

Espacios y especies. Propuesta de modelización espacial para comprender las extinciones del Pleistoceno Tardío - Holoceno Temprano

Gustavo D. Buzai¹

Universidad Nacional de Luján / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

@ [gdb@unlu.edu.ar]

Karina V. Chichkoyan²

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

@ [karinavch@gmail.com]

RECIBIDO 02-02-2023
ACEPTADO 16-03-2023

Cita sugerida: Buzai, G. D. y Chichkoyan, K. V. (2023). Espacios y especies. Propuesta de modelización espacial para comprender las extinciones del Pleistoceno Tardío – Holoceno Temprano. Revista *Huellas*, Volumen 27, N° 1, Instituto de Geografía, EdUNLPam: Santa Rosa. Recuperado a partir de: <http://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/huellas>

DOI: <http://dx.doi.org/10.19137/huellas-2023-2708>

Resumen

El estudio de la distribución de especies es cada vez más necesario para entender las extinciones de megamamíferos ocurridas durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno temprano. Procedimientos de análisis espacial, como el modelado cartográfico y las técnicas de evaluación multicriterio, permiten encontrar correspondencias espaciales entre variables geográficas, ambientales, faunísticas y humanas, para indagar en las causas de esas pérdidas. Desde una aproximación conceptual, el presente trabajo analiza características del abordaje interdisciplinario entre la Geografía y la Paleontología, el papel de los modelos espaciales insertos en el realismo científico, los procesos racionalistas de causalidad y las posibilidades de las técnicas cuantitativas en el análisis espacial sistemático tomando el caso del perezoso terrestre *Scelidotherium leptcephalum* (Mylodontidae, Xenarthra). Culmina con una propuesta de modelado cartográfico como construcción lógica de aplicación en la que la dimensión espacial toma un lugar central de indagación.

Palabras clave: Modelos espaciales; Análisis Espacial; Modelado cartográfico; Megafauna, Extinciones



Spaces and species. Proposal for spatial modelling to understand the extinctions of the Late Pleistocene – Early Holocene periods

Abstract

The study of the distribution of species is increasingly more necessary to understand the extinction of mega mammals that occurred during the late Pleistocene and early Holocene periods. Spatial analysis procedures, such as cartographic modelling and multicriteria evaluation techniques, allow for the finding of spatial correspondences between geographic, environmental, faunal and human variables, to investigate the causes of these losses. From a conceptual approach, this paper analyses the characteristics of the interdisciplinary approach between Geography and Palaeontology, the role of spatial models in scientific realism, rationalist causality processes, and the possibilities of quantitative techniques in systemic spatial analysis, taking the case of the ground sloth *Scelidotherium leptocephalum* (Mylodontidae, Xenarthra). It concludes with a proposal for cartographic modelling as a logical construction of application in which the spatial dimension takes a central place of inquiry.

Keywords: Spatial Models; Spatial Analysis; Cartographic Modelling; Mega-fauna; Extinction

Espaços e espécies. Proposta de modelo espacial para compreender as extinções do Pleistoceno Final – Holoceno Inicial

Resumo

O estudo da distribuição das espécies é cada vez mais necessário para entender as extinções de megamamíferos que ocorreram durante o Pleistoceno Final e Holoceno Inicial. Procedimentos de análise espacial, como modelagem cartográfica e técnicas de avaliação multicritério, permitem encontrar correspondências espaciais entre variáveis geográficas, ambientais, faunísticas e humanas, a fim de investigar as causas dessas perdas. A partir de uma abordagem conceitual, este artigo analisa as características da abordagem interdisciplinar entre Geografia e Paleontologia, o papel dos modelos espaciais presentes no realismo científico, os processos de causalidade racionalista e as possibilidades de técnicas quantitativas na análise espacial sistêmica, considerando o caso da preguiça terrestre *Scelidotherium leptocephalum* (Mylodontidae, Xenarthra). Ao final, propõe-se uma de modelagem cartográfica como construção lógica de aplicação em que a dimensão espacial representa um lugar central na pesquisa.

Palavras-chave: Modelos espaciais; Análise Espacial; Modelagem cartográfica; Megafauna; Extinções

Introducción

Las causas de la extinción de los grandes mamíferos y megamamíferos (los primeros mayores de 44 kg y los segundos de más de una tonelada y que por cuestiones de espacio ambos se mencionarán como megafauna) a finales del Pleistoceno o principios del Holoceno, es un tema recurrentemente discutido a nivel mundial (Cione et al., 2009; Monjeau et al., 2017; Chichkoyan, 2021).

Los cambios ambientales y la dispersión humana a través de los continentes son los principales motivos en ser invocados debido a la casi sincronía de ambos (Araujo et al., 2017; Monjeau et al., 2017). En América del Sur, la necesidad de encontrar asociaciones claras entre humanos y megafauna, para probar una causa humana, y la escasez de este tipo de registros (a excepción de algunas regiones como la pampeana en Argentina) lleva directamente a proponer al cambio climático como causa principal de la extinción (Borrero, 2009). Sin embargo, la desaparición de distintas comunidades nativas en un continente, no puede ser reducida a la unicausalidad, debido a la gran variabilidad de condiciones locales y a la introducción de *Homo sapiens* en espacios no antropizados previamente.

Un fenómeno de estas características lleva a la necesidad de una perspectiva multidisciplinar, que integre datos obtenidos de diferentes ciencias (Paleontología, Arqueología, Geografía), como los registros fósiles que permiten reconstruir el desarrollo de la vida en el planeta, la materialidad de las sociedades del pasado y la incorporación del conjunto de la geosfera en la conformación del hábitat.

Esta posibilidad de integración surge claramente ante una perspectiva sistémica que dé cuenta de las regularidades y relaciones de causalidad que permiten modelar las asociaciones espaciales de la totalidad de aspectos incorporados en el análisis. Una aproximación desde el materialismo sistémico emerge como un desarrollo conceptual fundamental para el logro de este objetivo, a través de considerar que la realidad es independiente del pensamiento, que es material, se estructura en relaciones sistémicas y que la ciencia provee de los elementos de mayor capacidad para su estudio.

El presente trabajo aborda estos aspectos conceptuales con centralidad en la modelización de la distribución de especies (MDE) donde los modelos espaciales se presentan como nexo entre la teoría y realidad. La primera como visión paradigmática compuesta por conceptos y procedimientos desarrollados por múltiples disciplinas y el segundo en una comprensión del pasado. Finalmente se incorpora un diseño de procedimientos para un caso del territorio argentino en abordaje paleogeográfico a través del análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Aspectos conceptuales, el abordaje científico

El estudio de la relación entre espacios y especies focalizado en el descubrimiento de extinciones sucedidas hace miles de años puede ser abordado desde las perspectivas disciplinaria, multidisciplinaria e interdisciplinaria.

Las disciplinas científicas tienen por objetivo estudiar recortes de la realidad los cuales se realizan desde un punto de vista temático (objeto material) o en donde se aplica un específico punto de vista (objeto formal), para profundizar en diferentes conocimientos acerca de su estructura y función.

En una primera instancia encontramos ciencias específicas con núcleos conceptuales que las identifican. En este trabajo se reconocen aportes de la Paleontología en el estudio de los fósiles que permiten comprender aspectos de la vida en el pasado, la Geología centrada en la evolución física de nuestro planeta, la Ecología en el abordaje de la relación entre los seres vivos y su ambiente, la Arqueología en el estudio humano de los vestigios culturales del pasado y la Geografía que con su pensamiento espacial estudia la diferenciación areal sobre la superficie terrestre. Este abordaje producirá la propuesta de modelización espacial final.

La multidisciplinaria significa abordar el mismo objeto de estudio desde diferentes perspectivas científicas y cada una con individualidad. En este sentido, todas contribuirán para lograr una visión lo más completa posible aportando desde puntos de vista y objetivos específicos. Cuantas más disciplinas sean utilizadas más aproximaciones habrá del caso de estudio. Finalmente se intentará realizar una síntesis a partir de ver aspectos de confluencia, no contradictorios entre los resultados.

La interdisciplina puede definirse como el desafío de estudiar situaciones concretas en las cuales la práctica científica realice demandas bien ajustadas de un saber hacia otro (Morello, 1982). Sería el diálogo fructífero entre científicos formados en diferentes disciplinas. En este trabajo los autores han avanzado conjuntamente en un diálogo y demandas entre la Paleontología y la Geografía, una relación disciplinaria que históricamente formuló el campo de la Paleogeografía, como estudio que tiene por objetivo comprender las condiciones geográficas en tiempos geológicos tomando elementos de la Geografía Física, y aquí incluiremos la dinámica entre especies por la competencia respecto del espacio vital.

Pueden ser tomados conceptualmente otros campos interdisciplinarios como la Ecología del Paisaje que relaciona la Biología y Ecología con la Geografía Regional, la Arqueología Espacial que junto a la Geografía brinda posibilidades de análisis mediante la incorporación de Geotecnología (Lanzelotti, 2017; Coll y Lanzelotti, 2019) y la Geoinformática que incor-

porando conocimientos geográficos al ámbito de la informática, permite el desarrollo de los SIG para lograr un avance en la automatización de procedimientos espaciales (Dobson, 1983).

Las relaciones interdisciplinarias (y entre científicos de diferentes disciplinas) se desarrollan con armonía cuando se remite a una perspectiva paradigmática compartida como visión del mundo (Kuhn, 1993), lo cual permite realizar las demandas ajustadas en términos de una similar cosmovisión.

En este trabajo, el sustento teórico general de base aparece en la perspectiva sistémica y la aplicación de métodos cuantitativos en el análisis espacial, que a través de los modelos brinda un claro vínculo entre teoría y praxis. Este vínculo se encuentra basado en el materialismo sistémico apoyándose en aspectos concretos de la realidad (realismo) y sus vínculos causales (inferencia causal).

La aproximación a la realidad se logra por modelización como aproximación operativa a una experimentación computacional que concretiza la teoría a través de la propuesta metodológica, con la finalidad de obtener la experiencia empírica del pasado. Teoría, modelización y praxis deberán mostrar con claridad el mismo proceso para llegar a la comprobación de la hipótesis.

Modelos en el realismo científico

La realidad espacial encuentra su definición operativa desde diferentes perspectivas de la Geografía cuando se analiza la relación de la población con su medio (*ecológica*), la diferenciación areal (*colorógica*) y al formular leyes y generar modelos de las distribuciones espaciales (*sistémica*).

El concepto de modelo tiene dos significados que, en el análisis espacial, surgen en diferentes instancias (Haggett, 1983): representación e ideal. El primero destaca los aspectos fundamentales de la realidad al centrarse en sus elementos y relaciones y, el segundo, muestra hacia donde debería encaminarse la organización espacial.

Con estas bases, una perspectiva realista considera que los modelos son una clara representación del mundo ya que procede a buscar patrones como fenómenos de interés (Bolinska, 2016) ajustados a situaciones empíricas mientras que, de forma opuesta, una perspectiva instrumentalista se los considera principalmente una herramienta de cálculo que apoya la toma de decisiones desde un punto de vista técnico (Lucero, 2020).

El espacio geográfico brinda la materialidad subyacente que permite asumir los modelos como una visión del mundo, que intenta llegar a la verdad como adecuación entre la representación y los enunciados observacionales. Los logros científicos se encuentran vinculados a la búsqueda de la verdad, aunque su alcance siempre se encuentre a una distancia difícilmente mensurable.

Desde el punto de vista epistemológico el falsacionismo introduce una perspectiva probabilística de distancia hacia la verdad, la cual se considera provisoria hasta el surgimiento de una mejor aproximación. En el caso de la conformación física de nuestro planeta, la historia del debate sobre su forma (Cassini-Newton), muestra que es posible alcanzarla.

Realizar una modelización retrospectiva, como la que se propone en este trabajo, es un camino aplicativo que puede ser verificado ante el hallazgo de evidencias que confirmen las localizaciones obtenidas. La utilización de un SIG apoya una teoría sustantiva vinculada al realismo científico al considerar al modelo como elemento de representación independiente de la actividad intelectual del usuario del modelo. Por supuesto no se desconoce el rol que desempeña la actividad intelectual, aunque no toma a un lugar central como en la perspectiva deflacionaria que privilegia la posición del usuario como mediatizador entre el modelo y la realidad.

Una importante síntesis fue realizada por Giere (2004) a partir de considerar cuatro componentes que enmarcan la totalidad de relaciones. Hay *sujetos* que utilizan modelos para representar partes del mundo a partir de un propósito. En este caso los autores analizamos la utilidad de la modelización para comprender algunos aspectos de la extinción de los grandes mamíferos y megamamíferos a finales del Pleistoceno o principios del Holoceno. Una modelización retrospectiva como la propuesta, presenta elementos para guiar el trabajo de campo que lleve hacia su verificación, demuestra su aptitud a través de las relaciones de causalidad que brindan iniciales explicaciones.

Modelización espacial

La realidad, abordada como sistema complejo, se entiende estratificada en diferentes niveles de procesos y análisis. Existen estructuras de organización que son transversales a todas las escalas y encuentran identidad a través características propias de cada una de ellas. Las primeras fueron estudiadas por la teoría general de los sistemas (Bertalanffy, 1968) y la segunda corresponde a una ampliación realizada por la teoría de los sistemas complejos (García, 2006). La modelización espacial encuentra su nivel focal en el espacio geográfico y a partir de allí puede ampliarse todo análisis a partir de recurrir a un nivel supra-focal de mayor amplitud e infra-focal de mayor detalle (Buzai, 2014).

Desde un punto de vista sistémico es posible obtener resultados a través del uso de las matemáticas como lenguaje de la ciencia y la geometría como lenguaje de la forma espacial. La Geografía ha logrado una integración clara de ambos componentes, los cuales actualmente se encuentran estandarizados a través de los SIG en el campo del denominado modelado cartográfico resuelto a través del álgebra de mapas (Tomlin, 1990).

Basados en estos avances geográficos, en los últimos años, los Modelos de Distribución de Especies (MDE), utilizados para analizar la disminución actual de la biodiversidad, están emergiendo para comprender las extinciones del Pleistoceno a nivel de macroescala (Lima-Ribeiro y Diniz-Filho, 2013; Varela et al., 2018) y se han destacado sus aplicaciones en cuestiones arqueológicas (Franklin et al., 2015; Prates y Perez, 2021). Los MDE realizan la asociación espacial entre datos ambientales y faunísticos para proyectar, mediante la lógica causal, la distribución de las especies. La modelización espacial permite descubrir zonas favorables para su supervivencia y considera la fragmentación ambiental que pudo ser perjudicial (Araujo y Peterson, 2012).

Los MDE se convirtieron en una herramienta de importancia para la búsqueda de resoluciones a cuestiones tales como la existencia de refugios ecológicos, las posibles cronologías de la extinción o la determinación de lugares con mayores posibilidades de registrar restos fósiles (Araujo y Peterson, 2012; Lima-Ribeiro y Diniz-Filho, 2013). Para ello se utilizan procedimientos para el tratamiento de la información, donde se integran criterios geográficos con ocurrencias fosilíferas en un espacio-tiempo específico.

El resultado de los MDE es cartográfico y refleja la dinámica de los cambios climáticos y la distribución real y potencial de la megafauna a través del tiempo (Lima-Ribeiro y Diniz-Filho, 2013; Varela et al., 2018). La distribución espacial potencial permite generar hipótesis sobre el proceso de extinción ya que, si las condiciones ambientales resultaron favorables para un determinado periodo en que la especie estudiada ya no se registra en la estratigrafía, se pueden inferir cronologías o parámetros alternativos que pudieron influir en su desaparición.

Por lo tanto, los MDE pueden ser útiles para desentrañar las extinciones del Pleistoceno Tardío-Holoceno Temprano, ya que proveen escenarios alternativos que permitirían jerarquizar las probabilidades de la presencia de determinada especie en determinado tiempo/espacio, la disminución de las poblaciones o bien si la incorporación de nuevos grupos pudo influir en la desaparición de los taxones. Los mapas de distribución tienen la capacidad de integrar cronologías de distintos taxones, su contemporaneidad con otras especies, el rango de extensión de las poblaciones y predecir que ambientes poseían las condiciones ideales para su continuidad en un período determinado.

Inferencia causal

Al aplicar procedimientos de análisis espacial cuantitativo la explicación del dónde siempre remite a sus causas, por tal motivo, la inferencia causal resulta fundamental para explicar los resultados obtenidos o generar hipótesis como guías de la investigación.

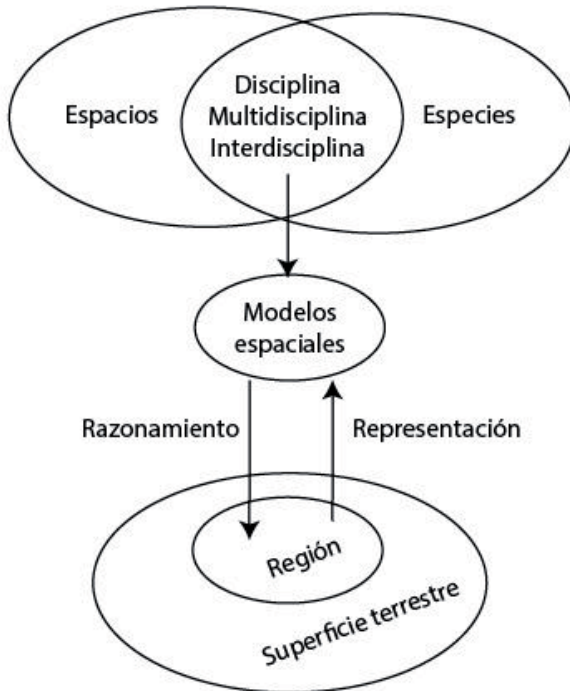
Es posible que causalidad y determinismo sean considerados sinónimos, sin embargo, Bunge (1978) aclara que el segundo es una forma extrema del primero al contemplar que los acontecimientos brindan resultados ineludibles. Como estrategia central del racionalismo, la inferencia causal a través de la aplicación de métodos cuantitativos (Buzai y Santana Juárez, 2019; Buzai y Montes Galbán, 2019) conecta aspectos teóricos y metodológicos para la obtención de resultados. La asociación espacial realizada a través del modelado cartográfico muestra que muchas mediciones cuantitativas representan una magnitud de cualidad, de esta manera un cálculo del coeficiente r de Pearson implica una intensidad de relación, pero no elementos de causalidad. Realizar una inferencia es llegar a conclusiones enmarcadas en una teoría que interpreta los resultados cuando es posible llegar a la conclusión de que se evidencian diferencias en la probabilidad de un evento A sea producido por una causa B , siendo $P(A \setminus B) > P(A)$.

Desde un punto de vista metodológico, las correlaciones espaciales no permiten establecer relaciones causales y la relación $A \rightarrow B$, $B \rightarrow A$ surge ante diferentes valores de correlación que se presenta en áreas de superposición. Cuando dos variables tienen altos valores de correlación el porcentaje de explicación se conoce a través del coeficiente de determinación r^2 aunque puede suceder que ambas distribuciones espaciales se expliquen a través de un factor subyacente, tal cual lo establece el principio de Reinchenbach (San Pedro y Suárez, 2014). En este sentido el análisis factorial permite despejar estos factores subyacentes para ser trabajados evitando la multicolinealidad.

Lo anterior muestra que en ninguno de los casos es posible inferir relaciones causales si no se considera la interpretación teórica de la temática que permite explicar el comportamiento de los datos. En este sentido, tampoco resulta posible que la estructura causal sea definida técnicamente de forma automatizada (San Pedro y Suárez, 2014) y si bien la aplicación del análisis exploratorio de datos espaciales (ESDA, *Exploratory Spatial Data Analysis*) permite mostrar la intensidad de relaciones desde un punto de vista cuantitativo (coeficiente de correlación) y visual (cartografía y gráficos de dispersión) la causalidad es resultado de la aprehensión conceptual.

La Figura N° 1 fue realizado a partir del análisis de los trabajos de Berry (1964), Bunge (1972), Haggett (1976) y Giere (2004) a partir de una confluencia epistemológica en el análisis de la realidad. Se centra en la Geografía como ciencia y destaca su objeto formal (Perspectiva espacial), identidad de la perspectiva humana (Buzai, 2016, 2021). El camino conceptual muestra una fuerte vinculación entre Geografía y Cartografía sintetizada en el modelado cartográfico (Rabella i Vives, 2016). La teoría geográfica, orientada al análisis espacial, permite un abordaje de la realidad con una función cognitiva y operacional.

Figura N° 1. Modelos espaciales como nexo entre la teoría y la realidad



Fuente: Elaboración propia.

Marco aplicativo-metodológico. Espacio de extinciones: Pampa argentina

Definición temática

En la región pampeana se registró la extinción de al menos 49 especies y 35 géneros de megafauna junto con la entrada temprana de *Homo sapiens* (Cione et al., 2009; Messineo et al., 2021) y aunque la región sufrió una importante pauperización faunística, todavía no se encuentra clara la cronología y el proceso de estas pérdidas (Chichkoyan, 2021). A nivel paleontológico, las evidencias fósiles, arqueológicas y climáticas fueron resumidas en la Hipótesis del Zigzag Roto, la cual propone que el Pleistoceno (que duró entre los 2.5 millones de años a 10.000 años atrás aproximadamente), (Cuadro N° 1), se caracterizó por periodos glaciares, donde predominaron condiciones áridas y secas y espacios abiertos, e interglaciares con mayor humedad y que permitieron el desarrollo de áreas boscosas.

La megafauna se encontraba adaptada al paisaje glaciar abierto y árido, por lo que su biomasa y distribución aumentaban y comenzaban a ocupar una mayor superficie. En el período interglaciar se desarrollaban áreas boscosas que fragmentaban el paisaje, aislando y disminuyendo a estas comunidades. Si bien la cantidad de individuos pudo reducirse en momentos críticos, la variedad se mantuvo, permitiendo el repoblamiento de los espacios (Cione et al., 2009). Sin embargo, en el período interglaciar que comenzó con el Holoceno, hace 10.000 años (Cuadro N° 1), la megafauna no solo disminuyó en cantidad y superficie ocupada, sino que simplemente se extinguió. Esta hipótesis propone que el único evento biológico y geológico que diferenció este período de los otros, fue la entrada de *Homo sapiens*, ya que las temperaturas y humedad fueron similares a los pasados. Por lo que, sin la presencia de nuestra especie, la megafauna habría sobrevivido como en otros periodos (Cione et al., 2009). Sin embargo, a nivel estratigráfico no hay presencia de megafauna por lo menos desde el Holoceno Medio.

Desde la Arqueología, a la mencionada escasez de asociación humanos-megafauna, se le suma que son pocas las dataciones confiables en colágeno, directamente extraído de restos óseos y los fechados más recientes son confusos y controversiales (Messineo et al., 2021). Distintos sitios pampeanos indicarían una supervivencia de la megafauna hasta el Holoceno Temprano, pero nuevos estudios están demostrando que muchas de las muestras están contaminadas (Politis et al., 2019; Messineo et al., 2021). Esta observación se realizó luego de aplicar técnicas más avanzadas de dataciones a restos de *Megatherium americanum* (Megatheriidae, Xenarthra) un perezoso terrestre de aproximadamente 4.000 kg. Los nuevos fechados permitieron descartar aquellos del Holoceno Temprano obtenidos anteriormente, reubicando las extinciones de megafauna pampeana hacia el Pleistoceno Tardío, sin que llegara ninguna especie al Holoceno (ver detalles en Politis et al., 2019; Messineo et al., 2021).

Sin embargo, también existe la posibilidad de un proceso diacrónico en las extinciones de los distintos taxones (no todos los grupos se habrían extinguido al mismo tiempo) (Abramson et al., 2017) o la posibilidad de una supervivencia diferencial en refugios. En los casos donde diferentes especies desaparecen, como la región pampeana, hay aspectos que pueden influir en que las mismas se extinguirán en cascada o en diferentes momentos cronológicos. Estos condicionantes pueden incluir distintos rasgos biológicos, como tamaño, capacidad reproductiva o hábitos alimenticios, la relación entre distintos grupos, o la existencia de espacios que por sus condiciones permitan una supervivencia diferenciada (Cione et al., 2009; Lima-Ribeiro et al., 2012; Monjeau et al., 2017; Varela et al., 2018).

Cuadro N° 1. Período Cuaternario

Período Sistema	Época Serie	Subépoca Subserie	Millones de años
Cuaternario	Holoceno	Tardío	Presente
		Medio	0,0042
		Temprano	0,0082
	Pleistoceno	Tardío	0,0117
		Medio	0,129
		Temprano	0,774
			2,58

Fuente: Elaboración propia en base a International Chronostratigraphic Chart (2022).

La capacidad multidisciplinaria de los MDE puede aportar a clarificar tanto la cronología como el proceso de la extinción de la megafauna en esta región, integrando los datos arqueológicos, paleontológicos y geográficos para proyectar la distribución espacial real y potencial de las especies en ambientes favorables para distintos momentos temporales, inclusive para aquellos donde se supone que la especie ya se extinguió (Lima-Ribeiro et al., 2012; Varela et al., 2018).

Diseño procedimental

Se desarrolla conceptualmente la posibilidad de modelar la distribución del perezoso terrestre más pequeño, *Scelidotherium leptocephalum* de entre 600 kg a 1 tonelada (Fariña et al., 2013). Se eligió esta especie por tener un rango espacial y temporal acotados. Sus registros fósiles se restringen desde el Pleistoceno Medio hasta el Holoceno Temprano, en las provincias centro-norte de Argentina y Uruguay (Miño-Boilini y Quiñones, 2020). Dos fechados radiocarbónicos indicarían la supervivencia de este taxón hasta el Holoceno Temprano: uno proveniente de Arroyo Tapalqué, Provincia de Buenos Aires en 7.615 ± 85 ¹⁴C AP (años antes del presente) (Prado et al., 2015) y otro de la localidad de Río Cuarto en la Provincia de Córdoba en 7.550 ± 60 ¹⁴C AP (Cruz et al., 2007). Sin embargo, como se mencionó, estos fechados estarían contaminados con ácidos húmicos y fúlvicos recientes (Messineo et al., 2021).

¿Es posible que los fechados de *Scelidotherium leptocephalum* sean correctos, porque las condiciones ambientales permitieron su supervivencia en el Holoceno? En este sentido, ¿Pudieron existir espacios abiertos en el Holoceno para la supervivencia de algunas especies (ej. las más pequeñas de esta comunidad faunística pampeana) como propone la Hipótesis del Zigzag Roto? ¿O bien esta especie se extinguió hacia el Pleistoceno Tardío porque los fechados son erróneos? ¿Qué papel pudieron tener los

humanos en este proceso? Como primera aproximación y con la intención de clarificar qué aspectos ambientales podrían haber permitido (o no) la supervivencia de *Scelidotherium leptcephalum* en el Holoceno Temprano, el objetivo de este caso es reconstruir los cambios en la distribución biogeográfica potencial del perezoso en la región pampeana y aledaños modelando 3 mapas de distribución: uno durante el Último Máximo Glaciar hacia los 18.000 AP, que reflejaría la expansión máxima de esta especie en un momento favorable; otro en la transición Pleistoceno-Holoceno, hacia los 10.000 AP, cuando comienza la fragmentación de los espacios y se registra presencia humana; un tercer mapa se proyectaría hacia los 7.000 AP en coincidencia con los fechados disponibles y máxima fragmentación del paisaje. Para ello resultará necesario combinar evidencias paleontológicas, arqueológicas y paleogeográficas.

Aproximación técnica

Los procedimientos de superposición temática tienen por objetivo encontrar localizaciones que cumplan con características de capacidad óptima de acogida para el desarrollo y sostenimiento de un determinado estado. Para lograrlo resulta apropiada la resolución basada en la correspondencia espacial obtenida entre mapas *booleanos*, aquellos que se presentan cómo criterios dicotómicos de presencia/ausencia de características deseables.

Si se procede a una solución booleana estricta (*Bool(e)*), el resultado brindará áreas en las cuales se combinan la totalidad de características óptimas. El modelado cartográfico utiliza mapas (*M*) clasificados con valores 1 (localizaciones con aptitud) y 0 (localizaciones sin aptitud) para luego multiplicarlos.

$$[1] \textit{Bool}(e) = \prod_{i=1}^n M_i$$

Con solo la aparición de un 0 en alguna localización el resultado final será 0 y de forma inversa, para que una localización aparezca apta debería contener un valor 1 en la totalidad de mapas. Esto corresponde a la operación geométrica de la intersección o lógica del Y.

Si se procede a una solución booleana gradual (*Bool(g)*), el resultado brindará áreas en las cuales se combinan diferentes cantidades de características óptimas. El modelado cartográfico utiliza mapas (*M*) clasificados con valores 1 (localizaciones con aptitud) y 0 (localizaciones sin aptitud) para luego sumarlos.

$$[2] \textit{Bool}(g) = \sum_{i=1}^n M_i$$

El resultado final brindará, en su rango mayor de posibilidades, valores que van de 0 cuando la localización no tiene criterios de aptitud a N cuando la localización combina todos los criterios de aptitud y el mayor valor coincide con la cantidad de mapas utilizados. El mapa final presenta localizaciones con aptitudes escalonadas.

Una solución booleana continua (*Bool(c)*) considera que no todos los mapas utilizados tienen la misma importancia, es decir, que no todos los temas considerados tienen el mismo valor para la solución final. Malczewski (1999) hizo concreta la operatoria de ligar esta importancia con el valor cuantitativo preciso de ponderación (p) que adquiere cada mapa en el cálculo realizado a partir de proponer el método de combinación por ranking (r) recíproco.

$$[3] \quad p = \frac{1/r}{\sum 1/r}$$

La aplicación de [3] garantiza resultados que se mantienen dentro de las restricciones propias para el conjunto de las ponderaciones:

$$[4] \quad 0 > p \geq 1$$

$$[5] \quad \sum p = 1$$

El resultado será un mapa de aptitud continua y diferencial dentro de la extensión superficial presentada por *Bool(g)* a partir de la sumatoria de las multiplicaciones de cada mapa (M) por su valor de ponderación.

$$[6] \quad Bool(c) = \sum_{i=1}^n M_i p_i$$

La utilización cartográfica en resoluciones locacionales define el conjunto de procedimientos como *evaluación multicriterio* (Buzai y Baxendale, 2011; Buzai, 2017), técnicas exclusivamente destinadas a responder el *dónde* como pregunta fundamental de la Geografía y como respuesta central lograda a partir del análisis espacial.

Propuesta procedimental basada en el modelado cartográfico

El modelado cartográfico, que se realiza por superposición de mapas *raster* mediante el álgebra de mapas, permite analizar asociaciones entre las distribuciones espaciales de diferentes temas. De esta manera, una postura racionalista lo considera un proceso de regionalización por divisiones lógicas en un camino que comienza con la utilización de regiones

sistemáticas, formadas por una sola variable, hacia la creación de regiones geográficas formales con homogeneidad interna en base a combinaciones realizadas.

Es un procedimiento que implica un buen conocimiento del tema tratado y, en base a esto, se determinan cuáles serán las características clave para lograr una clara definición de la diferenciación areal (Rey Balmaceda, 1972) y con resultados en estudios arqueológicos que incorporan SIG (Lanzelotti y Buzai, 2015; Coll, 2019). El procedimiento de superposición temática (*overlay*) es una metodología central en el análisis espacial realizado con SIG y para ello cada mapa del área de estudio debe tener similar escala y proyección a fin de lograr una superposición perfecta. Puede realizarse de manera geométrica en formato vectorial o mediante cálculos matemáticos aplicados en los números digitales contenidos en las celdas de los mapas *raster*. Al aumentar el número de variables utilizadas las áreas de máxima superposición disminuyen en superficie y la cantidad de áreas aumentan en diferentes combinaciones.

La aplicación del modelado cartográfico mediante el álgebra se utiliza en la búsqueda de resultados, donde la representación funciona como una herramienta de investigación, para lograr patrones en tres momentos específicos de pasado: 18.000 AP, 10.000 AP y 7.000 AP.

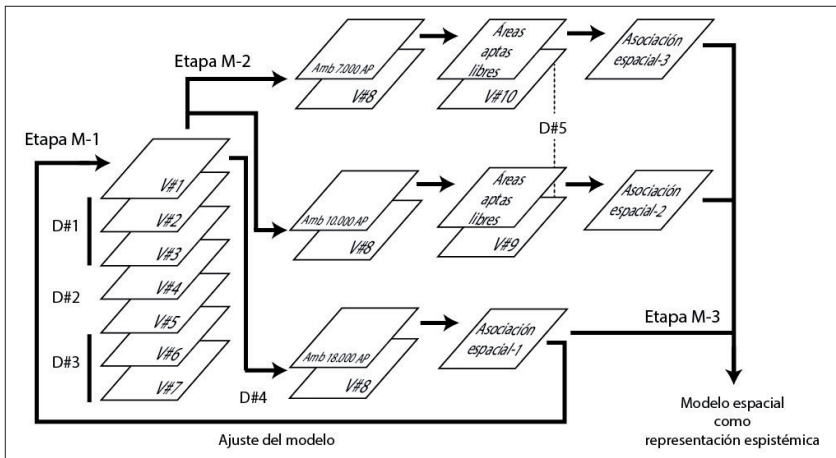
El primer paso consiste en la construcción de una base de datos georreferenciada en SIG con información de diferentes dimensiones, de las cuales se desprenden diferentes variables:

- 1.- Dimensión geográfica (D#1): batimetría (V#1), distribución de los cuerpos de agua según el nivel por relieve (V#2), estructura de mosaicos paisajísticos (V#3).
- 2.- Dimensión paleoambiental (D#2): palinología y otros *proxies* vegetacionales (V#4)
- 3.- Dimensión climática (D#3): temperatura promedio (V#5), temperatura extrema (V#6) y precipitación media (V#7).
- 4.- Dimensión faunística (D#4): ocurrencia faunística de perezoso (V#8)
- 5.- Dimensión humana (D#5): distribución humana 10.000 AP (V#9), distribución humana 7.000 AP (V#10).

La secuencia metodológica (Figura N° 2) comienza en la Etapa modelística 1 (M-1) en la que se dispone de la totalidad de la información de base en formato cartográfico, que se convierten en criterio locacionales. Teniendo información sobre la distribución espacial de la especie, se modelan los criterios hasta encontrar la distribución espacial ambiental que más se ajusta al considerar una relación de causalidad determinística.

Esta distribución espacial ambiental es la base para continuar con la Etapa Modelística 2 (M-2) en la cual, al conocer los parámetros modelísticos, se generan las distribuciones para el pasado, en este caso 10.000 AP y 7.000 AP para correlacionarse con la evidencia de especies y obtener áreas no utilizadas o libres de especies para pasar a la Etapa modelística 3 (M-3), en la que se correlacionan con la evidencia de la distribución espacial humana. Una alta o baja correlación significativa es la base del resultado que se logra a través de un modelo espacial como *representación epistémica*, la cual según Bolinska (2016) se presenta como herramienta que permite obtener nueva información sobre el objeto/tema de interés.

Figura N° 2. Resolución metodológica



Fuente: Elaboración propia.

La aplicación permitirá proyectar la distribución potencial de *Scelidothorium leptoccephalum* en tres momentos cronológicos claves y permitirá evidenciar si existieron espacios favorables donde esta especie pudo haber sobrevivido hasta tiempos recientes, tal como propone la Hipótesis del Zigzag Roto. En caso contrario, resultaría posible evaluar si las condiciones de la transición Pleistoceno-Holoceno fueron lo suficientemente perjudiciales para extinguir esta y otras especies que no habrían sobrevivido luego de los 10.000 AP, tal como se planteó luego de la re-datación de *Megatherium americanum*. Además, se correlacionará la evolución del registro arqueológico con la distribución de *Scelidothorium leptoccephalum*.

El MDE, en este caso basado en el modelado cartográfico, tiene la ventaja de superar los vacíos del registro fósil, analizando las distribuciones de las especies a nivel de grano grueso (Lima-Ribeiro y Diniz-Filho, 2013) y proyectando sus áreas potenciales. Además, permiten predecir qué con-

diciones ambientales son oportunas en distintos momentos y partir de estas proyecciones generar hipótesis sobre otros factores (e.g. presencia de humanos, influencia de rasgos biológicos, desaparición en cadena) que pudieron ser nocivos para la extinción asincrónica de especies más grandes como *Megatherium americanum* o más pequeñas como *Scelidotherrium leptocephalum*, u otras. El proceso de extinción puede ser dinámico, por lo que la ausencia de un taxon o la presencia de nuevos, puede afectar las relaciones entre las que quedan y con el ambiente (Abramson et al., 2017).

Consideraciones finales

A lo largo de los temas tratados, hemos visto que la causa de extinción de especies se encuentra estrechamente vinculada a situaciones ambientales, tanto de los contextos producidos por las condiciones geográficas como en relación a la competencia espacial por el hábitat con otras especies, en este caso, *Homo sapiens*. La dimensión espacial puede aportar una base de importancia para su comprobación.

La perspectiva sistémica, ligada a la formulación de modelos que se hacen operativos a través de diversas técnicas de análisis espacial cuantitativo, resulta ser fundamental como marco general de abordaje.

Los modelos se encuentran apoyados en el realismo científico y la inferencia causal surge como un proceso de racionalidad que establece vínculos de dependencia, para avanzar en explicaciones que pongan de manifiesto la estructura del fenómeno analizado.

La lógica espacial, ligada a los desarrollos del modelado cartográfico y las técnicas de evaluación multicriterio, brinda avances de la Geografía para apoyar estudios de Paleontología en una relación interdisciplinaria en el marco de una confluencia teórico-metodológica bidireccional que llevó a la construcción de la propuesta final. Se incluye una secuencia modelística conceptual que contempla factores subyacentes a las distribuciones espaciales y que aparecen como posibilidades aplicativas.

Estudios interdisciplinarios en los cuales se produzca un diálogo fructífero de demandas ajustadas a las problemáticas que se abordan desde diferentes perspectivas constituyen una base actual para el logro de resultados que apoyen una función cognitiva en el marco de una realidad entendida como sistema complejo.

Referencias bibliográficas

- Abramson, G., Laguna, M. F., Kuperman, M. N., Monjeau, A., y Lanata, J. L. (2017). On the roles of hunting and habitat size on the extinction of megafauna. *Quaternary International*, 431, 205-215. Doi: 10.1016/j.quaint.2015.08.043
- Araújo, A. M., y Peterson, A. T. (2012). Uses and misuses of bioclimatic envelope modelling. *Ecology*, 93, 1527-1539. Doi: 10.1890/11-1930.1
- Araujo, B. B. A., Oliveira-Santos, L. G. R., Lima-Ribeiro, M. S., Diniz-Filho, J. A. F., y Fernandez, F. A. (2017). Bigger kill than chill: The uneven roles of humans and climate on late Quaternary megafaunal extinctions. *Quaternary International*, 431, 216-222. Doi: 10.1016/j.quaint.2015.10.045
- Berry, B. J. L. (1964). Approaches to Regional Analysis: A Synthesis. *Annals of the Association of American Geographers*, 54, 2-11.
- Bertalanfy, L. Von. (1968). *General Systems Theory. Foundations, Development, Applications*. New York, Estados Unidos: George Braziller.
- Bolinska, A. (2016). Successful visual epistemic representations. *Studies in History and Philosophy of Science. Part A*, 56, 153-160.
- Borrero L. A. (2009). The Elusive Evidence: The Archaeological Record of the South American Extinct Megafauna. En G. Haynes. (Ed.), *American Megafaunal Extinctions at the End of the Pleistocene* (145-168). Dordrecht, Netherlands: Springer Publishers.
- Bunge, M. (1972). *Teoría y realidad*. Ciudad de México: Ariel.
- Bunge, M. (1978). *Causalidad*. Buenos Aires: Eudeba.
- Buzai, G. D. (2014). Geografía, Complejidad e Investigación Aplicada. *Boletín de Estudios Geográficos*, 102, 46-66.
- Buzai, G. D. (2016). La Geografía como ciencia espacial. Bases conceptuales en la investigación astronómica vigentes en la Geografía Cuantitativa. *Revista Universitaria de Geografía*, 25(1), 11-30.
- Buzai, G. D. (2017). Evaluación multicriterio con Sistemas de Información Geográfica. En A. Moreno Jiménez, G.D. Buzai y M. Fuenzalida Díaz (Eds.), *Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones en diagnósticos territoriales y decisiones geoambientales* (385-393). Madrid: Ra-Ma.
- Buzai, G. D. (2021). The world map by Anaximander (Miletus, 5th Century BC): Modeling geographical space at the beginning of science. *Anales de la Sociedad Científica Argentina*, 272(3), 5-18.
- Buzai, G. D., y Baxendale, C. A. (2011). *Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*. Buenos Aires, Argentina: Lugar Editorial.
- Buzai, G. D., y Montes Galbán, E. (2021). *Estadística Espacial: Fundamentos y aplicación con Sistemas de Información Geográfica*. Buenos Aires: Instituto de Investigaciones Geográficas.
- Buzai, G. D., y Santana Juárez, M. V. (Eds.). (2019). *Métodos cuantitativos en Geografía Humana*. Buenos Aires, Argentina: Instituto de Investigaciones Geográficas.
- Cione, A. L., Tonni, E. P., y Soibelzon, L. H. (2009). Did humans cause large mammal Late Pleistocene-Holocene extinction in South America in a context of shrinking open areas? En G. Haynes. (Ed.), *American Megafaunal Extinctions at the End of the Pleistocene* (125-144). Dordrecht, Netherlands: Springer Publishers.
- Coll, L. (2019). Arqueología y evaluación multicriterio: Lugares de aptitud para la ubicación de pueblos pastoriles actuales en el valle de Fiambalá y área precordillerana (Departamento de Tinogasta, Catamarca, Argentina). *Anuario de la División Geografía*, 13, 152-159.
- Coll, L. y Lanzelotti, S. L. (2019). Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica en la investigación arqueológica. En G. D.

- Buzai, L. Humacata, S. Lanzelotti, E. Montes Galbán y N. Principi (Comp.), *Teoría y métodos de la Geografía Cuantitativa. Libro 2: Por una Geografía Empírica* (21-37). Buenos Aires: Instituto de Investigaciones Geográficas.
- Chichkoyan K. V. (2021). Megamammals collections from the Pampean region (Argentina) in Europe. *The Geological Curator*, London, 11(6), 370-381.
- Cruz, L. E. (2007). Xenarthra (Mammalia) del Pleistoceno tardío-holoceno temprano del Departamento Río Cuarto, provincia de Córdoba, Argentina. Aspectos bioestratigráficos. *Ameghiniana*, 44, 751-757.
- Dobson, J. E. (1983). Automated Geography. *The Professional Geographer*, 35(2), 135-143.
- Fariña, R. A., Vizcaíno, S. F., y de Iuliis, G. (2013). *Mega fauna. Giant Beasts of Pleistocene South America*. Bloomington, Estados Unidos: Indiana University Press.
- Franklin, J., Potts, A. J., Fisher, E. C., Cowling, R. M., y Marean, C. W. (2015). Paleodistribution modeling in archaeology and paleoanthropology. *Quaternary Science Reviews*, 110, 1-14. Doi: 10.1016/j.quascirev.2014.12.015
- García, R. (2006). *Sistemas Complejos*. Barcelona, España: Gedisa.
- Giere, R. (2004). How Models are Used to Represent Reality. *Philosophy of Science*, 71, 742-752.
- Haggett, P. (1976). *El análisis locacional en la Geografía Humana*. Barcelona, España: Gustavo Gili.
- Haggett, P. (1983). *Geografía. Una síntesis moderna*. Barcelona, España: Omega.
- International Chronostratigraphic Chart. (2022). Recuperado de <https://stratigraphy.org/chart>
- Kuhn, T. S. (1993) [1962]. *La estructura de las revoluciones científicas*. Ciudad de México, México: Fondo de Cultura Económica.
- Lanzelotti, S. L. (2017). Los Sistemas de Información Geográfica en la Arqueología argentina. *Red Sociales*, 4(5), 183-192.
- Lanzelotti, S. L., y Buzai, G. D. (2015). Modelos de aptitud espacial para la agricultura prehispánica y actual en el valle de Santa María, Catamarca, Argentina. *Estudios Socioterritoriales*, 18, 139-150.
- Lima-Ribeiro, M. S. L., y Diniz Filho, J. A. F. (2013). *Modelos ecológicos e a extinção da megafauna: clima e homem na América do Sul*. São Carlos, Brasil: Cubo.
- Lima-Ribeiro, M. S. L., Varela, S., Nogués Bravo, D., y Diniz Filho, J. A. F. (2012). Potential suitable areas of giant ground sloths dropped before its extinction in South America: the evidences from bioclimatic envelope modeling. *Natureza & Conservação*, 10(2), 145-151. Doi: 10.4322/natcon.2012.022
- Lucero, S. (2020). El papel de la intencionalidad epistémica en las representaciones científicas. Compromisos realistas y antirealistas. En B. Borge. y N. Gentile. (Eds.), *La ciencia y el mundo inobservable* (425-449). Buenos Aires, Argentina: Eudeba.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. New York, Estados Unidos: John Wiley.
- Messineo, P. G., Dubois, C. M. F., Politis, G. G., y Vitale, P. (2021). Site formation process and megamammal bone radiocarbon dates in Campo Laborde (Pampas of Argentina): Contribution towards a research methodology. *Quaternary International*, 586, 53-65. Doi: 10.1016/j.quaint.2021.01.007
- Miño Boilini, A. R., y Quiñones, S. I. (2020). Los perezosos Scelidotheriinae (Xenarthra, Folivora): taxonomía, biocronología y biogeografía. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 22(2), 201-218.
- Monjeau, J. A., Araujo, B., Abramson, G., Kuperman, M. N., Laguna, M. F., Lanata, J. L. (2017). The controversy space on Quaternary megafaunal extinctions. *Quaternary International*, 431, 194-204. Doi: 10.1016/j.quaint.2015.10.022
- Morello, J. (1982). *Manejo integrado de recursos naturales*. Madrid, España: Centro Internacional de Formación en Ciencias Ambientales.

Politis, G. G., Messineo, P. G., Stafford T. W. Jr., y Lindsey, E.L. (2019). Campo Laborde: A Late Pleistocene giant ground sloth kill and butchering site in the Pampas. *Science Advances*, 5(3). Doi: 10.1126/sciadv.aau4546

Prado, J. L., Martínez Maza, C., y Alberdi, M.T. (2015). Megafauna extinction in South America: A new chronology for the Argentine Pampas. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 425, 41-49. doi: 10.1016/j.palaeo.2015.02.026

Prates, L., y Perez, S. I. (2021). Late Pleistocene South American megafaunal extinctions associated with rise of Fishtail points and human population. *Nature communications*, 12, 2175. Doi: 10.1038/s41467-021-22506-4

Rabella i Vives, J. (2016). Mapa y SIG: Medio siglo para un reencuentro...o el mito a un gran triunfo. *Boletín GESIG*, 4, 6-8.

San Pedro, I. y Suárez, M. (2014). Indeterminism and causal evidence. *Teorema*, 33(1), 95-109.

Rey Balmaceda, R. C. (1972). *Geografía Regional: Teoría y aplicación*. Buenos Aires, Argentina: Estrada.

Tomlin, C. D. (1990). *Geographic Information Systems and Cartographic Modelling*, New Jersey, Inglaterra: Prentice Hall, Englewood Clift.

Varela, L., Tambusso, P. S., Patiño, S. J., Di Giacomo, M. y Fariña, R. A. (2018). Potential distribution of fossil xenarthrans in South America during the late Pleistocene: co-occurrence and provincialism. *Journal of Mammalian Evolution*, 25(4), 539-550. Doi: 10.1007/s10914-017-9406-9

Wagensberg, J. (1994). *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Barcelona, España: Tusquets.

citación profesional en UFRGS (Brasil) y de investigación posdoctoral en UAM (España) y Uibk (Austria). En la Universidad Nacional de Luján es docente del Departamento de Ciencias Sociales, Director del Instituto de Investigaciones Geográficas e investigador del CONICET. Su línea temática se centra en el análisis espacial cuantitativo en estudios urbanos y regionales.

- 2 Licenciada en Antropología con orientación Arqueológica (UBA) y Doctora en Cuaternario y Prehistoria de la Universidad de Rovira i Virgili (España). Investigadora del CONICET en la Universidad Nacional de Luján y docente de la USAL. Su línea temática se centra en el estudio de la megafauna. Este artículo se enmarca en su proyecto del CONICET titulado: Reconstrucción de nichos paleoecológicos de megafauna nativa del pleistoceno superior-holoceno inferior en el Cono Sur Sudamericano.

Notas

- 1 Profesor de Geografía (UBA), Licenciado en Geografía (UBA) y Doctor en Geografía (UNCuyo). Estadias de capa-