

Modelos forenses experimentales para la estimación del intervalo post mortem (IPM) sobre restos de *Sus scrofa domesticus*. Variaciones ambientales en humedales del Conurbano Bonaerense, Provincia de Buenos Aires, Argentina

Experimental forensic models for the estimation of the post-mortem interval (PMI) on remains of *Sus scrofa domesticus*. Environmental variations in wetlands of Buenos Aires Metropolitan Area, Province of Buenos Aires, Argentina

Modelos forenses experimentais para a estimativa do intervalo post-mortem (IPM) em remanescentes de *Sus scrofa domesticus*. Variações ambientais em áreas úmidas da Área Metropolitana de Buenos Aires, Província de Buenos Aires, Argentina

REVISTA ARGENTINA DE
ANTROPOLOGÍA BIOLÓGICA

Volumen 27, Número 1, Artículo 101
Enero-Junio 2025

Editado y aceptado por el editor
asociado Mirsha Quinto Sanchez,
Instituto de Investigaciones
Antropológicas, Universidad Nacional
Autónoma de México, México.

*Correspondencia a: Atilio Nasti, Escuela
de Gendarmería Nacional Miguel
Martín de Güemes, Circ. 1 secc. 1 s/n,
Ciudad Evita, Provincia de Buenos Aires,
Argentina. Email: anasti@iugna.edu.ar

RECIBIDO: 18 de Septiembre de 2024

ACEPTADO: 14 de Abril de 2025

PUBLICADO: 30 de Mayo de 2025

<https://doi.org/10.24215/18536387e101>

Financiamiento: Instituto Universitario
de la Gendarmería Nacional (IUGNA)
y Ministerio de Seguridad 789000-
2019/2023.

e-ISSN 1853-6387

<https://revistas.unlp.edu.ar/raab>

Entidad Editora
Asociación de Antropología Biológica
Argentina

 Atilio Nasti^{1*}

¹⁾ Área de Criminalística y Estudios Forenses Complejos, Gendarmería Nacional Argentina, Argentina.

Resumen

La estimación del intervalo *post mortem* (IPM) puede obtenerse a partir del testimonio de testigos oculares u otro tipo de pruebas *ante mortem*, como el historial ob-

tenido mediante el uso de dispositivos electrónicos o secuencias de video. Sin embargo, estas fuentes testimoniales, si están disponibles, no suelen cubrir el historial completo de una investigación. En este sentido, los investigadores deberán utilizar diferentes estrategias metodológicas, sean físicas o químicas para estimar el intervalo *post mortem*. El estudio sistemático a lo largo de un año calendario posibilitó la construcción de secuencias predictivas de descomposición a partir del registro de la temperatura y la humedad en dos ambientes diferentes dentro de sectores de humedales en el Conurbano Bonaerense, lo cual dio como resultado un instrumento metodológico para estimar el IPM en restos biológicos de cerdos (*Sus scrofa domesticus*) de 35-40 kg. La estimación del intervalo *post mortem* se basa, en gran medida, en los cambios presentes en el cuerpo. Sin embargo, los factores climáticos y el contexto de depositación de los restos biológicos son factores críticos para tener en cuenta en la cronología de este proceso. Aunque los científicos forenses puedan acceder a una gran cantidad de información técnica/metodológica para estimar el tiempo de muerte, deben tener conocimientos previos sobre el proceso de descomposición a nivel local para ofrecer una estimación del intervalo *post mortem* que pueda ser útil en una investigación medicolegal. Rev Arg Antrop Biol 27(1), 101, 2025. <https://doi.org/10.24215/18536387e101>

Palabras Clave: antropología forense; modelos experimentales; estimación del intervalo *post mortem*

Abstract

The estimation of the post-mortem interval (PMI) can be obtained from eyewitness accounts or other types of ante-mortem evidence, such as records obtained using electronic devices or video footage. However, these testimonial sources, if available, do not usually provide the full account of an investigation. In this sense, researchers should use different methodological strategies, whether physical or chemical, to estimate the post-mortem interval. The systematic study over a calendar year made it possible to construct predictive sequences of decomposition from the temperature and humidity record in two different environments within wetland areas in the Buenos Aires metropolitan area, resulting in a methodological instrument to estimate the PMI in biological remains of pigs (*Sus scrofa domesticus*) of 35-40 kg. The estimation of the post-mortem interval is based, to a large extent, on post-mortem changes present in the body; however, climatic factors and the context of deposition of the biological remains are critical factors to be taken into account in the chronology of this process. Although forensic scientists may have access to a large amount of technical/methodological information to estimate time of death, they must also have prior knowledge of the decomposition process at a local level to provide an estimate of the post-mortem interval that may be useful in a medicolegal investigation. Rev Arg Antrop Biol 27(1), 101, 2025. <https://doi.org/10.24215/18536387e101>

Keywords: forensic anthropology; experimental models; post-mortem interval estimation

Resumo

A estimativa do intervalo *post-mortem* (IPM) pode ser obtida a partir de depoimentos de testemunhas oculares ou outros tipos de evidências *ante-mortem*, como o histó-

rico obtenido por medio del uso de dispositivos electrónicos o secuencias de vídeo. No entanto, esas fuentes de depoimentos, se disponibles, generalmente no cubren el histórico completo de una investigación. Nesse sentido, os pesquisadores devem utilizar diferentes estratégias metodológicas, sejam físicas ou químicas, para estimar o intervalo *post-mortem*. O estudo sistemático ao longo de um ano civil possibilitou a construção de sequências preditivas de decomposição a partir do registro de temperatura e umidade em dois ambientes diferentes dentro de setores de áreas úmidas na área metropolitana de Buenos Aires, resultando em um instrumento metodológico para estimar o IPM em remanescentes biológicos de suínos (*Sus scrofa domesticus*) de 35-40 kg. A estimativa do intervalo *post-mortem* baseia-se, em grande medida, nas alterações presentes no corpo; no entanto, fatores climáticos e o contexto de deposição dos restos biológicos são fatores críticos a serem considerados na cronologia deste processo. Embora os cientistas forenses possam ter acesso a uma grande quantidade de informações técnicas/metodológicas para estimar a hora da morte, eles devem ter conhecimento prévio do processo de decomposição em nível local para oferecer uma estimativa do intervalo *post-mortem* que possa ser útil em uma investigação médico-legal. Rev Arg Antrop Biol 27(1), 101, 2025. <https://doi.org/10.24215/18536387e101>

Palabras-clave: antropología forense; modelos experimentais; estimativa do intervalo *post-mortem*

La estimación del intervalo *post mortem* (IPM) es una de las principales tareas y un reto continuo en una investigación forense. A menudo se trata de un proceso de selección de los métodos disponibles, que, en muchos casos, puede conducir a resultados poco satisfactorios debido a la complejidad de los fenómenos cadavéricos. Este problema es más agudo en el IPM tardío, cuando el proceso de descomposición y algunos métodos de clasificación (como el *rigor*, el *livor* y el *algor mortis*) ya no son aplicables. Se espera que varios métodos, como la entomología forense, la degradación de proteínas del músculo esquelético y el estudio de la descomposición corporal mediante la aplicación de una puntuación morfológica, proporcionen más información, sin embargo, todos tienen ciertas limitaciones y debilidades.

La disponibilidad de diferentes métodos permite una selección específica para cada caso, o en última instancia, proporciona mejoras en la aproximación de la estimación del IPM mediante la combinación de diversos métodos (Sorg y Marden, 2013; Sorg *et al.*, 1998). Los resultados, aunque revelan las fortalezas y limitaciones de tales métodos, constituyen efectos sinérgicos prometedores y, por lo tanto, proporcionan una línea de base para futuras investigaciones.

Es cierto que, en las primeras etapas *post mortem*, una combinación de estos enfoques permite una estimación más confiable (Dirkmaat *et al.*, 2008). En etapas posteriores, el ciclo de vida de los insectos necrófagos que se desarrollan en el cuerpo (Passalacqua y Megyesi, 2015), el análisis de la degradación de los tejidos (Rodríguez, 1997; Voss *et al.*, 2011) o los cambios morfológicos (Bates y Wescott, 2016; Centeno y Zalazar, 2014) de un cadáver, pueden contribuir a excluir marcos temporales específicos o proporcionar IPM mínimos.

Este problema es más agudo en el IPM tardío, cuando la descomposición avanza y la mayoría de los métodos mencionados ya no son útiles, ya que la descomposición hu-

mana es un proceso muy complejo debido a la interacción de diferentes componentes biológicos, químicos y medioambientales (Myburgh, 2010).

El propósito del presente trabajo es volcar los resultados de investigación a largo plazo en relación a los procesos tanatológicos, en un sistema ecológico de humedales de la Provincia de Buenos Aires sobre restos cadavéricos de cerdo doméstico, durante un año calendario. El proyecto referente denominado “Modelos Tafonómicos Forenses. Un enfoque basado en los Sistemas de Información Geográfico (GIS) para un diseño de investigación y análisis de datos forenses para el Conurbano Bonaerense, Provincia de Buenos Aires”, se concibe por primera vez en el Instituto Universitario de la Gendarmería Nacional (IUGNA) en abril de 2016 con el fin de sistematizar la información brindada por la tanatología, la entomología y tafonomía forense dentro de los límites ecológicos de Humedales asociados a contextos del conurbano de la Provincia de Buenos Aires (Nasti, 2021, 2022, 2024).

El resultado final del presente estudio fue la construcción de un modelo experimental de base estadística entre el estado de descomposición y la incidencia de la temperatura para especies de *Sus scrofa* depositados en diferentes microambientes, dentro de la región de humedales del Conurbano Bonaerense. Los datos obtenidos se utilizaron para generar una ecuación aritmética para calcular la cantidad de temperatura necesaria para alcanzar un determinado estadio de descomposición en cada microambiente y, de esta manera, inferir el IPM.

La contribución de trabajos previos sobre el tema, la obtención de información de casos forenses, y la realización de ensayos experimentales a mediano plazo de carácter local, constituyen la base de producción de nuevos datos que son imprescindibles para la interpretación de los fenómenos forenses (Brown y Peckmann, 2013; Duhig, 2003). En este contexto, la medición de variables críticas que actúan sobre los procesos tanatológicos (temperatura, humedad, tipo de suelo, presencia de animales, tipo de flora, etc.) constituyen la matriz para la construcción de modelos tafonómicos forenses de carácter local (Nasti, 2024). El alcance de estos modelos predictivos, no solo servirán para estimar el posible IPM, sino también la delineación de estrategias de búsqueda de restos humanos. A partir de ellos, se espera comprender mejor algunos de los fenómenos que actúan sobre los restos humanos y su contexto de depositación, sobre todo aquellos encontrados en contextos suburbanos al aire libre contribuyendo, entre otras cosas, a los objetivos operativos Federales del área de criminología, justicia y demás programas de seguridad pública.

Presentación del problema

El proceso de descomposición de los cuerpos a través del tiempo constituye un tema crítico para los investigadores forenses. Aunque el tema ha sido estudiado en diferentes lugares y en distintas estaciones climáticas, la mayoría de los trabajos pioneros utilizaban metodologías que eran, en gran parte, de carácter descriptivo y de naturaleza cualitativa, basándose mayormente en la experiencia de los investigadores, además de no ser aplicables a todas las condiciones geográficas y ambientales (Galloway, 1997; Haglund y Sorg, 1997; Kim *et al.*, 2018).

Sin embargo, a partir del aporte de otras disciplinas como la entomología forense, los enfoques tendieron a incrementar el carácter cuantitativo para estimar el IPM, como la utilización de los grados acumulados por día (ADD, por las siglas del inglés *Accumulated Degree Day*) aplicada a estudios de carácter local (Megyesi *et al.*, 2005; Wescott, 2018). Es por esta misma razón que los modelos de IPM que se pretendan utilizar, deben de gene-

rarse y probarse en el medio en que fueron contruidos, creando estimaciones de IPM para regiones geográficas específicas dentro de un determinado territorio (Nasti, 2021, 2022).

Desde el punto de vista teórico y práctico, los antropólogos forenses necesitan mejorar sus conocimientos sobre la variación tafonómica regional y micro ambiental, particularmente relacionadas con la estimación del IPM en restos humanos. Durante los últimos años ha habido un aumento en la atención prestada por la criminalística y por la medicina legal a la tafonomía forense, aunque el enfoque ha sido en gran parte dirigido a los procesos de descomposición. Modelos recientemente publicados para la estimación del IPM (Bates y Wescott, 2016; Bytheway *et al.*, 2014; Moffatt *et al.*, 2016; Wescott, 2018; entre otros) presentan un proceso de descomposición única y secuencial que incluye participación de insectos, carroñeros y variación climática, especialmente temperatura, humedad, viento y pH del suelo. La falta de datos locales ha obligado a utilizar modelos publicados en otras regiones, siendo crítico el hecho de que deben ser desarrolladas localmente.

La investigación médico legal requiere una aproximación multidisciplinaria tanto para la recolección como el procesamiento de datos para lograr reconstruir los eventos del pasado. Sin embargo, la escena del crimen en contextos abiertos (*outdoor*), requiere un protocolo acorde al registro aportado por los elementos naturales que lo rodean, como plantas, animales, química del suelo y otras condiciones medioambientales. En este sentido, la tafonomía forense provee las técnicas y el marco conceptual para sintetizar tanto el trabajo de campo como el análisis de laboratorio para testear hipótesis acerca del contexto de depositación de la evidencia forense, entre ellas la interpretación del IPM, dónde y cómo los restos pudieron haber sido movidos, removidos o alterados, y en definitiva si hubo o no intervención humana (Wescott, 2018).

Es evidente que la estimación del IPM es de crucial importancia para el campo forense. Esto demuestra claramente los numerosos estudios que se han realizado en este sentido sobre restos humanos y no humanos (Bass, 1997; Clark *et al.*, 1997; Galloway, 1997; Megyesi *et al.*, 2005), así como el crecimiento de estaciones de investigación para estudiar el proceso de descomposición (Bates y Wescott, 2016; Hayman y Oxenham, 2016; Madea, 2016; Mathur y Agrawal, 2011; Myburgh, 2010; Passalacqua y Megyesi, 2015; Rodríguez, 1997; Sutherland *et al.*, 2013; Vass *et al.*, 2002; Voss *et al.*, 2011; entre otros). Este interés en la tafonomía en general, y en los estudios de descomposición en particular, se debió a la publicación de dos artículos influyentes como el de Vass *et al.* (2002) y el de Megyesi *et al.* (2005), donde se introduce el concepto de Grados Acumulados por Día (ADD), el sistema de puntuación de descomposición y los modelos de regresión, que relaciona la puntuación corporal total (*Total Body Score*, TBS) con ADD para la predicción del IPM.

Aunque al principio de las investigaciones en esta línea se ha realizado un gran esfuerzo para entender los procesos de descomposición desde una perspectiva “universal”, el enfoque local ha ido ganando posiciones al momento de comprender los fenómenos involucrados (Pittner *et al.*, 2020; Wescott, 2018). Al mismo tiempo, al no tener suficientes datos locales, muchas investigaciones forenses se han visto forzadas a utilizar guías generadas en otras regiones. En este sentido, consideramos fundamental el desarrollo de modelos tafonómicos experimentales para nuestra región de interés que expliquen la variación en la descomposición de restos biológicos en diferentes ambientes (Nasti, 2022, 2024). El proyecto de investigación donde fue generada la presente información fue gestado a partir de la propuesta del Instituto Universitario de la Gendarmería Nacional (IUGNA) y el Ministerio de Seguridad de La Nación (MSN) en Expediente AG 7-4038-21 “Plan Estratégico Institucional” por Disposición DNG N° 0077-16 del día 29 de enero de 2016. El presente trabajo discute los datos finales obtenidos en las cuatro estaciones entre el año 2019 y 2023 (Nasti, 2021, 2022, 2024).

MATERIALES Y MÉTODOS

Hoy en día, los cerdos son ampliamente aceptados como un modelo razonable en las ciencias forenses y se utilizan con frecuencia para estudios de descomposición (Anderson y Van Laerhoven, 1996; Armstrong *et al.*, 2016; Campobasso *et al.*, 2001; Matuszewski y Mądra-Bielewicz, 2016). En este sentido, Micozzi (1991) investigó las tasas de descomposición de varios animales y encontró que los cerdos domésticos eran ideales para ser el reemplazo de seres humanos ya que tienen anatomía interna similar, carecen de piel gruesa y finalmente son relativamente fáciles de adquirir. Aunque se han reportado algunas variaciones en la descomposición humana (Dautartas *et al.*, 2018; Megyesi *et al.*, 2005), los cerdos servirían, en definitiva, como emuladores de restos humanos en ensayos experimentales, sobre todo, tomando en consideración la discusión sobre los límites éticos y legales de las estaciones experimentales que utilizan restos humanos (Bytheway *et al.*, 2014; Keough *et al.*, 2017; Marhoff *et al.*, 2016).

Para el presente proyecto se utilizaron ocho cadáveres de cerdos (*Sus scrofa domestica*, Linnaeus, 1758) de 35-40 kg de peso, dos por temporada estacional (invierno, otoño, primavera y verano), en sectores asignados dentro del predio de la Escuela de Gendarmería Nacional Martín Miguel de Güemes, (ESCUGEN), Ciudad Evita, Partido de La Matanza, Provincia de Buenos Aires (Latitud -34,73728, Longitud -58,52414), (Fig. 1a y 1b). La Unidad Experimental 1 (UE1) fue depositada sobre el suelo decúbito lateral en una zona abierta y descampada (Fig. 2a y 2b), cubierta por gramíneas (Fam. *Poaceae*). La Unidad Experimental 2 (UE2) fue depositada en forma similar a 150 m al SE, pero dentro de un bosque en galería con presencia dominante de acacias (*Acacia baileyana*) y sauces (*Salix humboldtiana*) a 3 m del borde de un afluente del Río Matanza (Fig. 3a y 3b).

Las Unidades Experimentales se protegieron mediante jaulas de acero galvanizado para impedir el acceso a los carroñeros. Las jaulas miden 91,4 cm de ancho, 182,9 cm de largo y 45,7 cm de altura, con agujeros de 5,0 x 10,2 cm. Todas las Unidades Experimentales fueron visitadas sistemáticamente para registrar el progreso de la descomposición, tomar fotografías, videos y realizar la toma de muestras entomológicas siguiendo el protocolo propuesto por Hewadikaram y Goff (1991) y Payne (1965).

Los ejemplares fueron provistos por la Unidad Productiva de Bovinos y Ovinos de la Unidad de Servicios de Investigación y Desarrollo, INTA (Castelar), y el Centro de Ciencias Veterinarias de la Universidad Maimónides, Buenos Aires, Argentina. El método de eutanasia *in situ* (día 0 de IPM) se adecuó siguiendo los parámetros de la Asociación Veterinaria de los Estados Unidos (*American Veterinary Medical Association* [AVMA], 2013). Las medidas de seguridad, higiene y ambiente fueron tramitadas mediante el Expediente AI 1447/19 (24MAY19), mientras que los aspectos relacionados con el Impacto Ambiental fueron evaluados y aprobados mediante un Informe de Diagnóstico Ambiental por la División de Delitos contra el Medioambiente y El Patrimonio Cultural, dependiente de la Dirección de Criminalística de Gendarmería Nacional.

Para cuantificar el estado de descomposición, se utilizó el método de Galloway (1997) modificado por Megyesi *et al.* (2005). Consiste en una puntuación que va de 3 a 35 puntos, de acuerdo con el estado macroscópico de los tejidos y se conoce como *Total Body Score* (TBS). Las puntuaciones se aplican a tres regiones del cuerpo: a) Cabeza y cuello; b) Tórax, Abdomen y Cintura Pélvica; y c) Extremidades. El área de la cabeza y el cuello va de 1 a 13, el tronco de 1 a 12, y los miembros serán marcados del 1 al 10. El TBS final irá de 3 a 35, que representa el ejemplar fresco o totalmente esqueletizado y seco. El TBS se consideró de descomposición temprana de 1 a 16 puntos, avanzada entre 17 y 24 puntos y esqueletizada entre 25 a 35 puntos.

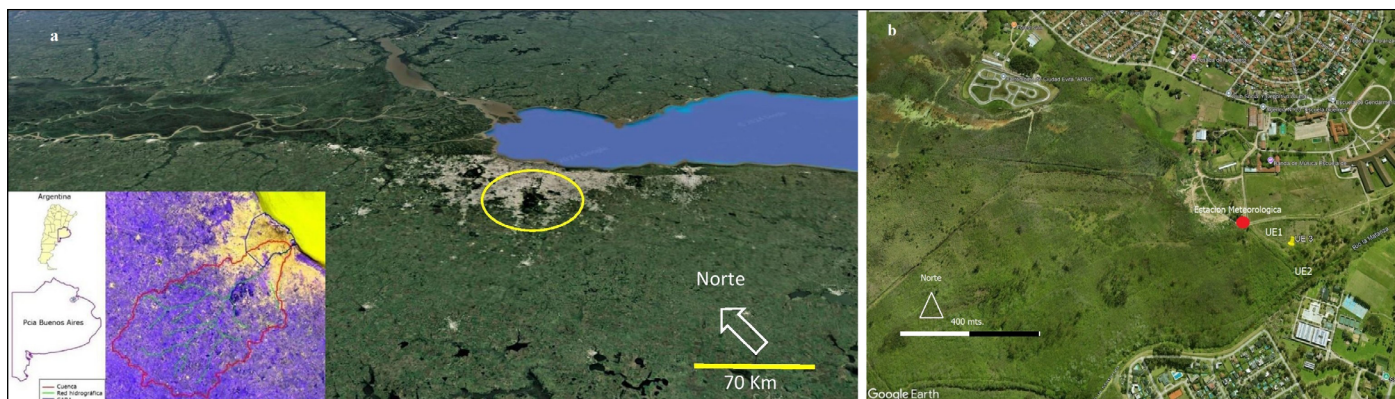


FIGURA 1. a) Vista satelital de ubicación del área dentro del Conurbano Bonaerense. El óvalo amarillo muestra la localización del humedal de la Reserva Ecológica de Ciudad Evita. **b)** Predio del Centro de Estudios Forenses Experimentales (CEFE) mostrando la ubicación de los lugares propuestos para las Unidades Experimentales 1 y 2. Escuela de Gendarmería Nacional Martín Miguel de Güemes. (Modificado a partir de Google Earth, 2019).



FIGURA 2. a) Parcela a cielo abierto (Latitud -34,7443130; Longitud -58,5385600). **b)** Unidad Experimental 1 (UE1).



FIGURA 3. a) Parcela al borde del río (Latitud -34,7453340; Longitud -58,5366430). **b)** Unidad Experimental 2 (UE2).

El TBS se evaluó visualmente tres veces a la semana para cada UE hasta completar los 35 puntos en cada estación. Por tratarse el TBS de una descripción de orden cualitativa, durante los primeros cinco días de observación, se realizaron correlaciones inter-observador. El test de Kolmogorov-Smirnov para muestras pareadas mostró que no había diferencias significativas ($p > ,05$).

Megyesi *et al.* (2005) ya habían señalado la buena correlación del TBS con el ADD de manera logarítmica, observando que aproximadamente el 80% de la variación durante el proceso de descomposición se atribuiría a la temperatura (Rodríguez, 1997). Por lo tanto, un factor crítico para la construcción de un modelo tafonómico era contar con un registro meteorológico completo para derivar de ellos los Grados Acumulados por Día (ADD). Los ADD, en unidades $^{\circ}\text{C}$, son unidades de energía térmica que representan la acumulación necesaria para que las reacciones químicas y biológicas tengan lugar en los tejidos blandos durante la descomposición (Megyesi *et al.*, 2005).

A partir del análisis de regresión entre el TBS y el ADD, se desarrolló una ecuación predictiva basada en la propuesta de Moffatt *et al.* (2016) y Mybourg (2010) para cada una de las UE, que puede ser utilizada para calcular el ADD inferido para un caso desconocido. Los valores diacrónicos de ADD en la escala original, se transformaron a funciones logarítmicas para estar linealmente relacionado con TBS. Estas relaciones se compararon y midieron utilizando sus respectivos coeficientes de determinación (R^2). Finalmente, a partir del ADD inferido como resultado de las ecuaciones de regresión, se calcula el IPM de cada UE, con intervalos de predicción del 95%, de cada una de las temporadas (para un mayor detalle ver Nasti [2022]). Si bien el análisis que se va a presentar está referido a los períodos calendario de cada una de las estaciones del hemisferio austral, para la realización del modelo de regresión y construcción de una tabla comparativa para estimar el ADD y así inferir el IPM, se extendió el registro de IPM al momento en que la UE1 alcanza el TBS de 35 puntos.

Los registros (temperatura, humedad, lluvia, dirección y velocidad del viento), se obtuvieron cada 60 minutos a través de la estación meteorológica local MeteoStar® WH-1080/81, controlada mediante la incorporación de dos Data Loggers HOBO MS222X en cada una de las Unidades Experimentales para ajustar los datos meteorológicos. Los análisis estadísticos y gráficos fueron realizados con Statgraphics Centurion v. 19.0 (<https://www.statgraphics.com/>), IBM SPSS versión de prueba 2022 (<https://www.ibm.com/es-es/spss>) y XLSTAT v. 2019.2 (<https://www.xlstat.com/es/>) (Michaud y Moreau, 2011).

RESULTADOS

Para la estación de primavera en ambas UE, el período de descomposición temprana ($\text{TBS} \leq 16$) mostró una tendencia lineal y se observaron dentro de los 296 ADD (15 días de IMP). A partir de esa graduación comienza una diferencia a favor de la UE2 de hasta 8 puntos en el TBS mostrando, de este modo, la diferencia en la velocidad de descomposición de la mencionada UE. A partir de TBS de 30 en la UE1 y 34 en la UE2, la tasa de descomposición de ambas unidades entra en una meseta donde se mantiene relativamente estable, hasta llegar a 35 de TBS, puntaje máximo de esta secuencia. Para la UE1 el TBS de 35 llega en el día 201 de IPM con una sumatoria de ADD de 4.885, mientras que la UE2 llega a ese estadio en el día 185 de IPM con un ADD de 3.295.

La fórmula para la obtención de los ADD inferidos para la temporada de primavera para la UE1 es: $\log_{10}\text{ADD} = 10 \cdot (0,0679 \cdot \text{TBS} + 1,3225 - 513,77)$, en tanto que para la UE2 es: $\log_{10}\text{ADD} = 10 \cdot (0,0598 \cdot \text{TBS} + 1,3501 - 563,57)$.

Para lograr un puntaje ≤ 16 TBS en la estación de invierno, se necesitan 88 días de IPM con un ADD de 1.036 para la UE1 mientras que, para la UE2, los 41 días de IPM se logran con un ADD de 501. En UE1 se aprecia un salto de 7 puntos de TBS entre el día 6 y 7 de IPM, mientras que en la UE2 se observa el mismo fenómeno con un incremento en el TBS de 5 y 10.

En esta temporada se observó que se necesitaron 311 días de IPM para la UE1 y 345 días de IPM para la UE2 para llegar a la esquelización (TBS de 35). Es interesante notar que la UE1 llega al TBS de 35 puntos a los 5.745 ADD, mientras que la UE2 a los 5.899 ADD. La fórmula para la obtención de los ADD inferidos para la temporada de invierno para la UE1 es: $\log_{10} \text{ADD} = 0,0637 * \text{TBS} + 1,7958 - 2,279$, mientras que para la UE2: $\log_{10} \text{ADD} = 0,0648 * \text{TBS} + 1,5527 - 2,384$.

Durante el otoño, la UE1 llega a los 35 puntos de TBS a los 287 días, mientras que la UE2 obtiene los 35 puntos de TBS a los 284 días. El estado de descomposición temprana, correspondiente a ≤ 16 TBS, se alcanza en la UE1 a los 13 días de IPM con 205 ADD, mientras que la UE2 lo hace a los 8 días de IPM con 148 ADD, lo que podría inducir, erróneamente, a una diferencia de 135 días de IPM entre ambas UE. No se observan saltos de TBS en la UE1, pero sí algunas alteraciones en la secuencia en la UE2 entre los 10 y los 15 TBS, que se producen en un lapso de 24 horas. La fórmula para la temporada de otoño de la UE1 es: $\log_{10} \text{ADD} = 0,0873 * \text{TBS} + 0,914 - 2,449$, mientras que para la UE2 es: $\log_{10} \text{ADD} = 0,0726 * \text{TBS} + 0,7136 - 2,042$.

Durante la temporada de verano, el tiempo para llegar a los 35 puntos de TBS es el más corto de la secuencia, directamente proporcional a la cantidad de ADD. Para la UE1, el estado ≤ 16 de TBS se alcanza entre los días 3 y 4 de IPM con un ADD de 103, mientras que para la UE2, el mismo puntaje se alcanza con 101 ADD en el mismo período de IPM. En esta temporada, observamos que la UE1 llega a los 35 puntos de TBS a los 90 días, en tanto que la UE2 a los 55 días de IPM. La UE1 necesita un ADD de 2.258, mientras que la UE2 1.393 para alcanzar los 35 puntos de TBS. La fórmula de regresión para la UE1 es: $\log_{10} \text{ADD} = 0,0725 * \text{TBS} + 0,9603 - 2,370$, mientras que para la UE2 es: $\log_{10} \text{ADD} = 0,0528 * \text{TBS} + 1,307 - 2,443$. La [Tabla 1](#) resume los resultados de los coeficientes de determinación (R^2) de la ecuación de regresión entre el TBS y los ADD para ambas UE en las cuatro estaciones, mostrando una relación lineal positiva.

TABLA 1. Valores de R^2 para las regresiones entre puntuación corporal total (TBS) y grados acumulados por día (ADD) en todas las temporadas.

	UE1	UE2
Otoño	0,8477	0,7136
Invierno	0,9198	0,9636
Primavera	0,9579	0,8209
Verano	0,7671	0,9465

Existe una importante variación del TBS tomando en cuenta la temperatura y la humedad. En efecto, durante la temporada de primavera, las etapas de descomposición (*Total Body Score*) para la UE1 crecen en forma constante durante los primeros 19 días y nuevamente lo hacen desde el día 28 hasta el día 73 de IPM. Sobre todo, se observa que a partir del día 19 aparecen picos de humedad de 90% hasta el día 73, luego entra en una meseta

hasta el día 146 de IPM pero, aunque ya está en estadíos finales de la temporada, continúa el aumento del TBS hasta el estadio 35 con un 100% de humedad.

En la UE2 entre el día 18 y 22 de IPM hay un pico de 15 a 25 de TBS subiendo luego entre el día 25 a 49 a 32 puntos de TBS. Es evidente que nuevamente en la UE2 la velocidad de descomposición es mayor siendo de tendencia exponencial. Se observan nuevamente picos de humedad de 100% durante la fase de crecimiento de TBS.

Para la temporada de invierno, vemos que en la UE1 se observa una línea ascendente constante compuesta por pequeños pulsos en el incremento del TBS hasta el día 14 de IPM. Solo hay una pequeña meseta que dura cerca de un mes en el TBS de 25 puntos y vuelve a subir lentamente al aumentar el promedio de temperatura para el día 189 de IPM. La meseta coincide con los valores más altos de temperatura (26 °C y 31 °C), mientras que la humedad es más alta en los periodos *pre* y *post* meseta. El TBS de la UE2 se comporta dentro del parámetro sinuoso del modelo de regresión, sin embargo, aunque hay una meseta entre los días 188 y 253 de IPM, en los 30 el TBS es más veloz.

La UE1 en otoño sube 17 puntos de TBS en 15 días, pero luego entra en una meseta que dura del día 70 al 248 de IPM (178), con un TBS entre 24 y 26, elevándose finalmente en 20 días finales al TBS de 35. La meseta coincide con valores de humedad de 100% y una baja del promedio de temperatura entre 11 °C y 20 °C.

Para la UE2, la curva exponencial sube casi 30 puntos de TBS en 40 días de IPM, entrando consecuentemente en una meseta que dura del día 44 al 274 (230 días) en un TBS de 33 puntos. Nuevamente vemos que la meseta comprende una baja de temperatura y una subida del porcentaje de humedad. Finalmente, en la temporada de verano vemos que en la UE1 el TBS sube a 25 puntos en solo cinco días comenzando una meseta que comprende muy pequeños movimientos entre los 26 y 30 puntos que dura hasta el día 77, siguiendo hasta 35 en el día 89 de IPM. Aquí se observa la meseta en coincidencia al aumento de la humedad, mismo fenómeno final cuando sube de 30 a 35 puntos del TBS.

En el caso de la UE2, los 20 puntos de TBS se alcanzan en cinco días de IPM, donde vemos picos de humedad de 80% y 85% en el periodo de mayor velocidad de crecimiento, comenzando a subir en forma pareja hasta los 35 puntos al día 57 de IPM.

La [Tabla 2](#) muestra la prueba estadística *t* para muestras pareadas y la prueba de hipótesis (Kolmogorov-Smirnov) para evaluar la diferencia entre el IPM real observado y el inferido de acuerdo a las ecuaciones correspondientes para cada una de las temporadas. La comparación entre los datos observados e inferidos no mostró diferencias significativas en su distribución de frecuencia ($p > ,05$), por lo tanto, y en principio, el resultado apoyaría que no existirían diferencias significativas entre en IPM real vs. el IPM inferido.

TABLA 2. Intervalo *post mortem* (IPM) observado vs. inferido para las Unidades Experimentales UE1 y UE2 (prueba de *t* para muestras pareadas).

	Temporada	<i>t</i>	Valor p
UE1	Otoño	0,0301264	,976006
	Invierno	0,383137	,702823
	Primavera	0,04667	,962922
	Verano	0,143741	,88666
UE2	Otoño	0,0791824	,937295
	Invierno	0,053533	,957474
	Primavera	0,155225	,877332
	Verano	0,072332	,948699

Análisis e interpretación

Según los estudios realizados, la sucesión de TBS mostraba una correlación importante con la temperatura en relación a otras variables actuantes (Bates y Wescott, 2016). El modelo presentado para las UE1 y UE2 toma justamente la cantidad de Grados Acumulados por Día (ADD) como variable independiente. En este sentido, la temperatura, es una consecuencia directa de la cantidad de radiación solar recibida sobre una superficie, además de otras variables secundarias como humedad, viento, etc.

La medición de los niveles de radiación solar a lo largo de las 24 horas para la mitad del solsticio y equinoccio de cada una de las diferentes estaciones medidas sobre la UE1, mostró una diferencia significativa entre invierno y verano ($p < ,05$), mientras que si comparamos entre primavera y verano y otoño e invierno las diferencias no son significativas ($p > ,05$).

Es evidente que no solamente las variaciones de la radiación solar entre la UE1 depositada al sol en relación a la UE2 expuesta a la sombra son relevantes en la sucesión del TBS, sino también las variaciones en los niveles de temperatura y humedad en cada uno de esos *locus*. En efecto, una comparación de los promedios diarios de temperatura entre la UE1 y UE2 para cada una de las temporadas no mostró diferencias significativas utilizando el test de Kolmogorov-Smirnov para variables no paramétricas ($p > ,05$) observándose, por el contrario, diferencias significativas en los porcentajes de humedad ($p < ,05$) entre ambas UE en las diferentes temporadas. Sin embargo, una comparación de la oscilación de los valores (temperatura y humedad) a lo largo de las 24 horas del día entre la UE1 y UE2, utilizando el mismo test, muestra una diferencia significativa ($p < ,05$).

En efecto, si observamos el comportamiento de ambas variables a lo largo de 24 horas en la mitad de la temporada de invierno (15 de julio), observamos que las oscilaciones llegan a 16 °C para la temperatura y 20% para la humedad en sus puntos máximos para ambas UE. La diferencia máxima entre ambas variables se manifiesta entre las 8 am y las 11 am. Existe una diferencia de temperatura entre ambas UE de 2 °C entre 1 am y 8 am, mientras que el período donde se contraponen los valores (sube temperatura y baja la humedad) se da entre las 11 am y las 3 pm.

En cuanto a la temporada de verano (15 de enero), observamos que la diferencia de temperatura entre ambas UE llega hasta los 10 °C entre las 12 am y las 8 am, alcanzando en la UE1 valores mayores de temperatura promedio de 35 °C entre las 11 am y las 6 pm. La UE2 muestra valores de temperatura menos extremos y con menos oscilaciones a lo largo de las 24 horas. En cuanto al porcentaje de humedad, la diferencia en la oscilación entre los valores máximo y mínimo no sobrepasa el 20% en la UE2.

Las oscilaciones de temperatura para otoño (15 de abril) son de hasta 35 °C para la UE1 y de 10 °C para la UE2, en tanto que la variación de humedad a lo largo del día es de 40% para la UE1 y 30% para la UE2. Por su parte, la UE1 muestra una mayor oscilación de ambas variables. Para la temporada de primavera (15 de octubre), se observa que a las 12 pm hay un cambio de valores inversos del 40% en la humedad y 5 °C de temperatura que se extreman hacia las 4 pm y convergen lentamente hacia el final del día.

Los niveles y oscilaciones de temperatura y humedad para las UE1 y UE2 podrían ser, al menos, parte de la explicación de la diferente velocidad en los TBS a favor de esta última. El período larvario en ambientes más estables (con valores menores de oscilaciones de temperatura y humedad) favorecería el desarrollo larvario y, como consecuencia, una mayor velocidad en la descomposición de los tejidos.

La [Tabla 3](#) resume los IPM en relación al TBS (temprana, avanzada y esquelizada)

para ambas UE, mostrando las mayores diferencias entre la temporada de invierno y verano. El test de Kolmogorov-Smirnov para invierno y verano muestra una diferencia significativa entre ambas temporadas ($p < ,05$). Primavera y otoño muestran valores más homogéneos, aunque hay diferencias significativas entre las dos muestras ($p < ,05$).

TABLA 3. Relación entre la puntuación corporal total (TBS) y el intervalo *post mortem* (IPM) para cada una de las temporadas sobre las dos Unidades Experimentales (UE).

		Temprana	Avanzada	Esqueletizada
UE1	Otoño	9	275	287
	Invierno	60	203	312
	Primavera	18	140	223
	Verano	4	11	90
UE2	Otoño	12	110	288
	Invierno	46	96	290
	Primavera	13	35	226
	Verano	5	34	91

Fases de TBS: Temprana de 1 a 16 puntos, Avanzada entre 17 y 24 puntos y Esqueletizada entre 25 y 35 puntos.

La [Figura 4](#) muestra la relación entre el TBS y el IPM para la UE1 en todas las temporadas, mostrando que invierno y verano son las temporadas con más diferencias en cuanto a la velocidad del TBS; esto es, 85 días de IPM para lograr un TBS de 35 en la temporada de verano, mientras que en invierno los 35 puntos de TBS se alcanzan a los 309 días de IPM.

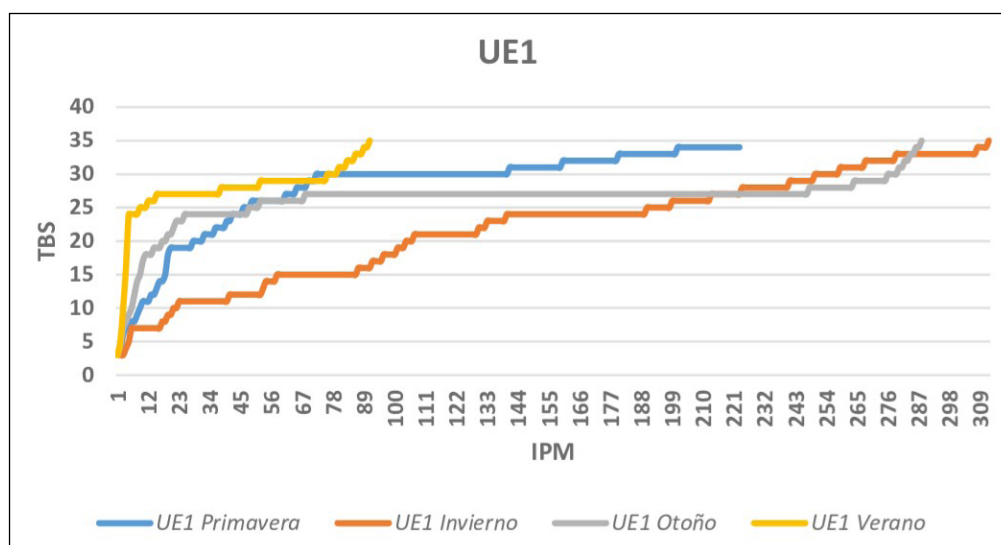


FIGURA 4. Relación entre la puntuación corporal total (TBS) y el intervalo *post mortem* (IPM) para la Unidad Experimental 1 (UE1) en todas las temporadas.

En cuanto a la UE2 ([Fig. 5](#)), hay diferencias significativas entre todas las temporadas (Kolmogorov-Smirnov; $p < ,05$). En efecto, el TBS en invierno alcanza la etapa temprana (1 a 16) a los 56 días de IPM, mientras que sobre la UE1 lo hace al día 109. Los 35 puntos de IPM (esqueletización) se alcanzan en la UE2 20 días antes que en la UE1. En este sentido, podemos decir que la velocidad del proceso de descomposición durante los primeros 25 puntos de TBS (fase temprana y avanzada) para otoño, primavera y verano es bastante pareja, aunque existe una variación en favor de la velocidad de descomposición para la UE2.

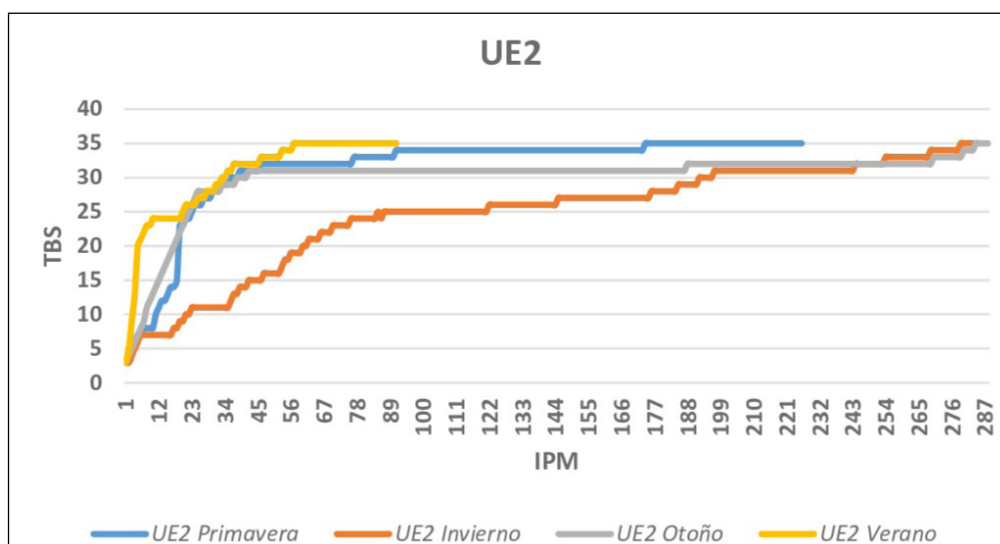


FIGURA 5. Relación entre la puntuación corporal total (TBS) y el intervalo *post mortem* (IPM) para la Unidad Experimental 2 (UE2) en todas las temporadas.

La Figura 6 resume la tendencia temporal del TBS a lo largo del IPM para la UE1 en las cuatro temporadas. La pendiente de *Sen* estima los cambios por unidad de tiempo en series temporales de tendencia lineal. La prueba bilateral de tendencia de Mann-Kendall para la UE1 ($Tau = ,963$; $p < ,05$) muestra una pendiente que indicaría un aumento constante de los TBS por unidad de tiempo (días de IPM) a partir del día 52 con 25 puntos de TBS.

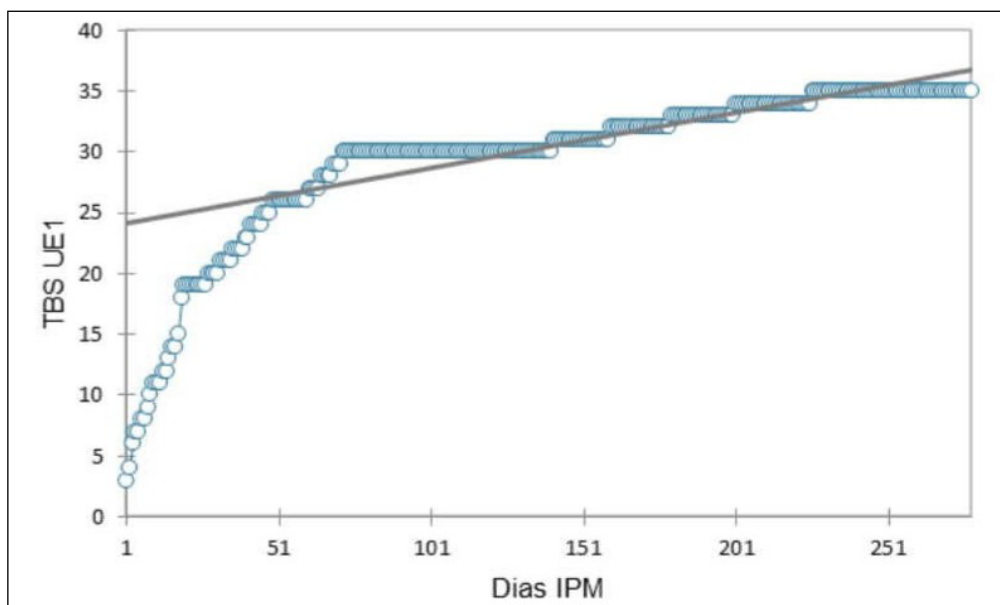


FIGURA 6. Correlación (Kendall) entre la puntuación corporal total (TBS) y el intervalo *post mortem* (IPM) para la Unidad Experimental 1 (UE1).

La UE2 (Fig. 7) muestra que la pendiente es más estable (de tendencia horizontal) y los TBS se incrementan a partir del día 51 (TBS de 32 puntos) en forma menos acusada mostrando un período de estabilidad del TBS a lo largo de los 200 días de IPM restantes ($Tau = ,868$; $p < ,05$).

Las Figuras 8 y 9 muestran las diferencias en los TBS en relación al IPM entre las temporadas de invierno y verano en la UE1 y la UE2, respectivamente. La UE2 presenta estadios de descomposición más adelantados que la UE1 en la misma unidad de tiempo.

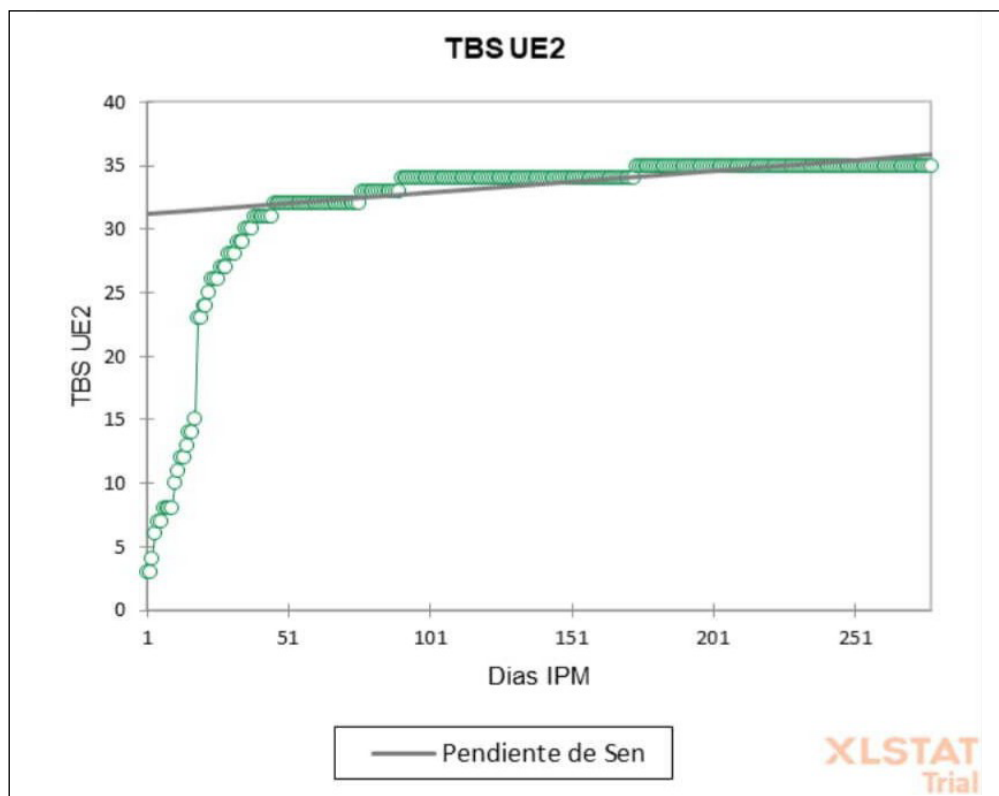


FIGURA 7. Correlación (Kendall) entre la puntuación corporal total (TBS) y el intervalo *post mortem* (IPM) para la Unidad Experimental 2 (UE2).



FIGURA 8. Unidad Experimental 1. **a)** Temporada de verano, 4 días de intervalo *post mortem* (IPM). **b)** Temporada de invierno, 7 días de intervalo *post mortem* (IPM).

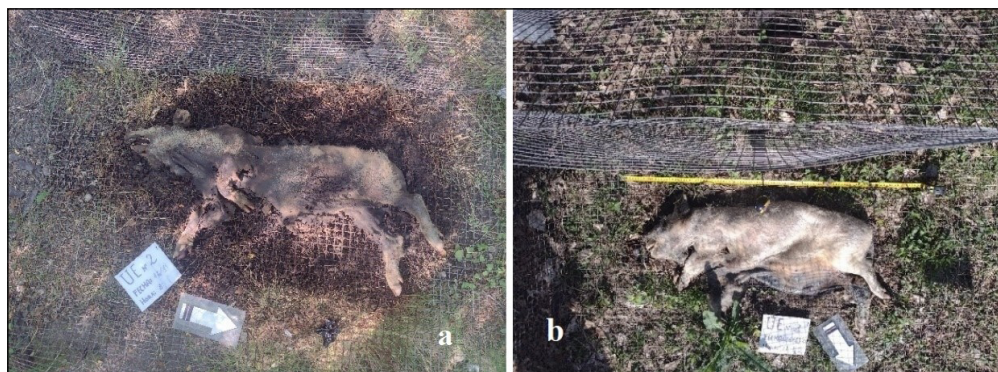


FIGURA 9. Unidad Experimental 2. **a)** Temporada de verano, 7 días de intervalo *post mortem* (IPM). **b)** Temporada de invierno, 15 días de intervalo *post mortem* (IPM).

La [Figura 10](#) muestra el comportamiento del TBS en relación a la temperatura acumulada por día de observación (ADD) durante la temporada de otoño. Ambas variables crecen parejas alcanzando los 25 puntos de TBS con un ADD de 372, a partir de lo cual la UE2 superará a la UE1 en entre 5 a 7 puntos arriba en el TBS con el mismo ADD. Para la temporada de primavera ([Fig. 11](#)) ambas variables se superponen hasta los 12 puntos de TBS con 199 ADD, a partir de lo cual se separan con diferencias de hasta 8 puntos de TBS.

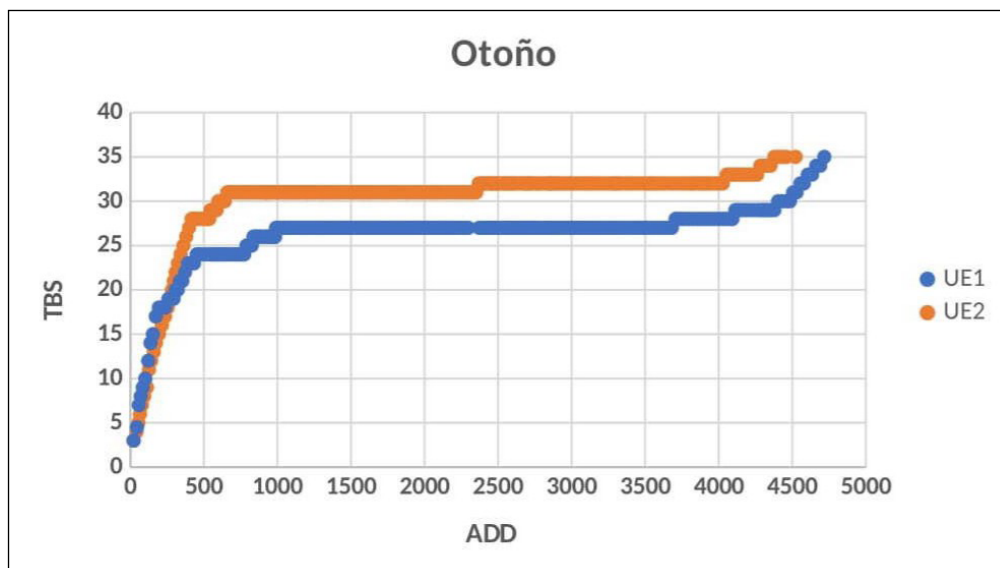


FIGURA 10. Puntuación corporal total (TBS) vs. grados acumulados por día (ADD) para la temporada de otoño en las Unidades Experimentales 1 (UE1) y 2 (UE2).

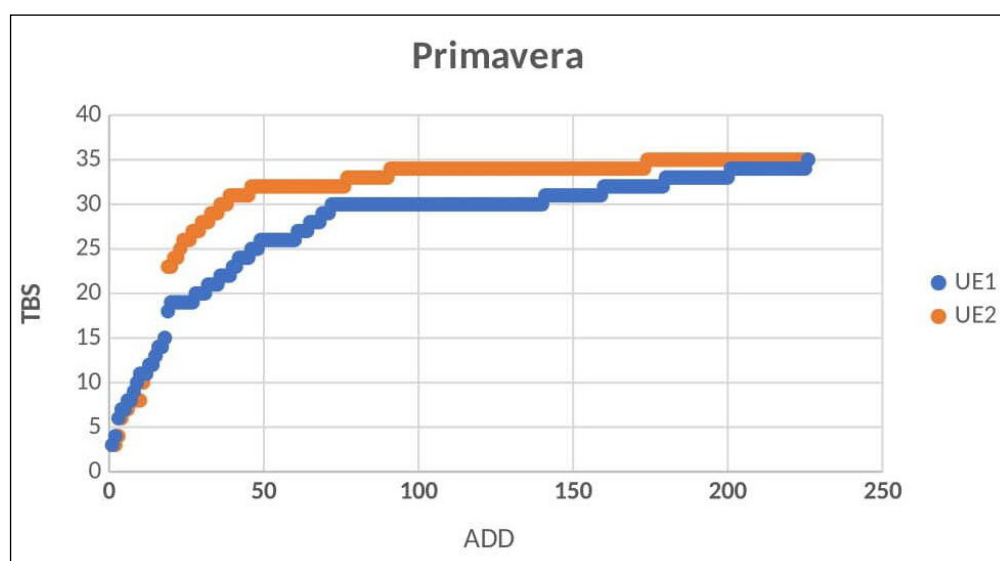


FIGURA 11. Puntuación corporal total (TBS) vs. grados acumulados por día (ADD) para la temporada de primavera en las Unidades Experimentales 1 (UE1) y 2 (UE2).

Para la temporada de verano ([Fig. 12](#)) ambas variables crecen juntas hasta los 20 puntos de TBS con una ADD de 127. La UE2 comienza a diferenciarse en los 27 TBS con diferencias de hasta 6 puntos de TBS en favor de la UE2 con un ADD para ambas de 1.740. Finalmente, para la temporada de invierno ([Fig. 13](#)), a los 10 puntos de TBS con un ADD de 286 se separan y nuevamente la UE2 saca una diferencia de 5 puntos de TBS con un ADD de 1.000. En efecto, durante el invierno, la UE1 necesita 1.035 ADD para un TBS entre 1 y 16 (estado temprano), mientras que la UE2 necesita 500 ADD.

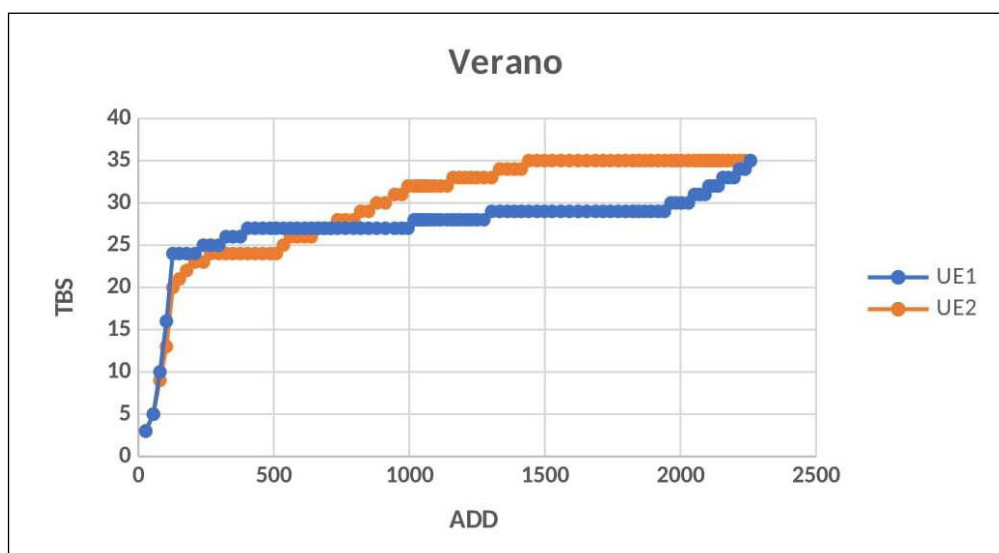


FIGURA 12. Puntuación corporal total (TBS) vs. grados acumulados por día (ADD) para la temporada de verano en las Unidades Experimentales 1 (UE1) y 2 (UE2).

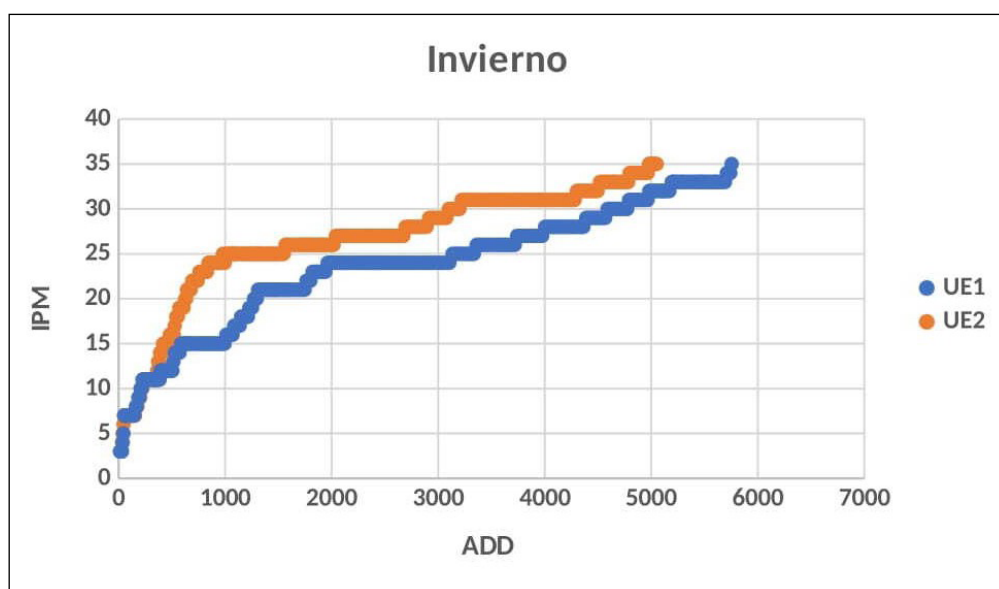


FIGURA 13. Puntuación corporal total (TBS) vs. grados acumulados por día (ADD) para la temporada de invierno en las Unidades Experimentales 1 (UE1) y 2 (UE2).

Es evidente que la fase avanzada de descomposición (entre 17 y 24 puntos de TBS) ocurriría más rápido en la UE2. Aunque se ha publicado poco en relación a la incidencia de la radiación solar en la tasa de descomposición (Voss *et al.*, 2011), una posible explicación para este fenómeno es que el contexto local de depositación de la UE2 mostraba una tasa menor de radiación solar y, sobre todo, cierta protección a las corrientes de aire por encontrarse dentro de una región arbustiva densa, lo cual la volvía más estable a las oscilaciones de temperatura a lo largo del día.

La *Tabla 4* resume los ADD requeridos para alcanzar las diferentes fases de TBS (temprana de 1 a 16 puntos, avanzada entre 17 y 24 puntos, y esqueletizada entre 25 y 35 puntos) en cada estación para ambas UE. Se muestran valores mayormente diferenciados entre verano e invierno, siendo menor entre otoño y primavera. Para la UE2 un TBS entre 1 y 16 se alcanza en invierno a los 501 ADD, casi la mitad que lo que le lleva a la UE1, mientras que en verano le lleva 101 ADD a ambas UE. Los 35 puntos de TBS en la UE2

llevan 3.740 ADD en invierno, mientras que en verano solo necesitan 1.393 ADD. Otoño y primavera son muy parecidos hasta los 23 TBS, a partir de lo cual otoño necesitará una diferencia de grados de temperatura mayor para alcanzar los mismos TBS.

TABLA 4. Relación entre la puntuación corporal total (TBS) y la temperatura acumulada diaria (ADD) para cada una de las temporadas sobre las dos Unidades Experimentales (UE).

	Fases	TBS	Otoño	Invierno	Primavera	Verano
UE1	Temprana	1 a 16	152,64	1035,89	295,55	103,89
	Avanzada	17 a 24	596,03	2421,97	742,67	127,6
	Esqueletizada	25 a 35	4717,65	5754,31	4885,88	2258,25
UE2	Temprana	1 a 16	133,26	501,2	224,6	101,2
	Avanzada	17 a 24	287,96	965,22	374,98	124,6
	Esqueletizada	25 a 35	4378,5	3740,6	3295,6	1393,28

La [Tabla 5](#) utiliza el estadístico de Kruskal-Wallis para evaluar la hipótesis nula de que las medianas de ADD y TBS de las dos UE son las mismas para las cuatro temporadas. Comparaciones por pares de Bonferroni muestran que la desviación estándar presenta una diferencia significativa más relevante en la UE1 que en la UE2, lo que estaría sugiriendo que el ambiente en donde esta última está depositada se comportaría como un medio más estable en relación a las variaciones climáticas, por lo menos en relación a la temperatura, humedad, cubierta de la precipitación y reparo de las corrientes de aire.

TABLA 5. Prueba de Kruskal-Wallis para evaluar las medianas dentro de un conjunto de variables.

	Estaciones comparadas	Estadístico	Desvío estándar	Valor p
UE1	Otoño/primavera	-0,167	-0,524	,6
	Otoño/invierno	1.288	4.052	< ,0001*
	Otoño/verano	0,97	3.051	,002*
	Primavera/invierno	1.121	3.528	< ,0001*
	Primavera/verano	1.136	3.575	< ,0001*
	Invierno/verano	2.258	7.103	< ,0001*
UE2	Otoño/primavera	0,938	2.054	,24
	Otoño/invierno	1.125	2.465	,082
	Otoño/verano	2.688	5.888	< ,0001*
	Primavera/invierno	0,188	0,411	,681
	Primavera/verano	1,75	3.834	< ,0001*
	Invierno/verano	-1.562	-3.423	,001*

* p < ,05, indica una diferencia significativa con un nivel de confianza de 95%.

La [Figura 14](#) muestra un gráfico de correspondencia donde se agrupa la distribución de las desviaciones estándar entre las variables TBS/ADD entre todas las temporadas para ambas UE. Para interpretar el análisis de correspondencia se puede evaluar si existe una dependencia significativa entre las filas y las columnas, agrupando o dispersando los valores. Vemos que las temporadas de verano e invierno son las que muestran valores con diferencias significativas, pues sus valores están más distantes en el eje de ordenadas, indicando una diferencia de comportamiento entre ambas variables (TBS/ADD). Mientras que otoño y primavera integran una nube más cercana de puntos, volviendo menor la diferencia entre ambas variables.

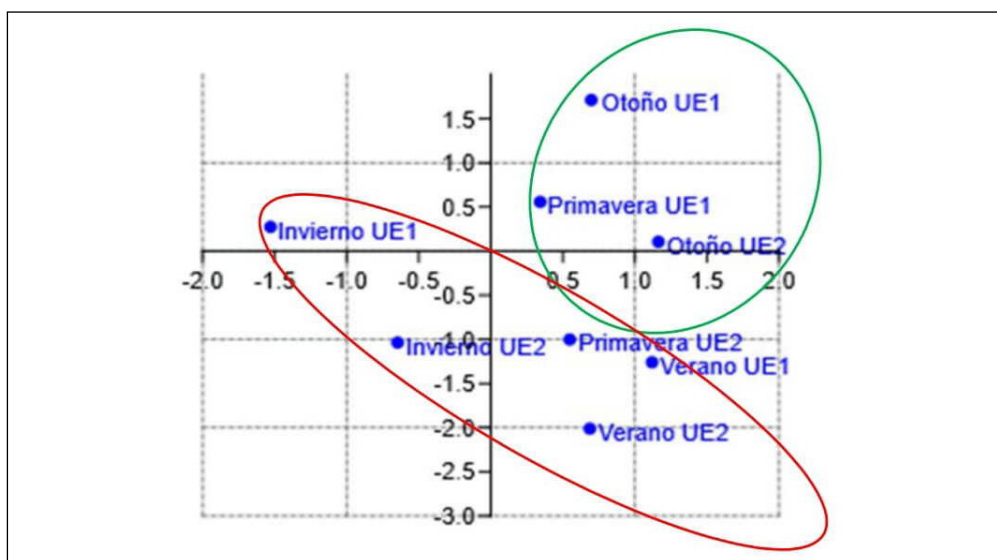


FIGURA 14. Gráfico de análisis de correspondencia entre grados acumulados por día (ADD) y puntuación corporal total (TBS) para todas las temporadas de las Unidades Experimentales 1 (UE1) y 2 (UE2).

Finalmente, hemos testado que, si bien existe una fuerte dependencia entre el ADD y los TBS para inferir el IPM, el modelo de regresión múltiple por pasos hacia adelante ha demostrado que la utilización de la variable independiente Grados Acumulados por Día (ADD) produce un R^2 ajustado de 91,96%, mientras que, si añadimos a dicho modelo los valores de promedio de Humedad Acumulada por Día (AHD), el R^2 ajustado se eleva a 95,20%, por lo que se infiere que es una variable que debería ser considerada.

En este sentido, se podría obtener un TBS esperado utilizando no solamente el ADD, sino también los promedios de humedad (AHD), por lo que el modelo seleccionado sería: $TBS = 17,2172 + 36,2114 \cdot \log(ADD) - 28,2256 \cdot \log(AHD)$. Dicha fórmula debería testarse estadísticamente en futuras investigaciones con apoyo experimental.

DISCUSIÓN

Aunque no se pudo cuantificar una diferencia significativa entre las UE en relación a los promedios de temperatura y humedad a lo largo del IPM para cada una de las temporadas, sí se pudo apreciar diferencias de valores de ambas variables a lo largo de 24 horas. En efecto, se observan diferencias de hasta 4 grados menos de temperatura en favor de la UE2 y un porcentaje mayor de humedad. Sin embargo, vemos una oscilación de los valores de temperatura y humedad menores en la UE2. La cobertura del bosque en galería intercepta la radiación solar, mientras que la proximidad al curso de agua, la disminución del viento por la vegetación y la reducción de los volúmenes de precipitación por las hojas mantendrían más estable los registros de temperatura y humedad en la UE2 (Lenk *et al.*, 2024).

En el presente estudio el ADD representó aproximadamente entre el 85% y 90% de la variabilidad en la descomposición, que es superior al 80% observado por Megyesi *et al.* (2005) y al 78% por Schiel (2008). Debemos argumentar que, aunque el uso de ADD para estimar el IPM se ha convertido en una técnica popular entre los antropólogos forenses, especialmente en América del Norte (Megyesi *et al.*, 2005; Schiel, 2008, Vass *et al.*, 2002), existen factores como el volumen y frecuencia de las precipitaciones, la actividad de los insectos y la accesibilidad del cadáver a los carroñeros que podrían contribuir a una variación de la tasa de descomposición, así como a sus manifestaciones macroscópicas (Nasti, 2024).

Al igual que otras observaciones similares (Suckling, 2011), en el presente estudio se encontró que la descomposición de las dos UE tiende a ser curvilínea antes que lineal. Esto implica que, aunque en la fase inicial de descomposición se comportaría mayormente de manera lineal, se torna más estable cuando el TBS supera los 19 puntos (fase avanzada). La curva en la UE1 se estabiliza en 30 puntos de TBS a los 70 días de IPM, mientras que la UE2 lo hace a los 25 días de IPM. La razón de esta variabilidad no está del todo clara, pero se espera que factores de carácter local, como la menor oscilación de humedad y temperatura a lo largo del día, podrían desempeñar un papel relevante en los procesos de descomposición como se observa para la UE2.

Menos en la fase temprana, donde las UE lograron las mismas etapas cronológicas de descomposición (1 a 16 puntos de TBS), las fases avanzada (17 a 24) y esquelizada (25 a 35 puntos de TBS) se alcanzaron en diferentes momentos para las dos UE. La cabeza y el cuello del cerdo de la UE2 fueron las regiones que primero alcanzaron la fase de esquelización (TBS 35) a 185 días de IPM, mientras que para la UE1 (TBS 35) fueron necesarios 201 días de IPM. Si consideramos el valor del coeficiente de determinación de R^2 (.98 para UE1 y .97 para la UE2), la temperatura y la humedad explicarían de forma significativa el comportamiento de la variable dependiente (TBS), por lo tanto, aunque la ADD es la más importante, el porcentaje de humedad es otra variable que debe de considerarse para explicar el TBS, sobre todo para la UE2.

Aunque el presente estudio compromete ejemplares sin indumentaria, estudios experimentales mostrarían que el promedio del TBS obtiene un progreso similar en la etapa temprana de descomposición en ejemplares vestidos, mientras que en la fase esquelizada se observan de 1 a 3 puntos de TBS más bajo que el grupo no vestido (Cockle y Bell, 2016; Payne, 1965; Shean *et al.*, 1993).

Mientras que por el momento no se ha establecido la diferencia de temperatura necesaria para afectar la tasa de descomposición, sí se podría argumentar que la sombra estimularía una tasa de descomposición más rápida (Sharonowski *et al.*, 2008). La temperatura y humedad promedio de la UE2 muestran menos variación diaria lo que estimularía el crecimiento larvario y la velocidad de descomposición. Es por esta razón que se produce en la UE1 un retraso en el proceso de descomposición, fenómeno observado por varios investigadores en otros contextos con diferencias de temperatura y humedad sobre los ejemplares en experimentación (Bass, 1997; Campobasso *et al.*, 2019; Galloway *et al.*, 1989; Myburgh *et al.*, 2013; Simpson y Strongman, 2002; Voss *et al.*, 2011).

Es lógico suponer que los resultados obtenidos sobre restos de cerdo doméstico no pretenden ser determinantes para predecir fenómenos forenses donde estén involucrados seres humanos. Sin embargo, el TBS sigue siendo un buen indicador cuantitativo de las fases de descomposición y la utilización de los ADD sigue constituyendo una herramienta valiosa que merece ser testada a lo largo de las diferentes estaciones del año en medioambientes locales (Galloway, 1997; Galloway *et al.*, 1989; Simmons *et al.*, 2010). En este último aspecto, existiría una correlación entre la cantidad de lluvia caída y un aumento en los TBS. En efecto, durante la temporada de primavera cayeron más de 180 mm a lo largo de tres días, lo que produjo un incremento en el TBS de 6 puntos en ambas UE.

Esta observación ha puesto la atención en que la humedad, en lugar de la temperatura, podría ser un factor crítico de la descomposición en la fase *post mortem* temprana (1 a 16 puntos de TBS), aunque también podría reactivar periodos de descomposición más tardíos (Giles *et al.*, 2020).

Finalmente, los resultados de este tipo de estudios no solo podrían ser útiles en contextos forenses, sino también ser relevantes en contextos arqueológicos y bioarqueoló-

gicos. En efecto, las alteraciones *post* depositacionales, la conservación diferencial del registro óseo, la distribución espacial y los procesos diagenéticos suelen estar asociados al medio en que fueron depositados, donde las condiciones ecológicas de temperatura y humedad podrían jugar roles decisivos para la variabilidad del registro óseo.

CONCLUSIONES

El TBS es un buen indicador cuantitativo de las etapas de descomposición y la tasa de cambio de un valor TBS a otro se puede utilizar para mostrar las diferencias en la velocidad de descomposición entre muestras. Se ha utilizado la regresión entre el ADD y el TBS para estimar el IPM (Megyesi *et al.*, 2005; Schiel, 2008). Al igual que en otros estudios (Marden y Sorg, 2011; Sukling, 2011; Vass *et al.*, 1992; Wahyono y Denys, 2022) se encontró que la tasa de descomposición de todo el conjunto de datos tiene una tendencia curvilínea en lugar de lineal. Basándonos en estudios ya testeados en otros contextos donde el TBS mostraba formas curvilíneas, se empleó la transformación logarítmica de los datos para disminuir la asimetría entre las variables y facilitar la interpretación de la regresión de máxima verosimilitud de efectos aleatorios (Moffatt *et al.*, 2016).

Una gran proporción (90%) de la variación encontrada en las puntuaciones de TBS se explicó por el ADD, por cuanto los cambios morfológicos en el cuerpo podrían ser cuantificables. La tasa de la fase temprana de descomposición aumentó de manera lineal, pero notamos que se volvió más variable cuando el TBS entró en la fase avanzada (17 a 24 puntos). La razón de esta variabilidad no está del todo clara, pero se espera que otros factores comiencen a jugar un papel más importante en los procesos de descomposición, como la disminución de la masa larvaria durante las últimas fases de la descomposición debido a la deshidratación (Simmons *et al.*, 2010).

Aunque se observa una variación estacional entre el TBS, el ADD y el IPM, sobre todo comparando las temporadas de verano e invierno, la velocidad de descomposición es más rápida en todas las temporadas en la UE2 que en la UE1, distante 150 metros. El período estival también mostró más variabilidad a diferencia del invierno, donde la descomposición es más lenta pero más estable, debido a que este período es más seco. En este sentido, el ambiente donde se deposita la UE1 es favorable a la deshidratación ya que está sometida a altas cantidades de radiación solar y viento en todas las temporadas, lo que retrasa sustancialmente el proceso de descomposición si se compara con la UE2.

La estimación del IPM es una parte integral de la investigación médico-legal de la muerte. Sin embargo, los cambios *post mortem* pueden complicar dicha estimación ya que existen varios factores que podrían afectar la velocidad y el proceso de descomposición y que todavía son difíciles de identificar y, sobre todo, cuantificar. Sabemos que los principales factores que actúan en la descomposición en el área de nuestro estudio son la temperatura y la humedad, aunque también podrían actuar otros factores como la ropa y la presencia de heridas y es en este sentido que resulta imperioso realizar estudios experimentales con replicación (Cross y Simmons, 2010).

Es cierto que, dentro de la instrucción judicial, suele ser poco frecuente que se le pida a un antropólogo forense que estime un IPM. En efecto, para períodos cortos, las técnicas de patología forense son la norma para la determinación del tiempo transcurrido desde la muerte en el período *post mortem* temprano. Sin embargo, la utilización de las puntuaciones ADD y TBS en aquellos casos donde el tiempo transcurrido es un factor limitante a la utilización de técnicas tradicionales para estimar el IMP, la construcción de un modelo de IPM podría ser un instrumento valioso y contribuir en las primeras etapas de investigación criminal.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento al Dr. Nicholas Márquez-Grant, a los Editores de la revista y a los revisores anónimos que aportaron sustanciales mejoras en el manuscrito.

Por el momento, la utilización de animales como sustituto de la descomposición humana requiere serios estudios de validación, sin embargo, continúan proporcionando información relevante sobre los principios básicos de los procesos de descomposición (Schoenly *et al.*, 2007; Steadman, 2013).

Es evidente que es necesario estudios futuros para investigar los factores adicionales que podrían intervenir en el proceso de descomposición, aumentar los datos de referencia, e investigar más a fondo las interacciones respectivas tanto en el modelo animal como en los seres humanos, para poder proporcionar una caja de herramientas suficiente para un amplio espectro de aplicaciones en el trabajo de casos forenses.

Somos conscientes de que la aplicación práctica de este tipo de estudio puede ser resistido por el sistema de justicia, sin embargo, constituye una herramienta valiosa de la antropología forense para otorgar un IPM de carácter orientativo al inicio de una investigación judicial a la espera de la reunión de pruebas complementarias suficientes para concluir una investigación del tiempo de muerte.

CONTRIBUCIÓN DEL AUTOR

Atilio Nasti: Conceptualización; Análisis formal; Investigación; Supervisión; Escritura – Preparación del borrador original, Escritura – Revisión y edición.

CONFLICTO DE INTERESES

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

- Armstrong, P., Nizio, K. D., Perrault, K. A. y Forbes, S. L. (2016). Establishing the volatile profile of pig carcasses as analogues for human decomposition during the early postmortem period. *Heliyon*, 2(2), e00070. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00070>
- Anderson, G. S. y VanLaerhoven, S. L. (1996). Initial studies on insect succession on carrion in Southwestern British Columbia. *ASTM Journal of Forensic Sciences*, 41(4), 617–625. <https://doi.org/10.1520/JFS13964J>
- American Veterinary Medical Association. (2013). *AVMA Guidelines for the Euthanasia of Animals: 2013 Edition*.
- Bass, W. M., III. (1997). Outdoor decomposition rates in Tennessee. En W. D. Haglund y M. H. Sorg (Eds.), *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains* (pp. 181–186). CRC Press.
- Bates, L.N. y Wescott, D. J. (2016). Not all degree days are equal in the rate of decomposition: the effect of season of death on the relationship between gross postmortem decomposition and accumulated degree days. En American Academy of Forensic Sciences (Ed.), *Proceedings of the 68th Annual Scientific Meeting of the American Academy of Forensic Sciences* (p. 178). American Academy of Forensic Sciences.
- Bytheway, J. A, Steadman, D. y Wescott, D. (2014). *Validation study of the utility of using Total Body Score and Accumulated Degree Days to determine the post-mortem interval of human remains from three human decomposition research facilities* (NCJ Report No 255132). U.S. Department of Justice, National Institute of Justice.
- Brown, C. y Peckmann, T. (2013). Decomposition rates and taphonomic changes associated with the estimation of time since death in a summer climate: a case study from urban Nova Scotia. *Canadian Society of Forensic Science Journal*, 46(4), 209–230. <https://doi.org/10.1080/00085030.2013.10799549>

- Campobasso, C. P., Di Vella, G. e Introna, F. (2001). Factors affecting decomposition and Diptera colonization. *Forensic Science International*, 120(1–2), 18–27. [https://doi.org/10.1016/S0379-0738\(01\)00411-X](https://doi.org/10.1016/S0379-0738(01)00411-X)
- Centeno, N. D. y Zalazar, L. (2014). La utilización de un modelo experimental porcino en la investigación de un homicidio. *Boletín de la Sociedad Entomológica Argentina*, 25(1), 3–5.
- Clark, M. A., Worrell, M. B. y Pless, J. E. (1997). Postmortem changes in soft tissues. En W. D. Haglund y M. H. Sorg (Eds.), *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains* (pp. 151–170). CRC Press.
- Cockle, D. L. y Bell, L. S. (2017). The environmental variables that impact human decomposition in terrestrially exposed contexts within Canada. *Science & Justice*, 57(2), 107–117. <http://doi.org/10.1016/j.scijus.2016.11.001>
- Cross, P. y Simmons, T. (2010). The influence of penetrative trauma on the rate of decomposition. *Journal of Forensic Science*, 55(2), 295–301. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2009.01277.x>
- Dautartas, A., Kenyhercz, M. W., Vidoli, G. M., Meadows Jantz, L., Mundorff, A. y Steadman, D. W. (2018). Differential decomposition among pig, rabbit, and human remains. *Journal of Forensic Sciences*, 63(6), 1673–1683. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13784>
- Dirkmaat, D. C., Cabo, L. L., Ousley, S. D. y Symens, S. A. (2008). New Perspectives in forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, 137(S47), 33–52. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20948>
- Duhig, C. (2003). Non-forensic remains: the use of forensic archaeology, anthropology and burial taphonomy. *Science & Justice*, 43(4), 211–214. [https://doi.org/10.1016/S1355-0306\(03\)71778-X](https://doi.org/10.1016/S1355-0306(03)71778-X)
- Galloway, A., Birkby, W. H., Jones, A. M., Henry, T. E. y Parks, B. O. (1989). Decay rates of human remains in an arid environment. *ASTM Journal of Forensic Sciences*, 34(3), 607–616. <https://doi.org/10.1520/JFS12680J>
- Galloway, A. (1997). The process of decomposition: a model from the Arizona-Sonoran Desert. En W. D. Haglund y M. H. Sorg (Eds.), *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains* (pp. 139–150). CRC Press.
- Giles, S. B., Harrison, K., Errickson, D. y Márquez-Grant, N. (2020). The effect of seasonality on the application of accumulated degree-days to estimate the early post-mortem interval. *Forensic Science International*, 315, 110419. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110419>
- Haglund, W. D. y Sorg, M. H. (Eds.). (1997). *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains*. CRC Press.
- Hayman, J. y Oxenham, M. (2016). Estimation of the time since death in decomposed bodies found in Australian conditions. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 49(1), 31–44. <https://doi.org/10.1080/00450618.2015.1128972>
- Hewadikaram, K. A. y Goff, M. L. (1991). Effect of carcass size on rate of decomposition and arthropod succession patterns. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 12(3), 235–240. <http://dx.doi.org/10.1097/00000433-199109000-00013>
- Keough, N., Myburgh, J. y Steyn, M. (2017). Scoring of decomposition: a proposed amendment to the method when using a pig model for human studies. *Journal of Forensic Sciences*, 62(4), 986–993. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13390>
- Kim, Y. S., Kim, J. H., Yoon, K. S., Kweon, B. S., Kim, Y. S., Lee, G. Y., Cho, H.-W., Kim, H.-R. y Eom, Y.-B. (2018). Feasibility of total body score (TBS) and accumulated degree days (ADD) in the estimation of postmortem interval for forensic murder casework. *Biomed Science Letters*, 24(1), 35–42. <https://doi.org/10.15616/BSL.2018.24.1.35>
- Lenk, A., Richter, R., Kretz, L. y C. Wirth. (2024). Effects of canopy gaps on microclimate, soil biological activity and their relationship in a European mixed floodplain forest. *Science of The Total Environment*, 941, 173572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173572>

- Madea, B. (2016). Methods for determining time of death. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*, 12(4), 451–485. <https://doi.org/10.1007/s12024-016-9776-y>
- Marden, K. y Sorg, M. H. (2011). Potential impacts of regional ecologies on the estimation of postmortem interval: case comparisons from Northern New England. En American Academy of Forensic Sciences (Ed.), *Proceedings of the 63rd Annual Scientific Meeting of the American Academy of Forensic Sciences* (pp. 388–389). American Academy of Forensic Sciences.
- Marhoff, S. J., Fahey, P., Forbes, S. L. y Green, H. (2016). Estimating post-mortem interval using accumulated degree-days and a degree of decomposition index in Australia: A validation study. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 48(1), 24–36. <https://doi.org/10.1080/00450618.2015.1021378>
- Mathur, A. y Agrawal, Y. K. (2011). An overview of methods used for estimation of time since death. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 43(4), 275–285. <https://doi.org/10.1080/00450618.2011.568970>
- Matuszewski, S. y Mądra-Bielewicz, A. (2016). Validation of temperature methods for the estimation of pre-appearance interval in carrion insects. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*, 12, 50–57. <https://doi.org/10.1007/s12024-015-9735-z>
- Megyesi, M. S., Nawrockie, S. P. y Haskell, N. H. (2005). Using accumulated degree-days to estimate the postmortem interval from decomposed human remains. *ASTM Journal of Forensic Sciences*, 50(3), 1–9. <https://doi.org/10.1520/JFS2004017>
- Michaud, J.-P. y Moreau, G. (2011). A statistical approach based on accumulated degree-days to predict decomposition-related processes in forensic studies. *Journal of Forensic Sciences*, 56(1), 229–232. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2010.01559.x>
- Micozzi, M. S. (1991). *Postmortem change in human and animal remains: a systematic approach*. Charles C. Thomas Publisher.
- Moffatt, C., Simmons, T. y Lynch-Aird, J. (2016). An improved equation for TBS and ADD: establishing a reliable postmortem interval framework for casework and experimental studies. *Journal of Forensic Sciences*, 61(S1), S201–S207. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12931>
- Myburgh, J. (2010). *Estimating the Post-mortem Interval Using Accumulated Degree-Days in a South African Setting* [Tesis de maestría, University of Pretoria]. <http://repository.up.ac.za/handle/2263/25700>
- Myburgh, J., Ericka, N. L., Steyn, M. y Becker, P. J. (2013). Estimating the postmortem interval (PMI) using accumulated degree-days (ADD) in a temperate region of South Africa. *Forensic Science International*, 229(1–3), 165e1–189e6. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.03.037>
- Nasti, A. (2021). Carroñeo y dispersión sobre restos de cerdo doméstico (*Sus scrofa*) en contextos de humedales: implicancias forenses. *Revista Argentina de Antropología Biológica*, 23(2), 038. <https://doi.org/10.24215/18536387e038>
- Nasti, A. (2022). Una nueva aproximación a la estimación del intervalo *post mortem* en restos de *Sus scrofa* en contextos experimentales ecológicos del conurbano de la provincia de Buenos Aires. Modelos tafonómicos y proyecciones forenses. *Revista Internacional de Antropología y Odontología Forense*, 5(1), 7–18.
- Nasti, A. (2024). Jerarquía, competencia y carroñeo: hacia la construcción de un modelo tafonómico forense para el área periurbana de la Ciudad de Buenos Aires. *Revista Internacional de Antropología y Odontología Forense*, 7(2), 50–74.
- Passalacqua, N. V. y Megyesi, M. S. (2015). A look into the past, present, and future of decomposition research and the estimation of the postmortem interval. En American Academy of Forensic Sciences (Ed.), *Proceedings of the 67th Annual Scientific Meeting of the American Academy of Forensic Sciences* (pp. 93–94). American Academy of Forensic Sciences.
- Payne, J. A. (1965). A summer carrion study of the baby pig *Sus scrofa* Linnaeus. *Ecology*, 46(5), 592–602. <https://doi.org/10.2307/1934999>

- Pittner, S., Bugelli, V., Weitgasser, K., Zissler, A., Sanit, S., Lutz, L., Monticelli, F., Campobasso, C. P., Steinbacher, P. y Amendt, J. (2020). A field study to evaluate PMI estimation methods for advanced decomposition stages *International Journal of Legal Medicine*, 134, 1361–1373. <https://doi.org/10.1007/s00414-020-02278-0>
- Rodriguez, W. C., III (1997). Decomposition of buried and submerged bodies. En W. D. Haglund y M. H. Sorg (Eds.), *Forensic Taphonomy: The Post-Mortem Fate of Human Remains* (pp. 459–468). CRC Press.
- Schiell, M. (2008). *Using accumulate degree days for estimating the postmortem interval: a re-evaluation of Megyesi's regression formulae* [Tesis de maestría no publicada]. University of Indianapolis.
- Schoenly, K. G., Haskell, N. H., Hall, R. D. y Gbur, J. R. (2007). Comparative performance and complementarity of four sampling methods and arthropod preference tests from human and porcine remains at the Forensic Anthropology Center in Knoxville, Tennessee. *Journal of Medical Entomology*, 44(5), 881–894. [https://doi.org/10.1603/0022-2585\(2007\)44\[881:cpacof\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1603/0022-2585(2007)44[881:cpacof]2.0.co;2)
- Sharanowski, B. J., Walker, E. G. y Anderson, G. S. (2008). Insect succession and decomposition patterns on shaded and sunlit carrion in Saskatchewan in three different seasons. *Forensic Science International*, 179(2–3), 219–240. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2008.05.019>
- Shean, B., Messinger, L. y Papworth, M. (1993). Observations of differential decomposition on sun exposed v. shaded pig carrion in coastal Washington State. *ASTM Journal of Forensic Sciences*, 38(4), 938–949. <https://doi.org/10.1520/JFS13492J>
- Simmons, T., Adlam, R. E. y Moffatt, C. (2010). Debugging decomposition data—comparative taphonomic studies and the influence of insects and carcass size on decomposition rate. *Journal of Forensic Sciences*, 55(1), 8–13. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2009.01206.x>
- Simpson, G. y Strongman, D. B. (2002). Carrion insects on pig carcasses at a rural and an urban site in Nova Scotia. *Canadian Society of Forensic Science Journal*, 35(3), 123–143. <https://doi.org/10.1080/00085030.2002.10757541>
- Suckling, J. K. (2011). *A longitudinal study on the outdoor human decomposition sequence in Central Texas* [Tesis de maestría, Texas State University]. <https://digital.library.txst.edu/items/fa3c1efc-e2a9-481c-8230-5e93708a1d1a>
- Sorg, M. H., David, E. y Rebmann, A. J. (1998). Cadaver dogs, taphonomy, and postmortem interval in the northeast. En K. J. Reichs (Editora), *Forensic Osteology: Advances in the Identification of Human Remains* (pp. 120–144). Charles C. Thomas.
- Sorg, M. H., y Marden, K. (2013). Developing frameworks for regional forensic taphonomy research and practice: a multi-regional symposium. En American Academy of Forensic Sciences (Ed.), *Proceedings of the 65th Annual Scientific Meeting of the American Academy of Forensic Sciences* (pp. 454–455). American Academy of Forensic Sciences.
- Steadman, D. W. (2013). *Multidisciplinary validation study of nonhuman animal models for forensic decomposition research* (NCJ Report No 251553). U.S. Department of Justice, National Institute of Justice.
- Sutherland, A., Myburgh, J., Steyn, M. y Becker, P. J. (2013). The effect of body size on the rate of decomposition in a temperate region of South Africa. *Forensic Science International*, 23(1–3), 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.05.035>
- Vass, A. A., Bass, W. M., Wolt, J. D., y Foss, J. E. y Ammons, J. T. (1992). Time since death determinations of human cadavers using soil solution. *Journal of Forensic Sciences*, 37(5), 1236–1253.
- Vass, A. A., Barshick, S. A., Sega, G., Caton, J., Skeen, J. T., Love, J. C. y Synsteliën, J., A. (2002). Decomposition chemistry of human remains: a new methodology for determining the postmortem interval. *ASTM Journal of Forensic Sciences*, 47(3), 542–553. <https://doi.org/10.1520/JFS15294J>
- Voss, S. C., Cook, D. F. y Dadour, I. R. (2011). Decomposition and insect succession of clothed and unclothed carcasses in Western Australia. *Forensic Science International*, 211(1–3), 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.04.018>

- Wahyono, A. y Alim, D. P. (2022). Estimation of post mortem interval using accumulated degree days (ADD) method. *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences*, 18(SUPP16), 102–106.
- Wescott, D. J. (2018). Recent advances in forensic anthropology: decomposition research. *Forensic Sciences Research*, 3(4), 278–293. <https://doi.org/10.1080/20961790.2018.1488571>