. 18. 503 pp.
- Soil Survey Staff, 1960. Soil Classification, a Comprehensive System. 7th Approximation. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture. Washington DC. 265 pp.
- Soil Survey Staff, 1975. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agriculture Handbook No. 436. 1a. ed. 754 pp.
- Soil Survey Staff, 1999. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agriculture Handbook No. 436. 2a. ed. 869 pp.
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Washington DC. 360 pp.
- Souza dos Santos Moreau, AM; LM da Costa; JC Ker & FH Gomes. 2006. Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do Tabuleiro Costeiro do sul da Bahia. *Revista Brasileira da Ciencia do Solo* 30: 1021-1030.
- Steinhardt, GC & DP Franzmeier. 1979. Chemical and mineralogical properties of the fragipans of the Cincinnati *catena*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:1008–1013.
- Szymański, W; M Skiba & S Skiba. 2011. Fragipan horizon degradation and bleached tongues formation in Albeluvisols of Carpathian foothills, Poland. *Geoderma* 167-168: 340-350.
- Szymański, W; M Skiba & S Skiba. 2012. Origin of reversible brittleness of the fragipan horizon in Albeluvisols of the Carpathian foothills, Poland. *Catena* 99: 66-74.
- Taboada, MA & CR Álvarez. 2008. Introducción a la fertilidad física de los suelos. En: MA Taboada & CR Álvarez. Fertilidad física de los suelos. 2ª edición. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 1-7.
- Taboada, MA; FG Micucci & CR Álvarez. 2008. Impedancias mecánicas y compactación en suelos agrícolas. En: MA Taboada & CR Álvarez (eds.). Fertilidad física de los suelos. 2ª edición. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 99-153.
- Taboada, MA; F Micucci; DJ Cosentino & RS Lavado. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Till. Res.* 49: 57-63.
- Targulian, VO & PV Krasilnikov. 2007. Soil system and pedogenic processes; self organization, time scales and environmental significance. *Catena* 71: 373-381.
- Taylor, HM. 1983. Managing root systems for efficient water use. An overview. En: HM Taylor, WR Jordan & TR Sinclair (eds.). Limitations to efficient water use in crop production. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. 87-111.
- Taylor, HM & LF Ratliff. 1969. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Science* 108 (2): 113-119.
- Teruggi, ME. 1984. Diccionario sedimentológico. Vol. II: Rocas aclásticas y suelos. Ediciones Científicas Argentinas Librart (ECAL), Buenos Aires. 236 pp.
- Thorp, J & GD Smith. 1949. Higher categories of soil classification. *Soil Science* 67, 117-126.
- Torrent, J & WD Nettleton. 1978. Feedback processes in soil genesis. *Geoderma* 20: 281-287.
- Ucha, JM; LP Ribeiro & GS Vilas Boas. 2002. Genesis of duripans and fragipans in the coastal tablelands of the state of Bahia, Brazil. 17th World Congress of Soil Science. Thailand. Symposium No. 19. Paper No. 1418.
- USDA, 1957. The Yearbook of Agriculture 1957. The United States Department of Agriculture, Washington DC. 784 pp.
- Utomo, WH & AR Drexler. 1981. Age hardening of agricultural top soils. *Journal of Soil Science* 32: 335-350.
- van den Akker, JJH & B Soane. 2005. Compaction. En: D Hillel (Ed.). Encyclopedia of soils in the environment. Elsevier Ltd. Oxford. Vol. 1: 285-293.
- van Doren DM Jr & JL Haynes. 1961. Subsoil tillage on fragipan soils in Ohio. Ohio Agric. Exp. Stn. Res. Cir. 95. 4 pp.
- van Vliet, B & R Langohr. 1981. Correlation between fragipans and permafrost with special reference to silty Weichselian deposits in Belgium and northern France. *Catena* 8, 137-154.
- Vehmeier FJ & AH Hendrickson. 1948. Soil density and root penetration. *Soil Science* 65, 487-493.

- Veneman, PLM & DL Lindbo. 1986. Fragipan formation. En: Transactions 13th International Congress of Soil Science. Hamburg. Vol. 4: 1310-1311.
- Vesco, CJ. 1985. Algunos problemas de clasificación utilizando la Taxonomía de Suelos. Propuestas para su solución. Primeras Jornadas Regionales de Suelos, Región Pampeana Norte. INTA EERA Rafaela. Publicación Miscelánea 30: 119-142.
- Waltman, WJ. 1981. Fragipan morphology in late Wisconsinan and Pre-Wisconsinan Age soils of Pennsylvania. M.S. Thesis. Pennsylvania State University.
- Wang, C; JL Nowland & H Kodama. 1974. Properties of two fragipan soils in Nova Scotia inclding scanning electron micrograhs. *Can. J. Soil Sc.* 54: 159-170.
- Weisenborn, BN & RJ Schaetzel. 2005a. Range of fragipan expression in some Michigan soils: I. Morphological, micromorphological, and pedogenic characterization. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 69: 168-177.
- Weisenborn, BN & RJ Schaetzel. 2005b. Range of fragipan expression in some Michigan soils: II. A model for fragipan evolution. *Soil Sc.Soc.Am.J.* 69: 178-187.
- Wells, N & RD Northey. 1985. Strengths of a densipan, humus-pan and clay-pan in a Spodosol developed under Kauri (*Agathis australis*) and the implications for soil classifications. *Geoderma* 35: 1-13.
- Whitson, AR. 1927. The soils of Wisconsin. Wisconsin Geological and Natural History Survey. Bull. 68. University of Wisconsin. Madison.
- Willatt, ST. 1984. Root growth of winter barley during a wet spring in a controlled traffic experiment on a sandy loam soil in Scotland. Scottish Institute of Agricultural Engineering. Penicuik, Midlothian. Inédito.
- Wilson, MA; SJ Indorante; BD Lee; L Follmer; DR Williams; BC Fitch; WM McCauley; JD Bathgate; DA Grimley & K Kleinschmidt. 2010. Location and expression of fragic soil properties in a loess-covered landscape, Southern Illinois, USA. *Geoderma* 154: 529-543.
- Winters, E. 1942. Silica hardpan development in the Red and Yellow Podzolic region. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 7: 437-440.
- Winters E & RW Simonson. 1951. The subsoil. En: AG Norman (ed.). Advances in Agronomy. American Society of Agronomy. Academic Press Inc. New York. 3-86.
- Witty JE & EG Knox. 1989. Identification, role in Soil Taxonomy, and worldwide distribution of fragipans. En: NE Smeck & EJ Ciolkosz (Eds.). Fragipans: Their occurrence, classification, and genesis. Soil Sci. Soc. America: 1-9.
- Wright, VP & ME Tucker. 1991. Calcretes: an introduction. En: VP Wright & ME Tucker (eds.). Calcretes. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 1-22.
- Wysocki, DA; PJ Schoeneberger & HE LaGarry. 1999. Geomorphology of soil landscapes. En: ME Sumner (ed.). Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, E5-E39.
- Yaalon, DH. 1970. Soil forming processes in time and space. En: DH Yaalon (ed.). Paleopedology. Elsevier, Amsterdam. 29-39.
- Young, LM. 1992. Cohesive soils in the UK. *Soil Till. Res.* 25: 187-193.
- Zárate, MA. 1985. Morfología, variaciones laterales y evolución de costras calcáreas: el entoscamiento del techo de la Formación Vorohue (Chapadmalal, Provincia de Buenos Aires) como caso de estudio. Res. Primeras Jornadas Geológicas Bonaerenses.