



Modelos predictivos de preservación ósea diferencial en la cuenca media e inferior del río Paraná basados en propiedades físico-químicas de los suelos

Differential bone preservation models in Middle and Lower Paraná River Basin based on physicochemical properties of soils

Paula E. Galligani¹

¹División Antropología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, CONICET. Grupo de Investigaciones Arqueológicas del Nordeste, Fundación Arqueológica del Litoral. E-mail: paulagalligani@fcnym.unlp.edu.ar

Resumen

En el centro-este de la provincia de Santa Fe (departamentos San Jerónimo, La Capital y Las Colonias) la mala preservación ósea constituye un rasgo característico del registro arqueológico regional. Por este motivo, durante la última década se encuentra en desarrollo una investigación orientada al estudio de la diagénesis ósea a diferentes niveles de organización de los huesos. Parte de la misma estuvo centrada en la generación, mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), de modelos espaciales de preservación ósea diferencial basados en las propiedades de los suelos. Los modelos generados han sido evaluados, y continúan siéndolo en el presente, con información obtenida del análisis de restos óseos recuperados en sitios arqueológicos del área. En este marco, el objetivo de este trabajo es presentar y discutir versiones ampliadas de tales modelos espaciales para un área que incluye la cuenca media e inferior del río Paraná (provincias de Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires), con el objetivo de proporcionar un marco adecuado para interpretar la variación en las condiciones de preservación ósea en el sur de la región del Litoral argentino.

Palabras clave: Diagénesis ósea; Preservación; Tafonomía; Suelos; SIG; Paraná medio e inferior.

Abstract

In the east-central portion of the Santa Fe province (San Jerónimo, La Capital and Las Colonias Departments) poor bone preservation is a characteristic feature of the regional archaeological record. Therefore, during the last decade, a study of bone diagenesis at different bone levels has been under development. Part of this research was focused on the construction of predictive spatial models of bone preservation based on the analysis of specific properties of soils using geographic information systems (GIS). These models have been evaluated with information obtained from the analysis of bone remains recovered from regional archaeological sites. On this basis, this paper presents and discusses new predictive maps for a broader coverage area, which includes the Middle and Lower Paraná River basin (Santa Fe, Entre Ríos and Buenos Aires provinces). The aim is to provide an appropriate interpretative framework to discuss the variation in bone preservation conditions in the south of the Litoral region of Argentina.

Keywords: Bone diagenesis; Preservation; Taphonomy; Soils; GIS; Middle and Lower Paraná River Basin.

Introducción

Los cambios físicos y químicos que experimentan los huesos en su contexto de depositación y enterramiento, hasta su descubrimiento, se engloban bajo el concepto de diagénesis (Olson 1980). Estos cambios consisten en diferentes procesos, tales como descomposición, cementación, disolución o deformación, que se producen tanto en la fase mineral como en la orgánica (Kendall *et al.* 2018). De esta manera, influyen en la preservación

ósea manifestándose a diferentes niveles estructurales (Rho *et al.* 1998), desde el macroestructural (v.g. fracturas, fisuras, marcas de raíces, variaciones en la tenacidad) al subnanoestructural (v.g. degradación química del colágeno, recristalización, contaminación con sustancias húmicas).

El tipo y grado de expresión de las alteraciones diagenéticas depende no solo de factores intrínsecos (i.e. aquellos que son una función del propio material óseo)

Recibido 06-07-2022. Recibido con correcciones 21-10-2022. Aceptado 15-11-2022

Revista del Museo de Antropología 16 (1): 25-40 / 2023 / ISSN 1852-060X (impreso) / ISSN 1852-4826 (electrónico)
<http://revistas.unc.edu.ar/index.php/antropologia/index>

IDACOR-CONICET / Facultad de Filosofía y Humanidades – Universidad Nacional de Córdoba - Argentina

y de eventos o procesos ocurridos con anterioridad al enterramiento, sino también de factores extrínsecos (*i.e.* aquellos relacionados con el entorno de depositación y enterramiento) (ver discusión en Galligani 2020). Entre los factores extrínsecos más influyentes se encuentran la hidrología local, la actividad biológica —principalmente microbiana— y, de especial interés para este trabajo y con influencia sobre las variables mencionadas, las propiedades de los suelos —temperatura, humedad, pH, textura, aireación, disponibilidad de bases intercambiables, entre otras— (*v.g.* Gordon y Buikstra 1981; Kendall *et al.* 2018; Nicholson 1996; Turner-Walker 2012, 2019).

Basados en estas propiedades de los suelos, se han desarrollado, en el centro-este de la provincia de Santa Fe, modelos espaciales de preservación ósea diferencial. En esta área, que abarca las cuencas de los ríos Salado y Coronda (Figura 1a), la mala preservación de los restos óseos humanos y faunísticos constituye un rasgo característico del registro arqueológico, motivo que propició el desarrollo, durante la última década, de una investigación orientada al estudio de la diagénesis ósea. Parte de esta investigación —basada en la perspectiva teórico-metodológica de la tafonomía regional, cuyo objetivo es reconocer espacios dentro de los cuales hay mayores posibilidades para la depositación, enterramiento y preservación de los huesos (Borrero 1988)— se centró en la construcción de dichos modelos (ver Galligani 2020).

Los mismos fueron generados sobre la base de información publicada de estudios llevados a cabo en Europa y Estados Unidos y de mapas de suelo disponibles para el área, elaborados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG). Los diferentes

mapas predictivos fueron, posteriormente, evaluados con información proveniente del análisis —a distintos niveles estructurales— de huesos recuperados en sitios arqueológicos locales. Los datos obtenidos hasta el momento sugieren que las expectativas de los modelos se ajustan razonablemente bien con los resultados empíricos, mostrando que, si bien en grado variable de acuerdo a la zona, los procesos diagenéticos implicados en la preservación del tejido óseo estarían en relación con ciertas características edafológicas de los horizontes o estratos donde típicamente aparecen los materiales arqueológicos (ver Galligani 2020).

A partir de los resultados obtenidos, se decidió extender el área modelada a una más amplia, que abarque la cuenca media e inferior del río Paraná y su zona de influencia (provincias de Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires). Esta zona ha mostrado un desarrollo creciente de investigaciones arqueológicas, las cuales propiciaron el hallazgo de numerosos sitios en los que se recuperaron, entre otros materiales, restos óseos humanos y faunísticos (ver, por ejemplo, Bonomo y Barboza 2014; Castro *et al.* 2017). Con el propósito de comenzar a proporcionar marcos adecuados para la interpretación de la variación en las condiciones extrínsecas de preservación ósea a escala regional, en este trabajo se presentan los primeros mapas predictivos de preservación ósea diferencial para el sur de la región del Litoral argentino. Asimismo, además de presentar los aspectos metodológicos vinculados con la construcción de los modelos espaciales y los diferentes mapas de preservación obtenidos, se discuten algunas vías apropiadas para su evaluación.

El suelo y la preservación ósea

El suelo se define como un subsistema natural abierto, tridimensional, que contiene vida vegetal y animal y que

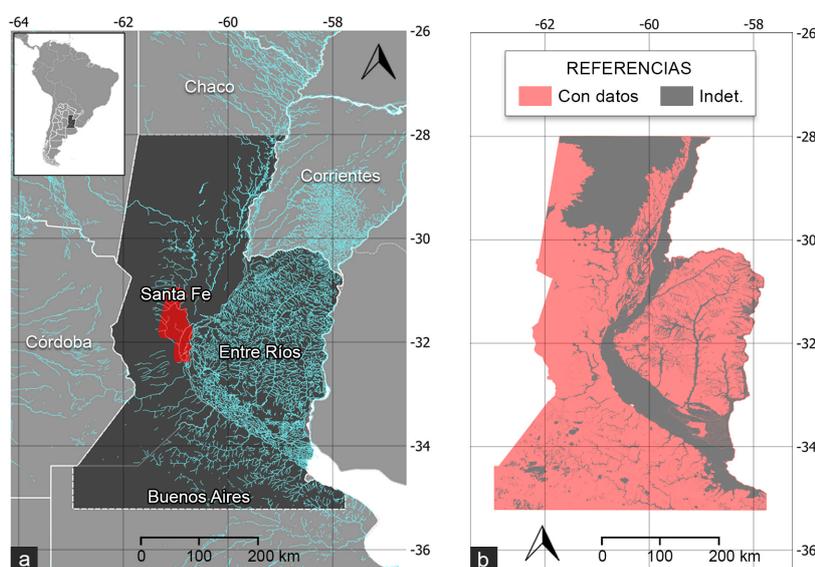


Figura 1. a) Mapa que muestra el área modelada; se resalta la zona en la cual los modelos fueron contrastados con información empírica (Galligani 2020); b) distinción, dentro del área, entre sectores con y sin datos, éstos últimos definidos como indeterminados.

Figure 1. a) Map of the modeled area; the zone where the models were contrasted with empirical information is highlighted (Galligani 2020); b) distinction between sectors with and without data, the latter is defined as indeterminate.

tiene, además, la capacidad de responder a cambios ambientales, por lo que es continuamente variable en el espacio y en el tiempo (Conti 2000). Está compuesto por tres fases: sólida —componentes orgánicos (entre 1% y 11%) e inorgánicos o minerales (entre 50% y 60%), líquida —agua (entre 25% y 35%)— y gaseosa —aire (entre un 15% y 25%)— (Conti 2000). Estas fases interactúan entre sí y le otorgan al suelo propiedades específicas, que pueden resumirse en su textura —composición elemental de las partículas— y su estructura —forma de organización de esos elementos en agregados— (Conti 2000). Desde un punto de vista arqueológico, el suelo es el contexto físico en el cual se aloja la evidencia (Surabian 2012), por lo que el conocimiento de sus propiedades físicas y químicas se vuelve fundamental a la hora de evaluar la preservación de los materiales en él depositados.

En este sentido, hacia la década de 1990, diversos estudios comenzaron a poner énfasis en el uso de técnicas geofísicas y geoquímicas para la exploración de los restos materiales en el suelo (*v.g.* Kars 1997; Mattsson *et al.* 1996; Scharff 1993; Wagner *et al.* 1997). Desde esta perspectiva, el componente material del registro arqueológico es entendido como una pieza de un enorme, pero incompleto, archivo en el suelo, que no es renovable ni reemplazable, volviendo único a cada sitio arqueológico. Así, se afirma que los restos se conservan mejor cuando están enterrados en el suelo, ya que se mantienen en un estado estable y no son perturbados por los procesos de excavación (Kars 1998). A partir de estos estudios pioneros, se ha comenzado a promover la preservación *in situ*, a través de programas interdisciplinarios, específicamente a nivel de la Unión Europea y Estados Unidos, cuyos estudios de base han avanzado en el conocimiento acerca de los mecanismos de deterioro de los restos arqueológicos en el suelo y, por lo tanto, han servido como base para la construcción de los modelos aquí presentados (*v.g.* Corfield 1996; Harmsen *et al.* 2018; Historic England 2016, 2017; Hollesen *et al.* 2018; Jans *et al.* 2002; Kibblewhite *et al.* 2015; Nielsen-Marsh *et al.* 2007; Smith *et al.* 2007; Surabian 2012; Tjellén *et al.* 2016; Willems *et al.* 1997).

Por un lado, la química del suelo influiría de manera significativa sobre la disolución mineral de los huesos (Nielsen-Marsh *et al.* 2007), mientras que su textura y permeabilidad afectarían a los niveles de actividad de la microflora bacteriana aeróbica, que es mayor en suelos bien drenados y aireados y menor, o inexistente, bajo condiciones de anegamiento permanente o semipermanente (Kendall *et al.* 2018; Nicholson 1996; Turner-Walker 2012, 2019). Bajo estas premisas, Nielsen-Marsh *et al.* 2007 definen la categoría de suelos “corrosivos” como aquellos en los que la preservación resultaría poco probable a largo plazo y cuyas características serían: a) bajos niveles de pH; b)

escasa materia orgánica; c) buen drenaje; y d) ausencia de roca calcárea capaz de aportar cationes de Ca. Por el contrario, en los suelos que denominan “benignos” (*i.e.* con pH neutro a básico, alto contenido de materia orgánica y cationes de Ca intercambiable), se esperaría una buena preservación de los huesos (Nielsen-Marsh *et al.* 2007).

Asimismo, algunos estudios han demostrado que la actividad bacteriana, y por lo tanto la descomposición, se produce con mayor rapidez en suelos con pastura, los cuales contienen mayor humedad y un pH que permite que se alojen mayor cantidad de microorganismos (Hayman y Oxenham 2016). A su vez, la textura de un suelo afecta el contenido de agua, el régimen de drenaje y la disponibilidad de oxígeno, factores que, como ya se mencionó, también influyen en la preservación ósea (Nicholson 1996). Los procesos erosivos que sufre el suelo, por otra parte, pueden alterar la profundidad de los entierros y aumentar o disminuir la presión de sedimentos, lo que puede traducirse en fracturas y deformaciones en los huesos (Henderson 1987). Por último, los elementos químicos contenidos en el sedimento (*v.g.* sales, sodio, carbonatos) también interactúan con los restos óseos, favoreciendo o perjudicando su conservación.

Modelos espaciales predictivos de preservación

Desde sus inicios, uno de los propósitos para los que se han desarrollado y empleado modelos espaciales predictivos en arqueología es para la toma de decisiones en las investigaciones y, principalmente, en la planificación y gestión de los recursos patrimoniales. Así, frente a la ausencia de datos suficientes para poder identificar la totalidad de sitios arqueológicos en terreno, la utilidad de los modelos residía en la predicción de aquellos lugares que debían ser protegidos (Verhagen y Whitley 2020). Con la introducción de las nuevas tecnologías espaciales y de geoprocésamiento, y particularmente de los SIG -herramientas de administración de información espacial georreferenciada (Connolly y Lake 2006; McCoy y Ladefoged 2009)-, la gestión de datos y la escala de la información espacial se ha podido incrementar en términos de su tamaño geográfico, la cobertura y el número de registros, lo que amplió y diversificó también su uso (McCoy y Ladefoged 2009).

Las técnicas de recolección de datos, los *métodos para su elaboración* y evaluación y también la utilidad y eficacia de estos modelos han sido muy discutidos en arqueología (ver, por ejemplo, Moon 1993; Verhagen y Whitley 2012, 2020). Uno de los riesgos a la hora de construir modelos es la pérdida de información debido a la escala de resolución. Cuando la información de base utilizada para su elaboración se constituye por sí misma en un producto final de esquemas de generalización y clasificación ya elaborados (*v.g.* tipo de suelo, régimen de

lluvias, altimetría), se corre el riesgo de evadir procesos que operan a escalas más detalladas. En este punto, la decisión del investigador es la que determinará cómo se manejará frente a las limitaciones de los conjuntos de datos disponibles y la elección de la escala de análisis para el modelado predictivo (tanto en términos de resolución como de extensión geográfica), lo cual sin dudas supondrá sesgos en los patrones que puedan surgir (Verhagen y Whitley 2012). Sin embargo, a pesar de las limitaciones, ya que los modelos son “abstracciones simplificadas de una realidad variable y compleja” (Moon 1993, p. 23), en general se destaca que si el objetivo es orientar la investigación y resaltar problemas que requieren un estudio particular, su construcción puede acelerar y optimizar los análisis.

Dentro de los modelos espaciales a escalas pequeñas, se pueden mencionar algunos que se han orientado, a través del empleo de SIG, a la zonificación del espacio con el objetivo de brindar información acerca del potencial arqueológico y patrimonial. Específicamente, un antecedente de construcción de mapas predictivos de preservación mediante SIG lo constituye el trabajo de Kibblewhite *et al.* (2015), quienes han realizado un estudio sobre los factores que intervienen en la preservación del registro arqueológico en el suelo de todo el continente europeo. Con el objetivo de promover el conocimiento sobre la conservación de diferentes materiales y poder predecir el estado de los mismos, estos autores han analizado y descrito los efectos que producen diferentes conjuntos de variables del suelo (*v.g.* hidrología, pH, saturación de bases, contenido de materia orgánica) — que se asocian a tipos edafológicos específicos— sobre los distintos materiales enterrados (*v.g.* huesos, metales, cerámica). De esta manera, realizan una clasificación, a escala continental, de los suelos europeos de acuerdo con su capacidad de preservación de los diferentes materiales que componen el registro arqueológico.

En Argentina se hallan también antecedentes de este tipo de modelos elaborados en SIG, los cuales sirvieron de base metodológica para los presentados en este trabajo. Los mismos fueron elaborados para escalas más acotadas y similares a la aquí trabajada, todos ellos realizados en áreas localizadas dentro de la región pampeana. El primero está constituido por los mapas de preservación elaborados para un área relativamente chica, que abarca un total de 3800 km², localizada en la cuenca del arroyo Chasicó (Catella 2014; Morales *et al.* 2012). Estos modelos se basan también en propiedades específicas de los suelos, las cuales son obtenidas de mapas elaborados por el INTA (a escala 1:500.000) y utilizan SIG para su elaboración. A partir de la metodología implementada en ese trabajo, surgen, luego, dos antecedentes de mapas predictivos para áreas un poco más amplias. Por un lado los modelos ya mencionados para el centro-este de la provincia de Santa Fe, los cuales abarcan 5900 km² y sirvieron de base para el trabajo aquí presentado

(Galligani 2020) y, por otro lado, aquellos elaborados por Morales (2022) para el sur del área ecotonal húmedo-seca pampeana.

Materiales y Métodos

Fuentes de datos y área de estudio

Las fuentes de información ambiental/edafológica utilizadas en este trabajo consisten en cartas y mapas de suelo disponibles en formato digital, elaborados por el INTA y cuya información proviene de relevamientos realizados en diferentes momentos entre los años 1964 y 1990, a distintas escalas espaciales. Esta información ha sido actualizada por el mismo Instituto, en varias oportunidades (*v.g.* se adoptaron nuevos formatos de descripción de series, se agregaron/cambiaron nomenclaturas de los suelos de acuerdo a las nuevas clasificaciones) y fue digitalizada para su visualización a través del Visor GeoInta (<http://visor.geointa.inta.gob.ar/>) y su uso y/o consulta mediante sistemas de información geográfica (SIG) (Bedendo *et al.* 2014; Cruzate *et al.* 2012; Sapino *et al.* 2014).

Para la elaboración de los modelos aquí presentados, se accedió a información cartográfica en formato vectorial (.shp) elaborada a diferentes escalas. En algunos casos, los polígonos ya contenían datos edafológicos adicionales a cada suelo (*v.g.* mapas de suelo de la República Argentina, Cruzate *et al.* 2012) mientras que en el caso de los mapas provinciales esta información debió procesarse a partir de los perfiles representativos y los datos analíticos de cada una de las series de suelo correspondientes. Las escalas espaciales varían de acuerdo a la disponibilidad de información para cada variable y cada sector modelado. Se utilizó la cartografía digital de la República Argentina disponible en la web a escala regional (escala 1:500.000) (Cruzate *et al.* 2012) y también mapas de suelo a escala semidetallada de: 1) sector centro y sur de Santa Fe: escala 1:50.000 (Sapino *et al.* 2014), 2) sector norte de Buenos Aires: escala 1:50.000 (INTA s/f) y 3) Entre Ríos: escala 1:100.000 (Bedendo *et al.* 2014) (Tabla 1).

Para los mapas aquí presentados se recortó un área que abarca la totalidad de las provincias de Santa Fe y Entre Ríos y el norte de la provincia de Buenos Aires, hasta el paralelo -35,21 (Figura 1). En total, el área de estudio ocupa 273.980 km², de los cuales se cuenta con datos sobre suelo para 179.016 km²; el resto está compuesto por sectores catalogados como indeterminados, para los que no hay disponibilidad de datos a escala semidetallada, los cuales abarcan 100.000 km² (Figura 1b). En su mayoría, los sectores indeterminados corresponden a cursos de agua y zonas de influencia —siendo la principal franja sin datos la vinculada al río Paraná y su llanura aluvial— y también a aquellos suelos con relevamiento a nivel de reconocimiento (escala 1:250.000), como el sector norte de la provincia de Santa Fe, en el que predominan tierras de aptitud baja y muy baja.

Variable	Rangos			Escala	Provincia	Referencias y fuentes de datos	
						Espaciales (vectores)	Edafológicos (perfiles analíticos)
Calcio (ppm)	≤ a 8056	> a 8056					
Textura	arenosa	limosa	arcillosa	1:50.000	Santa Fe	Sapino <i>et al.</i> (2014)	http://rafaela.inta.gov.ar/mapas/suelos/_series/
Drenaje	B/MB	reg/imp	malo				
M. orgánica (%)	≤ a 2	> a 2		1:100.000	E. Ríos	Bedendo <i>et al.</i> (2014)	http://geointa.inta.gov.ar/geoparana/web/
pH	< a 6	e 6 y 8	> a 8				
Salinidad (CE ¹)	presencia	ausencia		1:50.000	B. Aires	INTA (s/f)	https://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.htm
Sodicidad (%PSI ²)	≤ a 15	> a 15					
Erosión	presencia	ausencia		1:500.000	Todas	Cruzate <i>et al.</i> (2012)	Incluidos en la tabla de atributos de los polígonos

Tabla 1. Escalas, referencias y fuentes de información de cada variable utilizada para la construcción de los modelos espaciales de preservación ósea.

Table 1. Scales, references and information sources of each variable used for the construction of spatial models of bone preservation.

Referencias: B/MB= bueno/muy bueno; reg/imp= regular/imperfecto; ¹ Conductividad Eléctrica; ² Porcentaje de Sodio de Intercambio en los primeros 40 cm de suelo.

Variables utilizadas

Calcio

La saturación del entorno con iones de calcio puede retardar, e incluso detener, el proceso de disolución mineral del hueso. Un suelo donde el movimiento del agua es limitado y las concentraciones de Ca²⁺ son relativamente altas puede favorecer la conservación de la estructura mineral (Nielsen-Marsh *et al.* 2000). A partir de diversos estudios realizados por Nielsen-Marsh *et al.* (2007), se ha propuesto que en los denominados suelos "benignos" (*i.e.* aquellos que promueven la preservación ósea a largo plazo sin importar la forma en la que ingresan los materiales; grupo B + D, Nielsen-Marsh *et al.* 2007) el contenido de Ca²⁺ es elevado, mientras que en aquellos suelos "corrosivos" es más bajo (grupo A + C, entre 161 y 5691 ppm; Nielsen-Marsh *et al.* 2007; Tabla 2, p.1526). Para poder comparar esos valores con los disponibles en los perfiles analíticos de los suelos de Argentina, se procedió a convertir el contenido de Ca²⁺ expresado en miliequivalente (meq/100g) a la misma escala utilizada por los autores mencionados (ppm) y se asignaron a la categoría "corrosivos" a aquellos en los que los valores de calcio son inferiores a 8056 ppm, valor mínimo del rango de suelos "benignos" (Nielsen-Marsh *et al.* 2007).

Textura

La textura de un suelo es la proporción (en porcentaje de peso) de las partículas menores a 2 mm de diámetro (arena, arcilla y limo) (Gisbert Blanquer *et al.* 2010). En zonas con baja humedad, los suelos de textura gruesa promueven, frecuentemente, la desecación, ya que inhiben la descomposición y pueden preservar materiales orgánicos durante miles de años. Esto se debe a que el gran tamaño de los poros permite una alta tasa de

difusividad de los gases y una rápida eliminación de la humedad a través de la matriz del suelo (Surabian 2012). Sin embargo, producen un mayor grado de abrasión en los huesos (en estado fresco, ya que en huesos secos son los suelos arcillosos y limosos los que lo hacen; Fernández-Jalvo y Andrews 2003) y, en zonas con altas precipitaciones como la que nos concierne, permiten un mayor drenaje y, por lo tanto, un mayor lavado de los componentes minerales del hueso, acelerando los procesos diagenéticos (Grupe 1995; Hedges y Millard 1995). Por lo tanto, se consideró **la "textura arenosa" como una variable que actúa en detrimento de la preservación ósea.**

Drenaje

La principal acción del agua sobre los huesos es su intervención en la disolución y la consiguiente lixiviación del componente mineral del hueso (Henderson 1987; Nielsen-Marsh *et al.* 2000). Hedges y Millard (1995) describen tres tipos de regímenes hidrológicos que afectan en forma diferencial a los huesos: difusión (condiciones de saturación), flujo (movimiento continuo de agua) y recarga (ciclo mojado-seco). Específicamente el régimen de flujo, que provoca el tránsito permanente de agua a través del hueso, puede producir una disolución rápida y repentina de la fracción inorgánica y estaría implicado en los casos más severos de desmineralización de especímenes arqueológicos (Pike *et al.* 2001). De esta manera, los suelos bien drenados tienden a intervenir negativamente en la degradación del tejido óseo, tanto química como físicamente (Hedges y Millard 1995; Kendall *et al.* 2018), por lo que se consideraron de manera negativa para la preservación ósea aquellos suelos con drenaje "bueno o muy bueno", de acuerdo a la descripción del perfil

representativo de cada serie.

Materia orgánica

Diversas investigaciones asocian altos niveles de materia orgánica disuelta en la solución del suelo con una mayor protección de los materiales orgánicos en general, y restos óseos en particular (Douterelo *et al.* 2010; Kibblewhite *et al.* 2015; Nielsen-Marsh *et al.* 2007; Surabian 2012). Cuando el suelo es rico en materia orgánica disuelta, puede conferir resistencia a la degradación biológica de los materiales orgánicos enterrados, haciendo que éstos queden protegidos por la absorción y la oclusión en la matriz del suelo (Surabian 2012). Para clasificar los suelos de acuerdo con esta variable no pudo utilizarse el rango propuesto por Nielsen-Marsh *et al.* (2007; Tabla 2, p.1526) ya que el método utilizado por el INTA para el relevamiento de materia orgánica es el % de materia orgánica (método de Walkley-Black) mientras que el utilizado en aquel trabajo es el método de pérdida de peso por ignición (*Loss On Ignition* - LOI). Al no existir ninguna escala para poder comparar los resultados de ambos, se consideró el límite propuesto por Kibblewhite *et al.* (2015) de 2% de contenido de materia orgánica en alguno de los horizontes de suelo, asignando una variable negativa a aquellos suelos que no llegan a contener ese porcentaje.

pH

El pH es la medida de la reacción del suelo, que consiste en la actividad del hidrógeno (H+) presente en la solución del mismo e influye en todos los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en él (Conti 2000). Si bien algunos estudios han señalado que el pH del suelo considerado aisladamente no es el mayor determinante en la conservación de los huesos (Nicholson 1996), se ha probado que este factor incide de diversas maneras en su preservación (Gordon y Buikstra 1981; Lyman 1994; Nicholson 1996; Watson 1967). Se ha observado una correlación negativa significativa entre el pH del suelo y el grado de destrucción de los huesos, el cual aumenta a medida que el pH decrece (Gordon y Buikstra 1981). Esto se debe a que el valor de pH influye en el rango y los tipos de microorganismos disponibles en el ambiente, principalmente debido a la interacción competitiva entre grupos de organismos (Teuscher y Adler 1960) y en la disolución de la fracción mineral del hueso, *i. e.* un aumento de la acidez, acompañado de bajo contenido de calcio y fósforo, produce un reemplazo de los iones de calcio por la hidroxiapatita, haciendo que la degradación ocurra más rápido (Turner-Walker 2008). Para la elaboración de los modelos se utilizaron los datos disponibles para las series de suelo de las tres provincias trabajadas¹. Se clasificaron los suelos simplificando la tabla propuesta por Blume *et al.* (2016: 155; Tabla 5.9) en: 1) ácidos (pH menor a 6); 2) neutros (pH entre 6 y 8); 3) alcalinos (pH mayor a 8), considerando la primera

¹ En el caso de los perfiles analíticos que presentaban más de un valor para cada horizonte de suelo (A y B), los mismos se promediaron, previa transformación a concentración de hidrogeniones (Sørensen 1909).

categoría como negativa para la preservación ósea.

Salinidad

De acuerdo con el porcentaje de sodio intercambiable, los suelos se pueden clasificar en: 1) salinos; 2) sódicos; 3) salino-sódicos (Santos *et al.* 2012). Los suelos salinos se caracterizan por presentar concentración de sales solubles en el perfil; las más comunes son los cloruros y los sulfatos de calcio (CaCl₂; CaSO₄), sodio (NaCl; Na₂SO₄) y magnesio (MgSO₄; MgCl₂) (Flores García 1991). Como fuera mencionado, los huesos se constituyen en un material poroso que puede absorber sales solubles. Al evaporarse el agua, las sales absorbidas se secan, se cristalizan y aumentan su volumen, causando presión en la estructura ósea y produciendo daños físicos que van desde descamación de la superficie hasta fracturas que, en casos extremos, llevan a la destrucción del hueso (Cronyn 1990; Hamilton 1997). Por lo tanto, en los polígonos de suelos definidos como "salinos" en la descripción de su perfil representativo y que exhiben presencia de conductividad eléctrica (CE)² en sus datos analíticos, se sumó el atributo salinidad como un factor que actúa en detrimento de la preservación ósea.

Sodicidad

Los suelos sódicos se caracterizan por presentar altas cantidades de sodio intercambiable pero bajo nivel de sales solubles. Estas propiedades tienen consecuencias en la estructura del suelo, ya que las partículas de arcilla tienden a separarse debido a la acción del sodio, que es un material dispersante. De este modo, dichas partículas se mueven por la estructura del suelo bloqueando sus poros, reduciendo la infiltración del agua y la conductividad hidráulica (que es la medida de la movilidad del agua por este medio). Así, el suelo puede anegarse y/o inundarse —a la vez que expandirse— cuando se moja, tornándose altamente plástico, mientras que se vuelve duro y se cuartea cuando se seca, formando costras (Flores García 1991). Debido a su potencial destructivo físico por endurecimiento y resquebrajamiento del perfil, además de la proclividad a la erosión, se clasificó a la sodicidad como una variable que actúa negativamente en la preservación ósea. Se clasificaron como suelos sódicos a aquellos en los cuales el PSI³ supera el 15% en los 40 cm superiores del horizonte (Bresler *et al.* 1982).

Erosión

Cuanto más profundo se hallen los restos arqueológicos en un perfil de suelo, es probable que su conservación sea mayor, ya que están más resguardados de los efectos de la erosión (Kibblewhite *et al.* 2015). Los diferentes tipos de erosión de los suelos (*v.g.* hídrica, eólica) pueden

² El concepto de salino es delimitado técnicamente por la presencia de conductividad eléctrica (CE), variable que mide la concentración de sales solubles presentes en la solución del suelo.

³ El PSI es el porcentaje de sodio de intercambio. En los casos en que no estaba calculado en el perfil representativo de las series de suelo, se obtuvo en base a los valores de sodio de intercambio y de capacidad de intercambio catiónico (CIC), mediante la fórmula Na⁺/CIC.

producir la reexposición de los restos arqueológicos (*i.e.* procesos anatóxicos) y no sólo alterar su disposición estratigráfica, sino también exponerlos a la acción de agentes postdeposicionales (*i.e.* pisoteo, acción de roedores y carnívoros, meteorización) (Behrensmeyer 1978; Lyman 1994). Con el objetivo de clasificar a los suelos del área de acuerdo a la susceptibilidad a la erosión, tanto hídrica como eólica (ver Catella 2014) se utilizó la Cartografía digital de la República Argentina del INTA (escala 1:500.000) y se caracterizó como una variable que actúa negativamente en la preservación ósea.

Procedimientos para la generación de mapas predictivos en SIG

Para la generación de los modelos predictivos se utilizó el software libre QGIS (Versión 3.16, <http://www.qgis.org/es/site/>) y se trabajó tanto en formato vectorial como *raster*, dependiendo de la etapa de procesamiento, siguiendo la metodología SIG empleada por Morales *et al.* (2012). Como primera medida, se cargaron los mapas obtenidos en formato vectorial y se combinaron los polígonos que pertenecían al mismo tipo de suelo de acuerdo a la información disponible en los perfiles analíticos de cada base de datos provincial asociada. Los valores de los atributos ya descritos se registraron y procesaron previamente en planillas de Ms. Excel, siguiendo los rangos de clasificación de cada variable (Tabla 1). Estas planillas se unieron luego con las capas vectoriales correspondientes mediante la herramienta "Unión". En el caso del mapa en escala 1:500.000, como ya tenía los datos adicionados en la tabla de atributos de cada polígono de suelo, este paso no fue necesario, solamente se creó un nuevo campo para clasificar los suelos de acuerdo a los rangos mencionados para la variable "erosión" (Tabla 1).

A continuación, los vectores se clasificaron de acuerdo a cada variable, quedando conformados siete mapas, uno para cada uno de los atributos que intervienen en la preservación ósea. Para el proceso de combinación de esas variables, las capas fueron convertidas a formato *raster*, dado que este modo permite la superposición de las mismas de forma más sencilla (Connolly y Lake 2006). Además, al convertir todos los mapas a este formato, no se presentaron inconvenientes técnicos para las combinaciones entre capas con diferentes escalas. Para ello, se asignó el valor "1" a aquellos campos y polígonos que actúan de manera negativa respecto de la preservación ósea y luego, mediante la herramienta Rasterizar (Raster > Conversión > Rasterizar), se generaron superficies continuas simplificadas de cada una de las variables seleccionadas. A partir de estas coberturas, se realizaron diferentes combinaciones, con la ayuda de la herramienta "Construir Raster Virtual" (Raster > Miscelánea > Combinar). Esta herramienta permite superponer capas de imágenes y, así, poder ver las zonas en las que se solapan las variables a través de las distintas bandas de color.

En total, se obtuvieron tres combinaciones, que se denominaron Modelo 1, Modelo 2a y Modelo 2b. Para el Modelo 1, se combinaron solo aquellas variables que conforman a los suelos "corrosivos" (*sensu* Nielsen-Marsh *et al.* 2007), aquellos en los cuales, con independencia del modo de ingreso de los tejidos óseos, la preservación resultaría mala a largo plazo: calcio, pH, materia orgánica y drenaje. Para esta última variable, se combinaron las capas de drenaje y textura, ya que la textura arenosa facilita también un buen drenaje. Para las variantes del Modelo 2, se sumaron, además de las utilizadas en el Modelo 1, el resto de las variables edafológicas relevadas: sodicidad y salinidad para el Modelo 2a y se adicionó la capa obtenida a escala nacional de susceptibilidad a la erosión para generar la última variante, el Modelo 2b. Finalmente, se elaboraron dos mapas simplificados, que muestran la sumatoria de variables que actúan negativamente en cada sector, con el objetivo de lograr una interpretación más clara de los mismos.

Resultados

Los mapas de las diferentes variables que afectan la preservación ósea se exponen en la Figura 2. Se muestran resaltados aquellos sectores en los que cada atributo actúa negativamente: bajos niveles de calcio (Figura 2a), textura arenosa (Figura 2b), buen drenaje (Figura 2c), bajo % de materia orgánica (Figura 2d), bajos niveles de pH (Figura 2e), salinidad (Figura 2f) y sodicidad (Figura 2g) presentes en los horizontes de suelo y susceptibilidad a la erosión, tanto eólica como fluvial (Figura 2h). Aquellos sectores para los cuales no se contaba con información, y se definieron como indeterminados, se visualizan de color blanco.

Como se puede observar en las imágenes, algunas variables como el pH y el drenaje, están mayormente distribuidas en casi todos los suelos de las tres provincias. En el caso del calcio, solo algunos suelos de Entre Ríos presentan contenidos elevados como para favorecer la preservación (sectores en gris; Figura 2a). La presencia de textura arenosa se restringe a algunos sectores del centro-este y suroeste de la provincia de Santa Fe, este de Entre Ríos y noroeste de Buenos Aires (Figura 2b). Respecto del contenido de materia orgánica, en general pocos suelos no alcanzan el mínimo (2%) para favorecer la preservación. La salinidad se concentra principalmente en el norte de Santa Fe, donde también se hallan suelos sódicos, y en el sur de Entre Ríos, mientras que en Buenos Aires son pocos los polígonos con suelos de estas características, los cuales se ubican principalmente en la franja más septentrional (Figuras 2f y 2g). Por último, la acción de la erosión se restringe al sector sur del área de estudio, correspondiente a la provincia de Buenos Aires, con un pequeño foco en la porción del sur de Santa Fe (Figura 2h).

La primera combinación de las variables expuestas dio

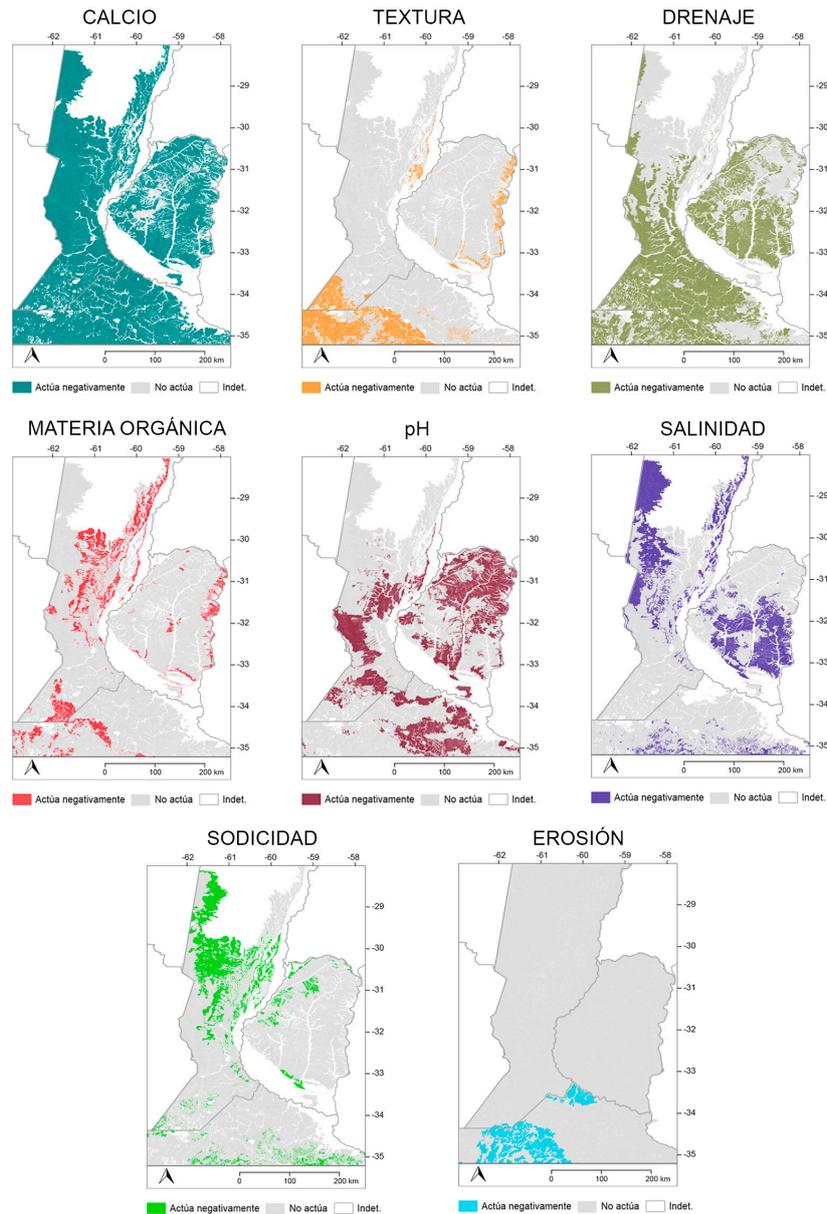


Figura 2. Mapas finales de cada una de las variables edafológicas con efectos negativos sobre la preservación ósea.

Figure 2. Final maps of each soil variables with negative effects on bone preservation.

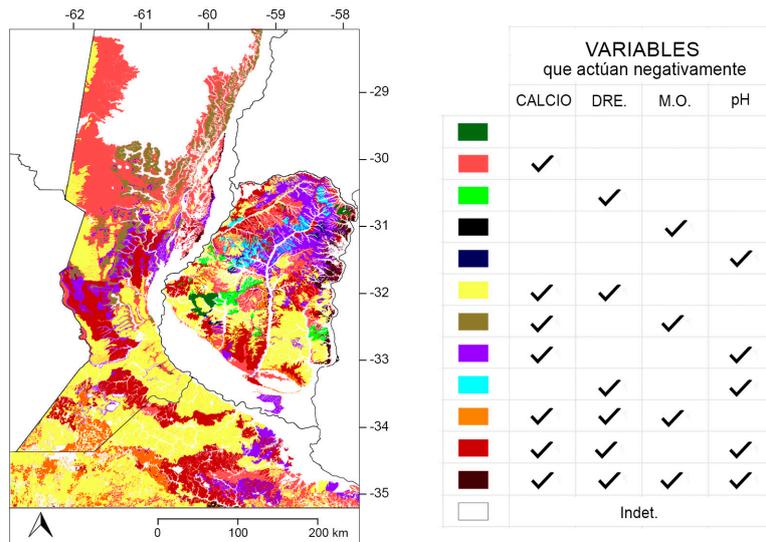
como resultado el Modelo 1 (Figura 3), en el cual solo dos sectores muy pequeños, localizados en la provincia de Entre Ríos, presentan suelos en los que ninguna de las variables actúa negativamente, los cuales se pueden visualizar de color verde oscuro. En algunos sectores, principalmente hacia el norte del área, solo hay ausencia de roca calcárea (variable calcio), a lo que se adiciona bajo contenido de materia orgánica hacia el noreste. Grandes porciones del centro y el sur se hallan afectadas por bajos contenidos de calcio y buen drenaje, a los que se suma la variable materia orgánica hacia el suroeste. En el norte de Entre Ríos, centro de Santa Fe y sureste de Buenos Aires se visualizan zonas en las cuales, además de la variable más

extendida (calcio) se adiciona que los suelos exhiben bajos valores de pH. El resto de las combinaciones se restringen a zonas específicas, principalmente de la provincia de Entre Ríos, *i.e.* suelos donde solo actúa el drenaje y/o el pH. Por último, solo algunas áreas de poca extensión ubicadas en las franjas orientales de las provincias de Santa Fe y Entre Ríos y un pequeño sector en el centro-sur de la porción de Buenos Aires muestran suelos en los cuales actúan la totalidad de los factores (Figura 3).

En el caso del Modelo 2, como fuera mencionado, se generaron dos variantes. Para la primera se adicionaron, además de las que se conjugaron para el Modelo 1, la

Figura 3. Modelo 1, logrado a partir de la combinación de las cuatro variables correspondientes a suelos corrosivos (*sensu* Nielsen-Marsh *et al.* 2007). En el cuadro se especifican las variables activas en cada uno de los polígonos: Dre.= drenaje, M.O.= materia orgánica. Se resalta que para la variable drenaje se combinaron las capas drenaje y textura.

Figure 3. Model 1, achieved from the combination of the four corresponding variables of corrosive soils (*sensu* Nielsen-Marsh *et al.* 2007). The table specifies the active variables in each polygon: Dre.= drainage, M.O.= organic matter. It is highlighted that, for the drainage variable, the drainage and texture layers were combined.



salinidad y la sodicidad, mientras que para la segunda variante (Modelo 2b) se sumó también el factor erosión, cuya zona de acción se muestra rodeada por línea de puntos. Como resultado, se obtuvo una compleja y heterogénea combinación de factores, que, por un lado restringe aún más los sectores de la provincia de Entre Ríos sin ninguna variable actuando, y, por otro, localiza a la variable erosión en el sur del área de estudio, principalmente en el sector que ocupa la provincia de Buenos Aires (Figura 4).

Para facilitar la interpretación de los modelos expuestos, la Figura 5 muestra dos mapas simplificados en los que se observan los sectores con mayor y menor probabilidades de preservación ósea, resultado de la suma de factores que actúan negativamente para el Modelo 1 (Figura 5a) como para el Modelo 2 (Figura 5b); para este último se decidió tomar la opción que combina la totalidad de las variables. En ambos modelos (Modelo 1 y Modelo 2), los dos sectores que presentan suelos con condiciones óptimas de preservación se localizan en la provincia de Entre Ríos y no alcanzan el 0,5% del total de la superficie con datos. En el caso del Modelo 1, el área sin ningún factor actuando ocupa 591 km² (0,3% de los suelos con datos) y en el Modelo 2, 320 km² (0,2% de los suelos con datos). Si se incluyen aquellas zonas con suelos indeterminados, el porcentaje desciende a 0,2% y 0,1%, respectivamente. Si se consideran las áreas donde actúa un solo factor, en el Modelo 1 abarcan 40.227 km² (14,7% del total del área, 22,5% de los suelos con datos) y en el Modelo 2b 16.046 km² (5,9% del total del área, 9% de los suelos con datos). Esta diferencia se debe a que al sumar la sodicidad y la salinidad en el segundo modelo, muchos sectores que presentan un factor en el primero elevan la cantidad de variables a 2 o 3 (Figura 5).

Si, por el contrario, hacemos foco en aquellos sectores en los que actúan la mayor cantidad de factores, en el

Modelo 1 el máximo son cuatro y las zonas donde están todos activos ocupan solamente 2658,1 km² (1% del total del área, 1,5% de los suelos con datos). Estas se ubican en los bordes orientales de Entre Ríos y Santa Fe (hacia el sector central) y en una zona pequeña en el sur, correspondiente a la provincia de Buenos Aires (Figura 5a). En cambio, en el Modelo 2b los sectores con cuatro o más factores ocupan un total de 22.370 km² (8,2% del total del área, 12,5% de los suelos con datos), dentro de los que se visualizan sectores donde las variables activas llegan a cinco (1901,8 km²) y seis (214,2 km²) (Figura 5b).

Discusión

En los modelos presentados se puede observar que aquellos suelos con menos probabilidades de preservación combinan escasez de calcio —que es una variable recurrente en casi todos los suelos de la región—, buen drenaje, textura gruesa y salinidad o sodicidad en los suelos de Buenos Aires, pH en los de Entre Ríos y poca materia orgánica en los de Santa Fe. De acuerdo a la información proveniente del área de estudio restringida testada en las investigaciones previas ya mencionadas (centro-este de Santa Fe), la mayoría de esas características son las que, de manera general, presentan aquellos suelos en los que efectivamente se evidencia una mala preservación ósea, la cual pudo corroborarse a partir de la observación y análisis de restos óseos arqueológicos, específicamente de variables que informan acerca de la preservación tanto macro como microestructural de los huesos (Galligani 2020).

La información obtenida de esos estudios asevera que los peores estados de preservación ósea se correlacionan con zonas con buen drenaje, textura arenosa, poca materia orgánica y bajos contenidos de calcio (Galligani 2020). Esta última característica hace que los huesos se mantengan, desde un punto de vista químico, en una

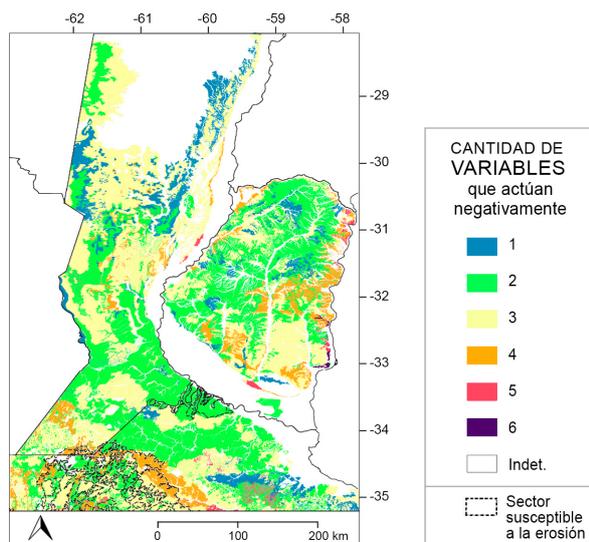


Figura 4. Modelo 2a, logrado a partir de la combinación de todas variables edafológicas relevadas. Se señala con línea de puntos la zona afectada por erosión (Modelo 2b).

Figure 4. Model 2a, achieved from the combination of all edaphological variables. The area affected by erosion is marked with a dotted line (Model 2b).

situación inestable (*i.e.* poseen una baja probabilidad de reemplazo, por iones de Ca, de los protones de hidrogeno incorporados por la hidroxiapatita a medida que ésta se degrada; White y Hannus 1983). Como resultado, los restos óseos se hallan muy fragmentados y friables, característica que es acompañada, en la mayoría de los casos, por problemas de preservación histológica y también por bajos o nulos contenido de colágeno. Esta última particularidad —que ha presentado inconvenientes a la hora de realizar análisis isotópicos (ver discusión en Galligani *et al.* 2022)— puede vincularse con otra característica de los suelos: el buen drenaje, favorecido muchas veces por la textura arenosa. Así, tanto las condiciones para que se produzca la hidrólisis química del colágeno óseo como las posibilidades de lixiviación de la fase mineral de los huesos se ven favorecidas (Collins *et al.* 1995; Hedges y Millard 1995; Nielsen-Marsh y Hedges 2000; Nielsen-Marsh *et al.* 2007; Pike *et al.* 2001; Smith *et al.* 2007).

Otra variable evaluada para contrastar los modelos en el área restringida ha sido la bioerosión ósea (Smith *et al.* 2007), que se vincula directamente con la actividad bacteriana, la cual provoca como resultado una pérdida gradual del contenido de colágeno a lo largo del tiempo (Turner-Walker 2008). Asimismo, la mayor porosidad de los huesos debido a la bioerosión también aumenta las posibilidades de lixiviación de la fase mineral, que ya se ve acelerada, como se ha mencionado, por el buen drenaje y también en aquellos suelos con regímenes de recarga (Hedges y Millard 1995; Nielsen-Marsh y Hedges 2000; Nielsen-Marsh *et al.* 2007; Pike *et al.* 2001), como el caso

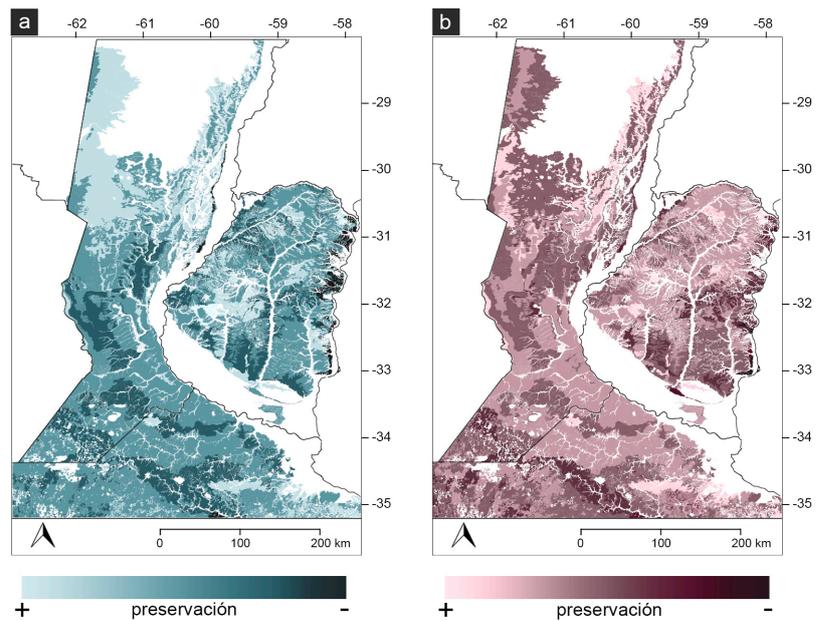
de muchos de los sitios de la llanura aluvial del río Paraná. Algo a destacar respecto de este último sector es que los huesos recuperados presentan una buena preservación micro y macroestructural relativa en comparación con los demás sitios de continente. En general, exhiben menor fragilidad y fragmentación, así como también menores índices de bioerosión (Galligani 2020). Sin embargo, en lo que respecta al colágeno óseo, se han realizado estudios de uno de los indicadores más utilizados para evaluar su calidad para análisis de isótopos estables (la razón C:N; DeNiro 1985) observando que, si bien se han recuperado grandes proporciones de material orgánico en algunos elementos, la calidad del mismo presenta valores por fuera de los parámetros considerados normales, incluso de los menos restrictivos (ver discusión en Galligani *et al.* 2022).

Desafortunadamente, las características de estos suelos son difíciles de discernir, no solo por la actual ausencia de datos edafológicos —hecho que podría soslayarse con futuros trabajos de relevamiento local— sino por las características de inestabilidad y dificultad de categorización y estudio que presentan los suelos vinculados a la dinámica del mencionado curso fluvial. Principalmente compuesto por planicies sometidas a procesos fluviales, este sector presenta una marcada heterogeneidad en los suelos, debido, entre otros factores, a las fluctuaciones de la oferta de agua y la recurrencia periódica de inundación y sequía. Los suelos muestran un desarrollo incipiente y, en oposición a los de tierra firme, la diferenciación de horizontes es menos clara, constituyéndose por complejos de capas depositadas y redepositadas por el río que varían localmente (Marchetti *et al.* 2013).

En este sentido, resulta un desafío la obtención de información sobre los suelos de las zonas mencionadas, principalmente porque las cuencas de los ríos Paraná y Uruguay son los sectores que exhiben las mayores concentraciones de sitios arqueológicos de la región, muchos de ellos con gran cantidad de restos arqueofaunísticos y con **áreas** de cementerio con variabilidad de entierros humanos (*v.g.* Mazza y Loponte 2012; Ramos van Raap 2018). Esto probablemente se deba a las condiciones ambientales y a la gran disponibilidad de recursos que brinda este tipo de ambientes, los cuales habrían propiciado el desarrollo y la movilidad de las poblaciones humanas en el pasado. Sin embargo, a diferencia del norte de la provincia de Santa Fe —zona para la que tampoco se cuenta con información de suelo a escala detallada— el sector vinculado a los cursos fluviales mencionados cuenta con una larga trayectoria de investigaciones arqueológicas, que datan desde fines del siglo XIX. Por lo tanto, la diferencia en las proporciones de sitios registrados puede deberse a las distintas intensidades con las que han sido trabajadas ambas áreas, lo que motiva a incentivar también la ampliación de la base de datos edafológicos en todos los sectores indeterminados.

Figura 5. Probabilidades de preservación ósea de acuerdo a la suma de variables que actúan en cada sector según el Modelo 1 (a) y el Modelo 2b (b). En blanco se muestran las zonas con suelos indeterminados.

Figure 5. Bone preservation probabilities according to the sum of variables that act in each sector of Model 1 (a) and Model 2b (b). Areas with indeterminate soils are shown in white.



Por otro lado, ya se ha resaltado que cuando se construyen modelos a escalas medianas o pequeñas no se considera la influencia de factores estrictamente locales en la historia tafonómica reciente de muchos conjuntos (v.g. procesos de urbanización, agricultura extensiva, ganadería, forestación), los cuales pueden actuar directa e indirectamente sobre los materiales, principalmente sobre aquellos que ya se encuentran diagenéticamente alterados y progresivamente debilitados (Galligani 2013). No obstante, el objetivo de los mapas aquí presentados es servir de base para empezar a discutir el problema de la preservación ósea y su vinculación con el suelo a escala regional, distinguiendo aquellos sectores donde la preservación se ve potencialmente más limitada. Esto no excluye la necesidad de realizar análisis a escala de sitio, por el contrario, es pertinente continuar perfeccionando las expectativas de los modelos elaborados a través de su evaluación con información empírica proveniente del análisis de variables diagenéticas de huesos recuperados en sitios arqueológicos alojados en diferentes sectores de la región.

En este punto, se llevó a cabo un relevamiento de información publicada acerca de la preservación ósea en sitios de la región modelada y, exceptuando la zona analizada en los trabajos previos ya mencionados, se observa que los datos son escasos y poco detallados. En general, se menciona una preservación macroestructural buena o muy buena en el delta inferior del río Paraná (Loponte y Mazza 2021; Mazza *et al.* 2018) y buena en el delta superior (Scabuzzo *et al.* 2015; Torino *et al.* 2022). Respecto de la preservación del colágeno óseo, los datos publicados muestran que una gran cantidad de sitios de la región presentan problemas similares a los observados en los huesos analizados en el área restringida, con algunos

problemas con la calidad del mismo (ver discusión en Galligani *et al.* 2020). Si bien la mayoría de los sitios que presentan valores alterados de la razón C:N se localizan en la llanura aluvial del río Paraná —donde no hay datos edafológicos que permitan generar expectativas de preservación—, aquellos que pudieron ser asignados a un polígono de suelo con expectativas se ubican en sectores con al menos dos, y en general tres, factores que actúan en detrimento de la preservación ósea, todos ellos coincidentes con los que caracterizan a los suelos corrosivos según los criterios de Nielsen-Marsh *et al.* (2007) (Modelo 1).

En síntesis, si bien incipientes, los resultados obtenidos hasta el momento permiten postular a los modelos aquí presentados como mapas regionales de preservación ósea que posibilitarán comenzar a discutir este problema en la región del sur del Litoral argentino, generando expectativas de condiciones de preservación diferencial que podrán ser contrastadas con información arqueológica a medida que avancen las investigaciones locales en el análisis de variables que informen acerca del estado de preservación ósea a diferentes niveles estructurales (v.g. estudios histológicos, evaluaciones macroscópicas, análisis de cantidad y calidad de colágeno). Esto permitirá perfeccionar los modelos y ajustar las predicciones derivadas, que pueden resultar útiles tanto desde el punto de vista de las investigaciones regionales como de uno más amplio, que incluya la preservación, a largo plazo, del patrimonio arqueológico.

Consideraciones finales

Los modelos aquí planteados constituyen una primera aproximación a la preservación ósea de la región del

Litoral argentino a escala regional amplia y a partir de información edafológica y ambiental disponible. Las evaluaciones de las diferentes combinaciones de variables utilizadas para la generación de los mismos han sido realizadas con información empírica proveniente de estudios realizados sobre restos óseos de sitios arqueológicos en un área menor, que está contenida en la superficie general de estudio, y se han explorado, además, las relaciones con la información disponible en la bibliografía arqueológica de la región.

A partir de lo expuesto se destaca el potencial de las predicciones generadas, las cuales abren nuevas perspectivas no sólo para los estudios arqueológicos regionales, sino también para el manejo de los recursos de interés patrimonial. En este sentido, la información obtenida podrá contribuir a la toma de decisiones apropiadas para la salvaguarda de los sitios y restos arqueológicos. Un conocimiento más profundo acerca de las variables ambientales que influyen en la preservación de los restos enterrados en los diferentes yacimientos permitirá pensar acciones de protección y defensa ya sea *in situ* o a través de la realización de rescates arqueológicos sistemáticos en aquellos sectores que presenten menores probabilidades de preservación.

Como perspectivas a futuro, se plantean dos vías que aportarán información para poder seguir ajustando los modelos. Por un lado, la comparación de los modelos con datos obtenidos de sitios arqueológicos acerca de la preservación ósea, tanto a escalas macroestructural (*v.g.* grietas, disolución química) y microestructural (*v.g.* cristalinidad, bioerosión ósea) como sobre cantidad y calidad de colágeno recuperado en los huesos. Por otro lado, se espera aumentar el conocimiento acerca de los suelos presentes en el norte de la provincia de Santa Fe, la llanura aluvial, el Delta del río Paraná y la cuenca del río Uruguay, a pesar de la complejidad que esto conlleva.

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a Verónica Sapino y Dante Bedendo por responder cordialmente a mis pedidos por mail, a Jorge Postma por colaborar con su conocimiento sobre suelos, a Gustavo Barrientos por la lectura crítica de este trabajo y a Abril Castagnola por la corrección de las traducciones.

Bibliografía

Bedendo, D., Schulz, G., Pausich, G. y Tentor, F. (2014). *Cartas de Suelos de Entre Ríos*. Proyecto INTA-PFIP ER07-08, INTA EEA Paraná, Centro Regional Entre Ríos. Publicación realizada por servicio de mapeo web (WMS) en la red GeoINTA: [http://geointa.inta.gov.ar/web/index.php/cartas-de-](http://geointa.inta.gov.ar/web/index.php/cartas-de-suelos-de-entre-rios/)

[suelos-de-entre-rios/](http://geointa.inta.gov.ar/web/index.php/cartas-de-suelos-de-entre-rios/)

- Behrensmeyer, A. (1978). Taphonomic and ecologic information from bone weathering. *Paleobiology*, 4(2), 150-162.
- Blume, H. P., Brümmer, G. W., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K. y Wilke, B. M. (2016). *Scheffer/Schachtschabel Soil Science*. Springer.
- Bonomo, M. y Barboza, M. C. (2014). Arqueología del Litoral. Introducción. *Revista del Museo de Antropología*, 7(2), 215-218.
- Borrero, L. (1988). Tafonomía regional. En N. Ratto y A. F. Haber (Eds.), *De Procesos, Contextos y otros Huesos* (pp. 9-15). ICA (Sección Prehistoria), FFyL, Universidad de Buenos Aires.
- Bresler, E., Mc Neal, B. y Carter, D. (1982). *Saline and Sodic Soils. Principles Dynamics Modelling*. Springer.
- Castro, J. C., Costa Angrizani, R., Di Prado, V. y Castiñeira Latorre, C. (2017). Diez años de encuentros y discusiones sobre la Arqueología del nordeste de Argentina y áreas vecinas. *Comechingonia. Revista de Arqueología*, 21(2), 5-13.
- Catella, L. (2014). *Movilidad y Utilización del Ambiente en Poblaciones Cazadoras-Recolectoras del Sur de la Región Pampeana: La Cuenca del Arroyo Chasicó como Caso de Estudio*. [Tesis Doctoral inédita, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata]. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/87512>
- Collins, M. J., Riley, M., Child, A. y Turner-Walker, G. (1995). A basic mathematical simulation of the chemical degradation of ancient collagen. *Journal of Archaeological Science*, 22, 175-83. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0019>
- Connolly, J. y Lake, M. (2006). *Geographical Information Systems in Archaeology*. Cambridge University Press.
- Conti, M. E. (Ed.) (2000). *Principios de Edafología. Con Énfasis en Suelos Argentinos*. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Corfield, M. (1996). Preventive conservation for archaeological sites. En A. Roy y P. Smith (Eds.), *Archaeological Conservation and its Consequences Preprints of the Contributions to the Copenhagen Congress* (pp. 32-37). Londres.

- Cronyn, J. M. (1990). *The Elements of Archaeological Conservation*. Routledge.
- Cruzate, G., Gómez, L., Pizarro, M., Mercuri, P. y Banchemo, S. (2012). *Mapa de Suelos de la República Argentina*. Versión Digital Corregida, Revisada y Aumentada (Versión 1.0). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Proyecto PNUD ARG/85/019. <http://www.geointa.inta.gov.ar/2013/05/26/suelos-de-la-republica-argentina/>.
- DeNiro, M. J. (1985). Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. *Nature*, 317, 806-809.
- Douterelo, I., Goulder, R. y Lillie, M. (2010). Soil microbial community response to land-management and depth, related to the degradation of organic matter in english wetlands: Implications for the *in situ* preservation of archaeological remains. *Applied Soil Ecology*, 44, 219-227. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.12.009>
- Fernández-Jalvo, Y. y Andrews, P. (2003). Experimental effects of water abrasion on bone fragments. *Journal of taphonomy*, 1(3), 147-163.
- Flores García, A. (1991). *Suelos Salinos y Sódicos: Breve Revisión Bibliográfica*. Departamento de Suelos y Riego, Facultad de Agronomía de La Habana.
- Galligani, P. E. (2013). *Tafonomía de los entierros humanos del sitio RSCII*. [Tesis de Licenciatura, Facultad de Humanidades y Artes, Universidad Nacional de Rosario].
- Galligani, P. E. (2020). *Preservación Ósea Diferencial en un Ambiente Subtropical del Centro-Este de Argentina: Tafonomía Regional en Perspectiva Arqueológica*. Bar International Series 3003. <https://doi.org/10.30861/9781407357300>
- Galligani, P. E., Barrientos, G., Catella, L. y Morales, N. S. (2020 - 2021). Diagénesis ósea, calidad del colágeno y señal isotópica ($\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$) en muestras humanas y faunísticas de la cuenca Salado-Coronda (pcia. de Santa Fe): implicancias regionales. Trabajo presentado en las XV Jornadas Nacionales de Antropología Biológica. La Plata.
- Gisbert Blanquer, J. M., Ibañez Asensio, S. y Moreno Ramón, H. (2010). *La Textura del Suelo*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Valencia.
- Gordon, C. J. y Buikstra, J. E. (1981). Soil pH, bone preservation and sampling bias at mortuary sites. *American Antiquity*, 46, 566-571. <https://doi.org/10.2307/280601>
- Grupe, G. (1995). Preservation of collagen in bone from dry sandy soil. *Journal of Archaeological Science* 22, 193-199. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0021>
- Hamilton, D. L. (1997). *Basic Methods of Conserving Underwater Archaeological Material Culture*. Texas A&M University.
- Harmsen, H., Hollesen, J., Koch Madsen, C., Albrechtsen, B., Myrup, M. y Matthiesen, H. (2018). A Ticking Clock? Preservation and Management of Greenland's Archaeological Heritage in the Twenty-First Century. *Conservation and Management of Archaeological Sites*, 20(4), 175-198. <https://doi.org/10.1080/13505033.2018.1513303>
- Hayman, J. y Oxenham, M. (2016). Peri-mortem disease treatment: a little known cause of error in the estimation of the time since death in decomposing human remains. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 48(2), 171-185. <https://doi.org/10.1080/00450618.2015.1042048>
- Hedges, R. E. M. y Millard, A. R. (1995). Bones and groundwater: Towards the modelling of diagenetic processes. *Journal of Archaeological Science*, 22, 155-164. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0017>
- Henderson, J. (1987). Factors determining the state of preservation of human remains. En A. Boddington, A. N. Garland, y R. C. Janaway (Eds.), *Death, Decay, and Reconstruction: Approaches to Archaeology and Forensic Science* (pp. 43-54). Manchester University Press.
- Historic England (2016). *Preserving archaeological remains: Decision-Taking for Sites Under Development*. Historic England.
- Historic England (2017). *Land Contamination and Archaeology. Good Practice Guidance*. Historic England.
- Hollesen, J., Callanan, M., Dawson, T., Fenger-Nielsen, R., Friesen, T., Jensen, A., Markham, A., Martens, V. V, Pitulko, V. V. y Rockman, M. (2018). Climate change and the deteriorating archaeological and environmental archives of the Arctic. *Antiquity*, 92(363), 573-586. <https://doi.org/10.15184/aqy.2018.8>

- INTA. *Carta de suelos de la provincia de Buenos Aires*. Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria. <https://inta.gob.ar/documentos/carta-de-suelos-de-la-provincia-de-buenos-aires>
- Jans, M. M. E., Kars, H., Nielsen-Marsh, C. M., Smith, C. I., Nord, A. G., Arthur, P. y Earl, N. (2002). *In situ* preservation of archaeological bone: a histological study within a multidisciplinary approach. *Archaeometry*, 44(3), 343-352. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.t01-1-00067>
- Kars, H. (1997). Conservation science and the archaeological property: a review of current research, needs and opportunities. En W. J. H., Willems, H. Kars y D. P. Hallewas (Eds.), *Archaeological Heritage Management in the Netherland. Fifty years State Service for Archaeological Investigations* (pp. 173-191). Van Gorcum.
- Kars, H. (1998). Preserving our in situ archaeological heritage: a challenge to the geochemical engineer. *Journal of Geochemical Exploration*, 62, 139-147.
- Kendall, C., Høier Eriksen, A. M., Kontopoulos, I., Collins, M. y Turner-Walker, G. (2018). Diagenesis of archaeological bone and tooth. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 491, 21-37. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.11.041>
- Kibblewhite, M., Tóth, G. y Hermann, T. (2015). Predicting the preservation of cultural artefacts and buried materials in soil. *Science of the Total Environment*, 529, 249-263. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.036>
- Loponte D. y Mazza B. (2021). Breastfeeding and weaning in Late Holocene hunter-gatherers of the lower Paraná wetland, South America. *American Journal of Physical Anthropology*, 176(3), 504-520. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24381>
- Lyman, R. L. (1994). *Vertebrate Taphonomy*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1002/oa.1390050411>
- Marchetti, Z., Giraudo, A., Ramonell, C. y Barberis, I. (2013). Humedales del Paraná con grandes lagunas. En L. Benzaquén, D. Blanco, R. Bó, P. Kandus, G. Lingua, P. Minotti, R. Quintana, S. Sverlij y L. Vidal (Eds.), *Sistemas de Paisajes de Humedales del Corredor Fluvial Paraná-Paraguay* (pp. 169-175). Secretaría de Ambiente de la Nación.
- Mattsson, E., Nord, A. G., Tronner, K., Fjaestad, M., Lagerlöf, A., Ullén, I. y Borg, G. (1996). *Deterioration of Archaeological Material in Soil. Results on Bronze Artefacts*. Riksantikvarieämbetet och Statens Historiska Museer Rapport 10.
- Mazza, B. y Loponte, D. (2012). Las prácticas mortuorias en el humedal del Paraná inferior. *Arqueología Iberoamericana*, 13, 3-21.
- Mazza, B., Acosta, A., Guarido, A., Buc, N. y Loponte, D. (2018). Anthropogenic modifications to archaeological human bones from the lower Paraná River basin (Argentina). *Journal of Archaeological Science: Reports* 20, 647-661.
- McCoy, M. D. y Ladefoged, T. N. (2009). New developments in the use of spatial technology in archaeology. *Journal of Archaeological Research*, 17, 263-295. <https://doi.org/10.1007/s10814-009-9030-1>.
- Moon, H. (1993). *Archaeological predictive modelling: an assessment*. Resources Inventory Committee.
- Morales, N. (2022). *La Relación Humanos-Fauna en el Sur del Área Ecotonal Húmedo-Seca Pampeana Desde una Perspectiva Zooarqueológica*. [Tesis Doctoral inédita. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata].
- Morales, N., Catella, L. y Oliva, F. (2012). Una primera aproximación a los agentes y procesos post-depositacionales actuantes en los paisajes arqueológicos de la cuenca del arroyo Chasicó, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Trabajo presentado en *Simposio Paisajes Arqueológicos en el Holoceno Tardío*. Universidad Nacional de Rosario.
- Nicholson, R. A. (1996). Bone degradation, burial medium and species representation: Debunking the myths, an experiment based approach. *Journal of Archaeological Science*, 23, 513-533. <https://doi.org/10.1006/jasc.1996.0049>
- Nielsen-Marsh, C. M. y Hedges, R. (2000). Patterns of diagenesis in bone I: the effects of site environments. *Journal of Archaeological Science*, 27, 1139-1150. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0537>
- Nielsen-Marsh, C. M., Gernaey, A., Turner-Walker, G., Hedges, R., Pike, A. y Collins, M. (2000). The chemical degradation of bone. En M. Cox y S. Mays (Eds.), *Human Osteology in Archaeology and Forensic Science* (pp. 439-454). Greenwich Medical Media.

- Nielsen-Marsh, C. M., Smith, C. I., Jans, M. M. E., Nord, A., Kars, H. y Collins, M. (2007). Bone diagenesis in the European Holocene II: taphonomic and environmental considerations. *Journal of Archaeological Science*, 34, 1523-1531. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.11.012>
- Olson, E. C. (1980). Taphonomy: its history and role in community evolution. En A. K. Behrensmeyer y A. Hill (Eds.), *Fossils in the Making: Vertebrate Taphonomy and Paleocology* (pp. 5-19). University of Chicago Press.
- Pike, A., Nielsen-Marsh, C. M. y Hedges, R. (2001). Modelling bone dissolution under different hydrological regimes. En R. A. Millard (Ed.), *Archaeological Sciences 97. Proceedings of the Conference Held at the University of Durham* (pp. 127-132). British Archaeological Reports, International Series 939. Archaeopress.
- Ramos van Raap, M. A. (2018). Caracterización del registro mortuorio de la entidad arqueológica Goya-Malabrigo. En G. Politis y M. Bonomo (Eds.), *Nuevas perspectivas sobre la entidad arqueológica Goya-Malabrigo* (pp. 175-199). Editorial UNICEN.
- Rho, J., Kuhn-Spearing, L. y Zioupos, P. (1998). Mechanical properties and the hierarchical structure of bone. *Medical Engineering & Physics*, 20, 92-102. [https://doi.org/10.1016/S1350-4533\(98\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S1350-4533(98)00007-1)
- Santos, D. J., Wilson, M. G. y Ostinelli, M. (2012). *Metodología de Muestreo de Suelo y Ensayos a Campo. Protocolos Básicos Comunes*. Ediciones INTA.
- Sapino, V., León Giacossa, C. y Tosolini, R. (2014). *Mapas de Suelo de la Provincia de Santa Fe*. INTA-EEA.
- Scabuzzo, C., Ramos van Raap, A., Bonomo, M. y Politis, G. (2015). Estudios bioarqueológicos en el sitio Los Tres Cerros 1 (Delta Superior del río Paraná, Entre Ríos, Argentina). *Boletim Museo Paranaense Emilio Goeldi*, 10, 509-535.
- Scharff, W. (1993). *Gefährdung Archäologischer Funde Durch Immissions-bedingte Boden-versauerung*. Landesdenkmalamt Baden-Württemberg.
- Smith, C. I., Nielsen-Marsh, C. M., Jans, M. M. E. y Collins, M. J. (2007). Bone diagenesis in the European Holocene I: patterns and mechanisms. *Journal of Archaeological Science*, 34, 1485-1493. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.11.006>
- Sørensen, S. P. L. (1909). Enzymstudien II: Mitteilung. Über die Messung und die Bedeutung der Wasserstoffionenkonzentration bei enzymatischen Prozessen. *Biochemische Zeitschrift*, 21, 131-304.
- Surabian, D. (2012). *Preservation of Buried Human Remains in Soil*. Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture.
- Teuscher, H. y Adler, R. (1960). *The Soil and Its Fertility*. Reinhold Publishing Corp.
- Tjellén, A. K. E., Matthiesen, H., Petersen, L. M. M., Sør, N. E. y Kristiansen, S. M. (2016). *In situ* Preservation Solutions for Deposited Iron Age Human Bones in Alken Enge, Denmark. *Conservation and Management of Archaeological Sites*, 18(1-3), 126-138. <https://doi.org/10.1080/13505033.2016.1182768>
- Torino, R., Loperfido, M., Álvarez, M., Rodríguez, J. M., Bidegain, R., Scabuzzo, C., Angrizani, R. y Bonomo, M. (2022). New Studies in Cerro De Las Pajas Blancas 1 Archaeological Site (Lower Paraná River, Argentina). Disponible en SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4050373>. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4050373>
- Turner-Walker, G. (2008). The chemical and microbial degradation of bones and teeth. En R. Pinhasi y S. Mays (Eds.), *Advances in Human Palaeopathology* (pp. 3-29). John Wiley & Sons.
- Turner-Walker, G. (2012). Early bioerosion in skeletal tissues: persistence through deep time. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 265, 165-183.
- Turner-Walker, G. (2019). Light at the end of the tunnels? The origins of microbial bioerosion in mineralised collagen. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 529, 24-38. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.05.020>
- Verhagen, P. y Whitley, T. G. (2012). Integrating predictive modelling and archaeological theory: a live report from the scene. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 19, 49-100. <https://doi.org/10.1007/s10816-011-9102-7>
- Verhagen, P. y Whitley, T. G. (2020). Predictive Spatial Modelling. En M. Gillings, P. Hacigüzeller y G. Lock (Eds.) *Archaeological spatial Analysis* (pp. 231-246). Taylor and Francis Group.
- Wagner, D., Dakoronia, F., Ferguson, C. C., Fischer, W. R., Hills, C., Kars, H. y Meijers, R. (1997). Soil

archive classification in terms of impact on conservability of archaeological heritage. En I. MacLeod, S. Pennec y L. Robbiola (Eds.), *METAL 95. Proceedings of the International Conference on Metals Conservation* (pp. 21-26.) ICOM CC Metals Working Group.

Watson, J. P. (1967). A termite mound in an Iron Age burial ground in Rhodesia. *Journal of Ecology*, 55(3),

663-669. <https://doi.org/10.2307/2258416>

White, E. M. y L. A. Hannus (1983). Chemical weathering of bone in archaeological soils. *American Antiquity*, 48, 316-322. <https://doi.org/10.2307/280453>

Willems, W. J. H., Kars, H. y Hallewas, D. P. (Eds.) (1997). *Archaeological Heritage Management in the Netherlands*. Van Gorcum.