

Proxectos INOU 2025

Investigación aplicada na provincia de Ourense

Coordinación:

Vicerreitoría do
Campus de Ourense-Campus Auga

Proxectos INOU 2025

Investigación aplicada na provincia de Ourense

Coordinación:

Vicerreitoría do
Campus de Ourense-Campus Auga

Ourense, 2026

Universidade de Vigo • Campus de Ourense

Proxectos INOU 2025. Investigación aplicada na provincia de Ourense

Autores/as Investigadores/as principais:

Rey González, Guillermo David
Álvarez Vázquez, Miguel Ángel
Domínguez López, Ángel
Isorna Folgar, Manuel
Loureiro García, Marcos
Vázquez Silva, Iria
Cao, Hui
Des Villanueva, Marisela
Rodríguez Flores, María Shantal
Novo Lourés, María
Rodríguez Conde, Iván
Cruz González, María Montserrat

Coordinación:

Vicerreitoría do Campus de Ourense-Campus Auga

Comisión de Avaliación:

Cerdeira Lois, José Juan
Fernández López, Roberto Ignacio
Gómez Rodríguez, Alma
Martínez Suárez, Sidonia
Pérez Álvarez, María José
Rodríguez Rajo, Francisco Javier
Vaquero García, Alberto
Velasco Martínez, Luis

Nº de páxinas: 254

ISBN: 978-84-1188-127-2

Edición

Vicerreitoría do Campus de Ourense - Campus Auga

www.uvigo.gal/campus/ourense-campus-auga

© Universidade de Vigo

Maquetación

Miguel Chaler Publicidad

Reservados todos os dereitos. Nin a totalidade nin parte deste libro pode reproducirse ou transmitirse por ningún procedemento electrónico ou mecánico, incluíndo fotocopia, gravación magnética ou calquera almacenamento de información e sistema de recuperación, sen o permiso previo e por escrito das persoas titulares do copyright.

ÍNDICE

Prólogo	7
Plataforma IoT e espacial para a prevención de incendios e a agricultura de precisión	9
Xeoarqueoloxía nos Penedos da Raíña Loba	33
Plan de potencialidade, recuperación, posta en valor e protección da surxencia termal da Fonte do Baño, no val do Salas (Baltar, Ourense)	59
Poboación centenaria ourensá: unha proposta de zona de extrema lonxevidade no sur de Galicia	79
O espazo como recurso educativo: a súa importancia para facilitar a aplicación de metodoloxías activas	95
Ourense TermalAcces: accesibilidade cognitiva en contornos termais	109
Estudo sobre a bioactividade de compostos polifenólicos en restos de uva dos subprodutos do viño na rexión galega	129
Rexistros meteorolóxicos históricos da provincia de Ourense: recuperación, dixitalización e posta a disposición pública	145
Cara a un modelo ecolóxico-preditivo da calidade do pole apícola: integración de diversidade floral, nutrición e aprendizaxe automática	163
Avaliación de modelos zero-shot para a predición de niveis ambientais de pole na provincia de Ourense	191
Infraestrutura software para a reconstrución e exploración interactiva de imaxes de lámina completa a partir de capturas microscópicas manuais con artefactos estruturais	209
Proposta de creación dun club termal integrado de termas e balnearios na provincia de Ourense con financiamento parcial de tratamentos terapéuticos termais	233

PRÓLOGO

Francisco Javier Rodríguez Rajo

Vicerreitor do Campus de Ourense-Campus Auga

A investigación é unha forma de compromiso co coñecemento, coa sociedade e co territorio no que a Universidade de Vigo desenvolve a súa actividade. Froito deste compromiso continuado entre a Deputación de Ourense e a Vicerreitoría do Campus de Ourense, a través do cal dende o ano 2003 vimos colaborando para impulsar a investigación e a xeración de coñecemento na nosa provincia, presentamos os resultados dunha nova edición dos proxectos INOU levados a cabo durante o ano 2025. Ao longo destes anos, esta colaboración permitiu apoiar numerosas iniciativas investigadoras e, sobre todo, consolidar unha idea que cada vez é máis importante: a universidade debe ser un motor de desenvolvemento do seu territorio.

O presente libro reúne os resultados de doce estudos, que son unha boa mostra da riqueza e da diversidade da investigación que se realiza no campus de Ourense, e que proceden de diversos ámbitos de coñecemento unidos por un elemento común: a vontade de poñer ese coñecemento ao servizo da sociedade.

Alguns destes estudos representan unha aposta decidida pola innovación e polas novas tecnoloxías. A plataforma IoT e espacial para a prevención de incendios e a agricultura de precisión, ou a aplicación da aprendizaxe automática mediante modelos zero-shot á predición dos niveis ambientais de pole, son exemplos dunha investigación que mira cara ao futuro e que procura respostas para algúns dos grandes desafíos ambientais e produtivos do noso tempo. Tamén o son os avances no deseño de infraestrutura software para a reconstrución e exploración interactiva de imaxes de lámina completa a partir de capturas microscópicas manuais con artefactos estruturais ou a aplicación de modelos de intelixencia artificial ao estudo da calidade do pole apícola.

Pero investigar tamén significa mirar cara atrás para comprender mellor o que somos. A investigación xeoarqueolóxica nos Penedos da Raíña Loba e a recuperación e dixitalización dos rexistros meteorolóxicos históricos da provincia permiten rescatar parte do noso patrimonio natural, científico e cultural e poñelo ao noso alcance. Porque conservar a memoria dun territorio é tamén unha forma de construír o seu futuro.

Por outra banda, Ourense posúe recursos singulares que merecen ser coñecidos, protexidos e valorizados. O plan de potencialidade, recuperación, posta en valor e protección do afloramento termal da Fonte do Baño, no val do Salas (Baltar, Ourense), a investigación sobre a accesibilidade cognitiva nos contornos termais Ourense TermalAcces, ou a proposta de creación dun club termal integrado de termas e balnearios na provincia de Ourense con financiamento parcial de tratamentos terapéuticos termais, son tres aproximacións diferentes a unha das grandes singularidades da nosa provincia, a súa riqueza termal. Unha riqueza que debe ser entendida non só como un recurso medicinal, económico e turístico, senón tamén como parte do patrimonio natural, cultural e social de Ourense.

A investigación reunida nesta edición tamén se centra nas persoas e na súa calidade de vida. O estudo da poboación centenaria ourensá: unha proposta de zona de extrema lonxevidade no sur de Galicia abre unha interesante porta ao coñecemento das razóns e condicións que poden explicar a extraordinaria lonxevidade existente en determinadas zonas do sur de Galicia. Pola súa banda, a análise do espazo como recurso educativo e a súa importancia para facilitar a aplicación de metodoloxías activas lembra que innovar tamén significa repensar os lugares nos que aprendemos e as condicións que favorecen unha educación máis activa, participativa e adaptada ás necesidades da sociedade actual.

E, finalmente, a investigación sobre a bioactividade de compostos polifenólicos en restos de uva dos subprodutos do viño na rexión galega manifesta outra das grandes potencialidades do noso territorio, a capacidade para converter os recursos propios en novas oportunidades de innovación, sustentabilidade e desenvolvemento, avanzando cara a modelos de economía máis circulares e eficientes.

Quero expresar o meu agradecemento á Deputación Provincial de Ourense, polo seu apoio continuado a esta iniciativa, e á Universidade de Vigo, polo seu compromiso coa investigación e coa transferencia de coñecemento. E, moi especialmente, quero recoñecer o traballo das investigadoras e investigadores que fixeron posibles estes once proxectos, así como o compromiso e a profesionalidade do persoal técnico, de xestión e de administración e servizos que, desde os diferentes ámbitos da nosa universidade, contribúe cada día a crear as condicións necesarias para que a actividade investigadora se poida desenvolver de xeito tan exitoso. Detrás de cada estudo hai horas de traballo, dificultades e moitos resultados, pero, sobre todo, hai persoas que decidiron dedicar o seu esforzo ao avance da ciencia, a tecnoloxía, o patrimonio, o medio ambiente, o termalismo, a agricultura, a educación, a demografía ou a innovación.

Plataforma IoT e espacial para a prevención de incendios e a agricultura de precisión

Ignacio González-Rúa

Departamento de Tecnoloxía Electrónica, campus de Vigo, Universidade de Vigo.
ignacio.gonzalez.rua2@uvigo.gal

Guillermo Rey González

Departamento de Enxeñaría Mecánica, Máquinas e Motores Térmicos e Flúidos, campus de Ourense, Universidade de Vigo.
guillermo.rey@uvigo.gal

Pablo Francisco Fernández Fernández

Departamento de Teoría do Sinal e Comunicacións, campus de Vigo, Universidade de Vigo.
pablofrancisco.fernandez@uvigo.gal

Manuel Diz-Folgar

Departamento de Enxeñaría Mecánica, Máquinas e Motores Térmicos e Flúidos, campus de Ourense, Universidade de Vigo.
manuel.diz.folgar@uvigo.gal

A monitorización ambiental de grandes ecosistemas e áreas agrícolas en zonas rurais presenta desafíos loxísticos e tecnolóxicos complexos que as redes de telecomunicacións terrestres convencionais non lograron resolver de maneira economicamente viable debido á falta de infraestrutura. Na provincia de Ourense (Galicia), a protección contra os incendios forestais e a xestión da agricultura de precisión –especialmente no estratéxico sector vitivinícola– vense severamente obstaculizadas pola escarpada orografía e a denominada «cegueira de datos» derivada da inexistencia de cobertura celular.

Este capítulo detalla o desenvolvemento e os resultados do proxecto Ourense InouSpace, cuxo obxectivo neuráxico é o deseño, implementación e validación dun subsistema de comunicacións espaciais baseado en tecnoloxía LoRaWAN, orientado a aplicacións de internet das cousas (IoT) directo ao satélite (*Direct-to-Satellite IoT*). A arquitectura proposta supón un cambio de paradigma ao elevar a pasarela de rede (*gateway*) ao espazo, integrando unha carga útil híbrida a bordo dunha plataforma SoC (*System on Chip*) Zynq-7020. Esta arquitectura combina un concentrador LoRa hardware (baseado no chip ASIC SX1302) para unha recepción eficiente e multicanle no enlace ascendente (*uplink*), cun transceptor de radio definida por software (SDR AD9364) que habilita un enlace descendente (*downlink*) de alta velocidade en Banda S.

Para superar as estritas limitacións de tamaño de trama inherentemente ligadas ao protocolo LoRaWAN, o sistema integra o estándar IETF SCHC (*Static Context Header Compression and Fragmentation*) en ambos os extremos do enlace, acadando unha compresión drástica de cabeceiras e un mecanismo de fragmentación de alta fiabilidade. O presente traballo documenta o deseño *End-to-End*, que abrangue dende a fabricación e a estimación enerxética dos nodos sensores terrestres autoabastecidos ata a avaliación experimental en laboratorio mediante atenuación controlada, demostrando de xeito concluínte a viabilidade técnica de despregar redes de monitorización continuas, masivas e de baixo custo na provincia de Ourense.

Palabras clave: LoRaWAN, IoT satelital, prevención de incendios forestais, agricultura de precisión, radio definida por software (SDR), SCHC, Zynq-7020.

1. Introducción

1.1 Contexto medioambiental e socioeconómico da provincia de Ourense

A monitorización e salvagarda das contornas naturais e das explotacións agrícolas de alto valor constitúen dous dos piares máis urxentes para o desenvolvemento sostible do rural galego. Dentro deste marco, a provincia de Ourense presenta unha

dualidade crítica: por unha banda, atópase nunha situación de extrema vulnerabilidade fronte ao impacto devastador dos incendios forestais e, pola outra, posúe un tecido económico profundamente ligado á viticultura de calidade que demanda unha urxente modernización tecnolóxica para optimizar os seus recursos e facer fronte ao cambio climático.

Malia a transformación dixital da última década, a materialización de infraestruturas intelixentes atópase cunha barreira física e económica inevitable. Estímase que unha inmensa maioría da superficie terrestre carece de calquera tipo de cobertura celular, deixando vastas extensións de territorio nunha situación de illamento de datos [1].

No tocante á problemática dos lumes, Ourense concentrou historicamente a maioría dos riscos máis severos de Galicia. Segundo os datos oficiais recompilados no Plan de prevención e defensa contra os incendios forestais de Galicia (Pladiga), o ano 2022 deixou un balance catastrófico na comunidade autónoma: arderon un total de 51 642,58 hectáreas como consecuencia dos 1713 incendios rexistrados ao longo do ano. Destas perdas, un volume desproporcionado localizouse na provincia de Ourense, onde as chammas arrasaron 32 079,52 hectáreas, o que representa o 62,11 % do total da superficie queimada en toda Galicia [2].

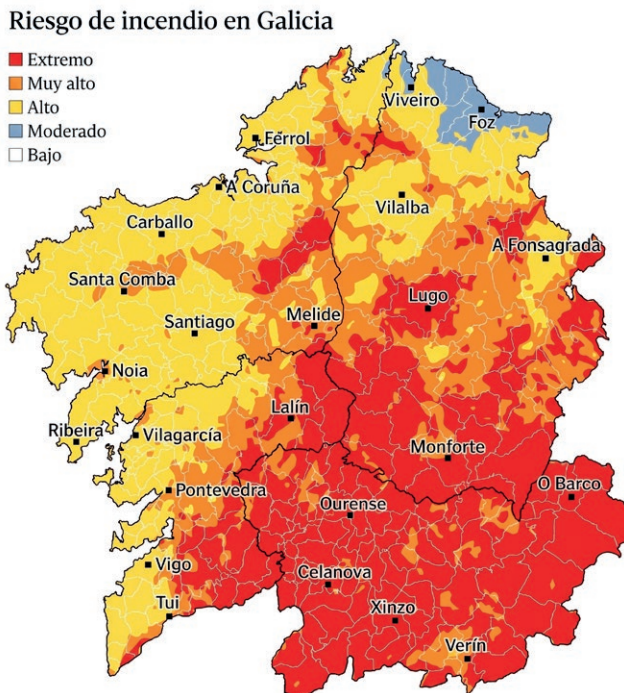


Figura 1. Comparativa da superficie forestal queimada por provincias en Galicia durante o ano 2022. Ourense concentra máis do 60 % do total

Para comprender a magnitude da catástrofe a nivel comparativo rexional, o territorio ourensán ardeu case 12 veces máis ca a provincia da Coruña, case 14 veces máis ca a de Pontevedra e máis do dobre ca a de Lugo, chegando a encabezar a preocupante clasificación de extensión danada en todo o territorio español. Esta problemática manifesta que os sistemas actuais baseados na vixilancia óptica ou detección reactiva son insuficientes, o que resulta imperativo contar con redes de sensores sobre o terreo capaces de medir variables microclimáticas antes de que o lume se propague.

Paralelamente, o sector agrícola e, de maneira preeminente, o vitivinícola conforma un motor socioeconómico fundamental para a rexión. Ourense dispuña no ano 2023, consonte os datos publicados polo Ministerio de Agricultura, Pesca e Alimentación (MAPA) e o Instituto Nacional de Estatística (INE), do 33,7 % da superficie total de viñado de Galicia [3]. Esta concentración sitúa a provincia nunha posición de liderado produtivo, pero tamén expón as denominacións de orixe locais a retos técnicos complexos. A implementación de estratexias de agricultura de precisión –como o control do momento óptimo de rega, a xestión eficiente do chan ou a medición da radiación solar para prever a aparición de enfermidades fúnxicas– require unha recollida continua de datos ambientais en tempo real.

1.2 Problemática da conectividade en contornas rurais e forestais

As zonas forestais máis vulnerables aos lumes e moitas das ladeiras dedicadas ao cultivo do viñado en Ourense atópanse situadas en profundas «sombras radioeléctricas». Esta eiva estrutural dá lugar á «cegueira de datos»: as autoridades e os xestores agrícolas carecen de información ata que o evento crítico xa se desencadeou.

Na actualidade, as únicas alternativas viables para dar conectividade a estas zonas implican o despregamento de redes terrestres complexas baseadas en repetidores de radiofrecuencia (cuxa instalación e mantemento físico nunha orografía escarpada resulta moi custosa) ou o uso de módems satelitais propietarios conectados a constelacións tradicionais de órbita xeoestacionaria (GEO). Esta última opción presenta un dobre inconveniente: as elevadas tarifas fan inviables os despregamentos masivos, e o enorme consumo enerxético que require transmitir un sinal a 36 000 km de distancia resulta incompatible con nodos sensores autónomos alimentados por baterías.

1.3 Desafíos tecnolóxicos do enlace directo ao satélite (Direct-to-Satellite IoT)

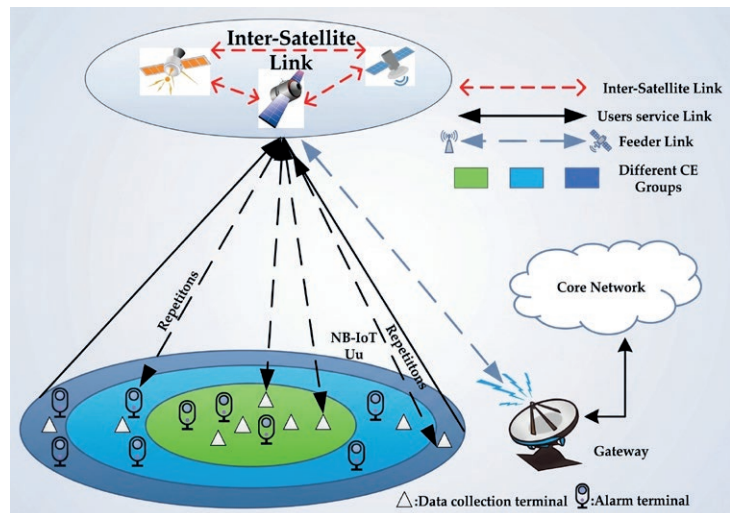
Como alternativa para romper este bloqueio tecnolóxico e económico, xurdiu con forza o paradigma do IoT satelital directo (*Direct-to-Satellite IoT*). Este enfoque avoga

polo uso de nanosatélites situados en órbita baixa terrestre (LEO), orbitando a altitudes de entre 400 e 600 km, o que permite que sensores de terra de moi baixo custo e potencia transmitan os seus datos directamente á plataforma utilizando a tecnoloxía LPWAN LoRaWAN.

Porén, a translación deste protocolo a un escenario orbital introduce desafíos de enxeñaría de extraordinaria complexidade:

1. **O desprazamento por efecto Doppler:** un satélite nunha órbita LEO viaxa a velocidades aproximadas de respecto á superficie terrestre. Este movemento relativo introduce un desprazamento de frecuencia que, para enlaces operando na banda de UHF (868 MHz), pode acadar valores máximos de ata [4]. Dado que a tecnoloxía LoRa codifica a información variando de xeito preciso a frecuencia instantánea (*chirps*), este desprazamento pode causar unha perda total da sincronización no receptor.
2. **O balance de enlace restritivo:** aínda que a distancia a un satélite LEO é inferior á dun GEO, o sinal UHF debe percorrer traxectorias de ata 2000 km no peor caso de elevación, sufrindo perdas por espazo libre (FSPL) superiores aos 150 dB [5]. O sistema debe ser deseñado con precisión para operar ao límite da sensibilidade utilizando potencias de transmisión terrestres minúsculas.
3. **A asimetría da canle e o colo de botella:** empregar a tecnoloxía LoRa tanto para a recollida de datos en terra coma para a posterior descarga xera un colo de botella crítico debido ás baixas taxas de transferencia (kbps). Un pase de visibilidade duns poucos minutos resulta insuficiente para baleirar a memoria a bordo, o que provoca o colapso do sistema.

Figura 2.
Diagrama
de enlace de
comunicacións
IoT direct-to-
satellite [6]



1.4 Motivación e xustificación da proposta Ourense InouSpace

A innovación fundamental deste proxecto reside na concepción dunha pasarela (*gateway*) satelital de arquitectura híbrida baseada nun chip SoC Zynq-7020. En lugar de optar por un deseño baseado puramente en software (SDR) ou puramente en hardware (ASIC), Ourense InouSpace combina o mellor de ambos os mundos. Utilízase un concentrador hardware de baixo consumo SX1302 para a escoita continua de múltiples canles LoRa no enlace de subida, mentres que se reserva un transceptor SDR AD9364 para o enlace de baixada en banda S, que acada taxas de transferencia elevadas para baleirar a memoria nun único pase.

Doutra banda, o proxecto resolve de maneira pioneira o problema do estrito tamaño de carga útil de LoRaWAN mediante a integración do protocolo SCHC (RFC 8724 e RFC 9011). Ao posibilitar a compresión de cabeceiras de rede estáticas directamente sobre a capa de enlace, convértese un enlace marxinal nun sistema eficiente e robusto.

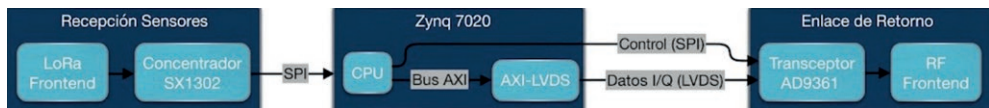


Figura 3. Arquitectura híbrida proposta para o proxecto

2. Metodoloxía

2.1 Sínteses do balance de enlace (Link Budget)

A análise avalía a viabilidade do enlace IoT satelital na banda EU868 para unha órbita LEO ($h=550\text{km}$), calculando o peor escenario posible: o bordo de cobertura cun ángulo de elevación de .

2.1.1 Parámetros do sistema e ecuacións base

Hardware e ganancias: nodo terrestre E77-900M22S ($P_{TX} = 22\text{dBm}$ dBm, $G = 3.5\text{dBi}$) e *gateway* satelital WM1302 ($P_{TX} = 26\text{dBm}$, $G = 8\text{dBi}$).

Fórmulas principais

Marxe de enlace: $M = P_{RX} - S_{RX}$ donde P_{RX} é a potencia recibida e S_{RX} é a sensibilidade do receptor.

- Potencia recibida (Friis): $P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{FSPL} - L_{MISC}$ onde P_{TX} é a potencia transmitida, G_{TX} e G_{RX} as ganancias de transmisión e recepción respectivamente, L_{FSPL} a atenuación por espazo libre e L_{MISC} outras perdas misceláneas.

Distancia inclinada (Slant Range): calculada mediante trigonometría esférica $d(\varepsilon) = \sqrt{(R_E \sin(\varepsilon))^2 + h(2R_E + h))} - R_E \sin(\varepsilon)$, onde R_E é o raio da terra, ε é o ángulo de elevación e h é a altura da órbita. Para o cénit ($\varepsilon = 90^\circ$) a distancia é de 550 km, pero para o bordo de cobertura ($\varepsilon = 10^\circ$) esténdese a ≈ 1800 km.

2.1.2 Cálculo de perdas totais (L_{TOTAL})

As perdas máximas a 1800 km compóñense de:

Perdas por espazo libre (L_{FSPL}): a 868 MHz e 1800 km, resultan en 156,3 dB (fronte aos 146,0 dB do cénit).

Perdas misceláneas (L_{MISC}): asúmese un total conservador de 6,0 dB que engloban:

- 3,0 dB por desaxuste de polarización (rotación de Faraday/*tumbling*).
- 2,0 dB por perdas de implementación (conectores, cables, filtros).
- 1,0 dB por absorción atmosférica/ionosférica.

Perda total (L_{TOTAL}): 156,3 dB + 6,0 dB = 162,3 dB

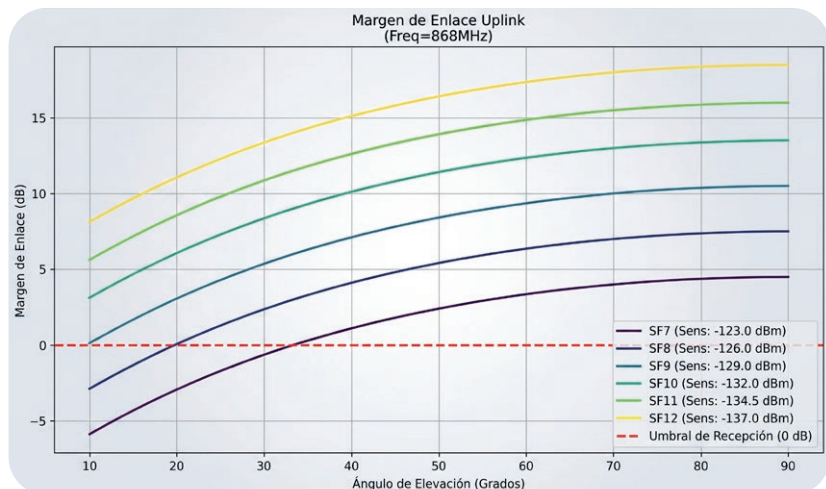
2.1.3. Viabilidade do enlace de subida (Uplink: Nodo Satélite)

Potencia recibida (P_{RXSat}): 22 dBm + 3,5 dBi + 8 dBi – 162,3 dB = -128,8 dBm.

Análise por spreading factor (SF)

- SF7 (-123,0 dBm) e SF8 (-126,0 dBm): marxes negativos (-5,8 dB e -2,8 dB). Non viables no horizonte (só viables por enriba dos de elevación).
- SF9 (-129,0 dBm): marxe de +0,2 dB (viable).
- SF10 a SF11: marxes de +3,2dB a +5,7dB (robustas).
- SF12 (-137,0 dBm): marxe de +8,2dB (moi robusta fronte ao clima ou desaliniacións).

Figura 4.
Marxe de enlace para distintos spreading factors en función de ε



2.1.4. Viabilidade do enlace de baixada (downlink: satélite nodo)

- **Potencia recibida** (P_{RXNode}): $26 \text{ dBm} + 8 \text{ dBi} + 3,5 \text{ dBi} - 162,3 \text{ dB} = -124,8 \text{ dBm}$
- **Marxe de enlace**: comparada coa sensibilidade do nodo en SF12 (-137 dBm), a marxe resultante é de +12,2 dB. Este excedente permítelle ao satélite utilizar taxas de transferencia máis rápidas (SF7 ou SF8) para enviar ACK e actualizacións, optimizando drasticamente o tempo de transmisión.

2.2. Definición das regras de contexto para SCHC

O protocolo SCHC (Static Context Header Compression) permite optimizar a transmisión de datos en redes LPWAN mediante a compresión de cabeceiras e a fragmentación de paquetes. O seu funcionamento baséase nun contexto estático compartido entre o dispositivo emisor (nodo sensor) e o receptor (*gateway* satelital), que define un conxunto de regras (rules) para a compresión e a fragmentación dos datos.

Este apartado describe o deseño das regras SCHC adaptadas ao modelo de datos do sistema. O deseño segue as especificacións do RFC 8724 [7] e o seu perfil de aplicación para LoRaWAN definido no RFC 9011 [8].

2.2.1. Modelo de datos

A diferenza dos sistemas IoT tradicionais que encapsulan datos en pilas IPv6/UDP, este proxecto utiliza un modelo de datos baseado en Protocol Buffers (Protobuf) directamente sobre a capa LoRaWAN. Esta decisión de deseño elimina a sobrecarga das cabeceiras de rede (40 bytes de IPv6 + 8 bytes de UDP), aproveitando que:

- O enlace satelital é punto a punto (nodo *gateway*), sen necesidade de enrutamento IP.
- Protobuf proporciona unha serialización binaria compacta con tipificación forte.
- O identificador do nodo obtense do DevEUI de LoRaWAN, evitando direccionamento adicional.

As mensaxes Protobuf conteñen directamente os datos dos sensores ambientais, serializados de forma eficiente sen cabeceiras de protocolo adicionais.

2.2.2. Rol de SCHC no sistema

Dado que non se utilizan cabeceiras IPv6/UDP (que son o obxectivo principal de compresión de SCHC), o protocolo emprégase neste sistema principalmente para:

1. Fragmentación fiable: as mensaxes Protobuf que excedan o MTU de LoRaWAN (~51 bytes en SF12, ata ~222 bytes en SF7) requiren un mecanismo de fragmentación con confirmación.

2. Identificación de tipo de mensaxe: a campo FPort de LoRaWAN (que codifica o RuleID segundo o RFC 9011) pode utilizarse para identificar diferentes tipos de mensaxes sen engadir bytes ao *payload*.
3. Reensamblado no *gateway*: a máquina de estados SCHC F/R xestiona a reconstrución de mensaxes fragmentadas, incluíndo o manexo de perdas e retransmisións.

2.2.3. Estrutura dunha regra SCHC

Segundo o RFC 8724, cada regra do contexto SCHC componse dunha listaxe de descritores de campo (Field Descriptors), resumidos na táboa 3:

Táboa 3: elementos dun descriptor de campo nunha regra SCHC

- FID (Field ID): identificador do campo de datos
- FL (Field Length): lonxitude do campo en bits (fixa ou variable)
- FP (Field Position): posición se o campo aparece múltiples veces
- DI (Direction Indicator): dirección: Up (uplink), Dw (downlink) ou Bi
- TV (Target Value): valor agardado para a comparación
- MO (Matching Operator): operador: *equal*, *ignore*, MSB(x), *match-mapping*
- CDA (Comp./Decomp. Action): acción: *not-sent*, *value-sent*, LSB, *compute*-*

2.2.4. Xestión do RuleID en LoRaWAN

Segundo o RFC 9011, en LoRaWAN o RuleID de 8 bits codifícase directamente no campo FPort do paquete. Os valores recomendados son:

- FPort = 1-19: regras de compresión (mensaxes sen fragmentación)
- FPort = 20: regra de fragmentación uplink (FPortUp)
- FPort = 21: regra de fragmentación downlink (FPortDown)
- FPort = 22: mensaxes que non puideron comprimirse

Este mecanismo permite identificar o tipo de procesamento requirido sen engadir bytes adicionais ao *payload*.

2.2.5. Parámetros de fragmentación

Para mensaxes que excedan o MTU de LoRaWAN, configúrase a fragmentación SCHC en modo ACK-on-Error, recomendado polo RFC 9011 para dispositivos LoRaWAN (véxase a táboa 4):

Táboa 4: parámetros de fragmentación SCHC para o enlace *uplink* satelital

- RuleID: 20 (FPort dedicado a fragmentación uplink)
- Modo F/R: ACK-on-Error (minimiza downlinks para clase A)
- FCN (bits): 6 (ata 63 fragmentos por fiestra)

- Window (W, bits): 2 (4 fiestras máximo)
- DTag (bits): 0 (un só datagrama simultáneo por nodo)
- Tile Size: 10 bytes (adaptado ao MTU mínimo en SF12)
- MAX ACK REQUESTS: 5 (reintentos antes de abortar)
- INACTIVITY TIMER: 120 s (tempo máximo entre fragmentos)

2.2.6. Sincronización do contexto

O contexto SCHC debe estar preprovisionado en ambos os extremos do enlace antes de iniciar a comunicación:

1. Nodo sensor: as regras compílanse como parte do microprograma (*firmware*) e almacénanse en memoria non volátil.
2. Porta de entrada (*gateway*) satelital: as regras cárganse dende un arquivo de configuración, permitindo a xestión de múltiples contextos identificados polo DevEUI do nodo.

Esta arquitectura permite que diferentes nodos utilicen distintas configuracións de fragmentación, adaptadas aos seus padróns de tráfico específicos.

3. Implementación do sistema

A materialización da arquitectura proposta no proxecto Ourense InouSpace estrutúrase en dous bloques de desenvolvemento paralelos e interdependentes: a enxeñaría do segmento terrestre (o extremo sensor que adquire o dato ambiental de forma continua e o comprime) e a enxeñaría do segmento espacial (o *gateway* orbital que recibe, reensambla e retransmite a información cara á estación de control).

3.1. Deseño hardware do nodo terrestre

O obxectivo crítico do segmento terrestre é dispoñer dunha plataforma de adquisición de datos ambientais de extrema autonomía, dimensións reducidas e baixo custo, capaz de ser despregada de forma masiva nos montes e viñedos ourensáns. O deseño electrónico, modelado mediante ferramentas ECAD e fabricado nun circuíto impreso (PCB) de catro capas, céntrase na mitigación do ruído electromagnético e na estrita optimización enerxética.

3.1.1. Arquitectura base do sistema (SoC LoRa)

O núcleo computacional e de radiofrecuencia do nodo terrestre baséase no módulo comercial EBYTE E77-900M22S. Este compoñente encerra no seu interior un System-on-Chip (SoC) STM32WL55, que integra un procesador de dobre núcleo (ARM

Cortex-M4 e Cortex-M0+) xunto cun transceptor sub-GHz compatible con LoRa (baseado na tecnoloxía SX1262) nun único encapsulado de silicio.

A literatura científica recente demostra que esta aproximación arquitectónica, ao eliminar a necesidade de encamiñar sinais de radiofrecuencia de alta velocidade a través de buses SPI externos na placa, mellora significativamente a inmunidade ante o ruído e reduce o consumo enerxético global do sistema nun factor crítico para redes de sensores sen fíos (WSN) [9]. O módulo configúrase para utilizar a súa etapa amplificadora de alta potencia (RFO-HP), entregando os 22 dBm (158 mW) requiridos para pechar o balance de enlace satelital. Ademais, emprega un oscilador de cristal compensado por temperatura (TCXO) para garantir a estabilidade da portadora fronte ás severas oscilacións térmicas da intemperie forestal.

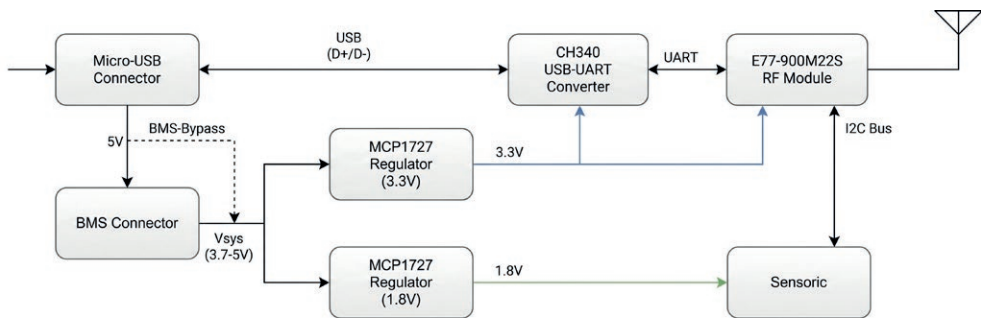


Figura 5. Diagrama de bloques do nodo terreo

3.1.2. Subsistema de sensórica ambiental e illamento de dominios

Para dotar o nodo de capacidade analítica avanzada na prevención de lumes e a xestión agronómica de precisión, integrouse un abano de sensores ambientais microelectromecánicos (MEMS) comunicados co SoC a través dun bus I2C operando a 400 kHz. Dado que o microcontrolador opera a 3,3 V pero os sensores actuais de ultrabaixo consumo acadan a súa máxima eficiencia operando a 1,8 V, implementouse un tradutor de nivel de tensión bidireccional que illa galvanicamente ambos os dominios.

A selección da matriz de sensores fundaméntase en topoloxías validadas para a detección temperá mediante a fusión de datos [10]:

- BME680: monitoriza a temperatura, a humidade relativa, a presión barométrica e a concentración de compostos orgánicos volátiles (VOC). A avaliación dos VOC permite xerar un índice capaz de detectar padróns de gasificación derivados da combustión de biomasa nas fases latentes dun incendio.
- SCD41: sensor fotoacústico miniaturizado para a medición de dióxido de

carbono. Cunha precisión de ppm, resulta vital para identificar anomalías atmosféricas por oxidación térmica e para avaliar os ciclos de respiración vexetal no caso dos viñedos.

- LPS22HH e LTR-390UV: barómetro de alta resolución con deriva térmica ultrabaixa e sensor óptico dedicado á avaliación do índice ultravioleta, respectivamente. Son variables determinantes na avaliación do risco hídrico da vide e modelos de predición de lumes.
- LIS2DW12: acelerómetro de tres eixes que, cun consumo inferior a A, permite espertar a placa base mediante interrupcións hardware ante eventos físicos anómalos.

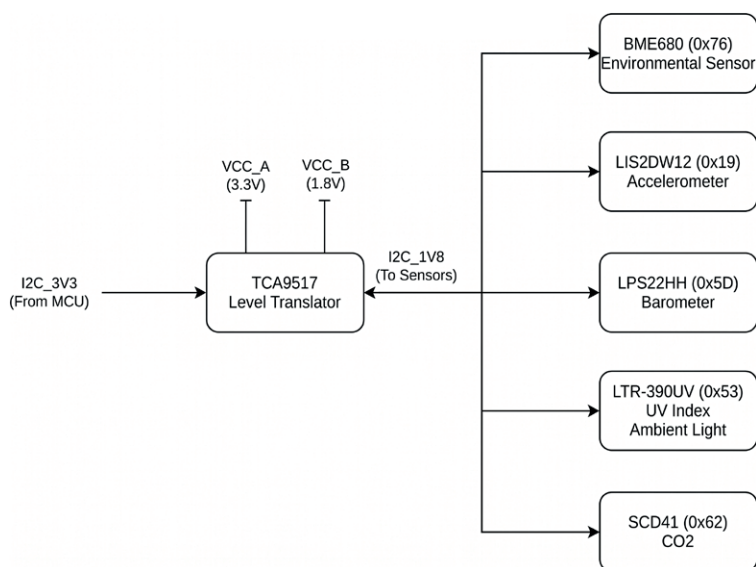


Figura 6. Diagrama de bloques da sensoraría do nodo terreo

3.1.3. Xestión enerxética (BMS)

Para acadar os requirimentos de operatividade a longo prazo en contornas rurais de difícil acceso, deseñouse un circuíto de alimentación dual baseado en reguladores de caída baixa (LDO) cunha corrente de repouso (*quiescent current*) marxinal. O deseño permite apagar completamente o dominio de 1,8 V dos sensores a través dun pin GPIO do microcontrolador mentres o nodo dorme, eliminando calquera fuga de corrente nos periféricos. A placa integra un Battery Management System (BMS) deseñado para xestionar de forma tolerante a fallos dúas celas de ión-litio de 3400 mAh, garantindo mediante multiplexación automática a dispoñibilidade de enerxía durante períodos prolongados superiores aos 14 meses de operación continua.

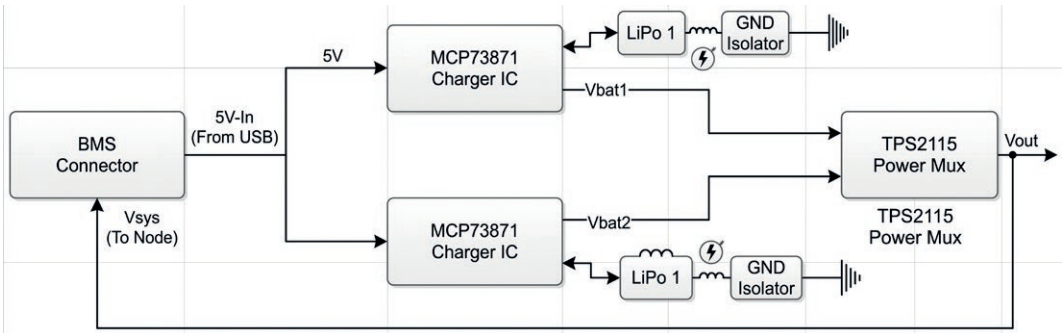


Figura 7. Diagrama de bloques do sistema de xestión de baterías (BMS)

3.2. Desenvolvemento do microprograma e procesamento de datos

A intelixencia lóxica do nodo confíase a Zephyr RTOS, un sistema operativo de tempo real de código aberto. A selección deste RTOS xustifícase polo seu soporte nativo avanzado para a xestión enerxética (*tickless idle*) e a súa capacidade probada para orquestrar pilas de protocolos LPWAN en dispositivos de recursos restrinxidos [13].

3.2.1. Dinámica de operación LoRaWAN e sincronización

No canto de adoptar a clásica operación asíncrona (clase A), o nodo terrestre configúrase para operar baixo os requirimentos da clase B de LoRaWAN. Esta modalidade obriga o dispositivo a manter unha sincronización temporal estrita con sinais de baliza (*beacons*) emitidos dende a órbita, abríndose ventás de recepción (*ping slots*) periódicas. Aínda que isto introduce un lixeiro incremento no consumo medio, a literatura corrobora que é o mecanismo máis eficiente para garantir que o satélite poida enviar comandos asíncronos de emerxencia cara á terra cunha latencia coñecida e fitada [13].

3.2.2. Motor SCHC e Serialización de Payload

O fluxo de procesamento interno está deseñado baixo un paradigma de máxima eficiencia espectral:

1. Adquisición e serialización binaria: o SoC sae do estado de letargo mediante un temporizador de baixo consumo, alimenta o bus I2C e adquire as métricas da matriz de sensores. Para evitar a sobrecarga estrutural asociada a formatos de texto (como JSON), as variables serialízanse empregando Google Protocol Buffers (Protobuf) e xeran unha porta de entrada puramente binaria e densamente empacutada.

2. Compresión baseada en contexto: a cadea de bytes resultante introdúcese no motor de compresión SCHC embebido (libschc). Baseándose na base de datos de regras estáticas cargadas na memoria flash durante a programación do dispositivo, o motor deduce as cabeceiras redundantes e comprime a trama nun paquete cuxo *overhead* consiste nun único byte identificador (RuleID).
3. Fragmentación condicional: no caso de que un pico de datos ou unha alerta cause que a trama exceda o MTU estrito de LoRaWAN no momento de visibilidade do satélite (limitado a 51 bytes con SF12), a mesma biblioteca executa un proceso de fragmentación en modo ACK-on-Error, dividindo a carga en xanelas seguras e inxectándoas secuencialmente na cola do transceptor físico.
4. Hibernación profunda (Deep Sleep): concluída a transmisión, o microprograma ordena a extinción controlada de todos os reloxs periféricos e o microcontrolador entra nun estado de detención (Stop2), limitando a drenaxe da batería a escasos microamperios ata o seguinte ciclo orbital.

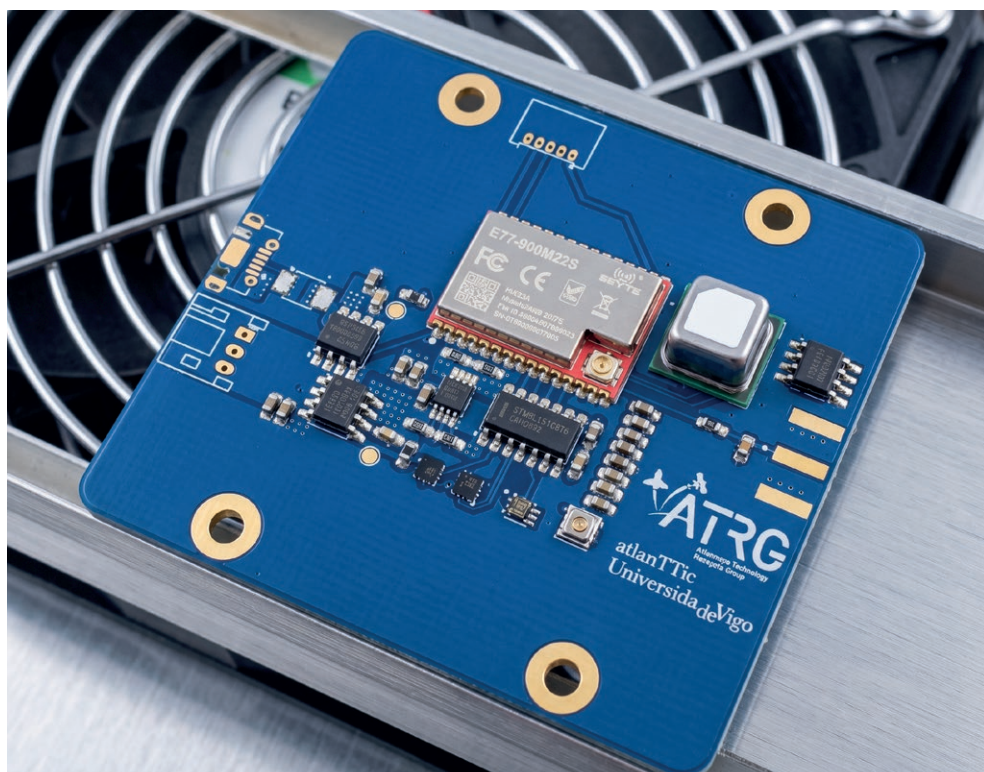


Figura 8. Prototipo final da placa de circuito impreso (PCB) do nodo terrestre tras a súa montaxe e verificación en laboratorio

3.3. Carga útil satelital e gateway híbrido (hardware e lóxica HDL)

A peza central do segmento de voo, encargada de romper os pescozos de botella tradicionais do IoT espacial, materialízase nunha carga útil satelital de arquitectura heteroxénea e asimétrica. O deseño propón unha disociación física dos enlaces: combina un procesamento baseado en hardware dedicado (ASIC) para a escoita masiva e continua dos nodos terrestres, cun transceptor de radio definida por software (SDR) de alta velocidade para a descarga da telemetría cara á estación terrea [12].

3.3.1. Arquitectura de hardware do gateway

A proba de concepto implementouse sobre un System-on-Chip (SoC) AMD Xilinx Zynq-7020. A literatura demostra que o uso de dispositivos Zynq en órbitas LEO proporciona un equilibrio óptimo entre rendemento e consumo ao integrar un sistema de procesamento (PS) baseado nun dobre núcleo ARM Cortex-A9 xunto cunha matriz de lóxica programable (PL) da familia Artix-7 [13].

Para soportar as interfaces de radio, a arquitectura expandiuse mediante dous módulos específicos:

1. Transceptor SDR de banda larga: acoplouse un módulo baseado no chip AD9364 a través do conector de alta velocidade FMC-LPC (FPGA Mezzanine Card). Os seus convertedores ADC/DAC de 12 bits e filtros dixitais configurables constitúen a base para o enlace descendente (downlink) en banda S, capaz de soportar modulacións de orde superior (QPSK, 16-QAM) e elevadas taxas de símbolo.
2. Concentrador LoRaWAN: integrouse o módulo comercial WM1302, fundamentado no procesador de banda base Semtech SX1302. Este compoñente, deseñado orixinalmente con interface mini-PCIe, require un bus SPI estándar. Para a súa integración coa placa base do Zynq, deseñouse e fabricouse en laboratorio unha placa adaptadora (interposer) de dúas capas que encamiña os sinais cara aos conectores Pmod da FPGA.

O deseño electrónico desta interface garantiu o estrito illamento dos dominios de tensión: o banco de E/S da FPGA vinculado ao transceptor SDR opera a 2,5 V baixo o estándar LVDS, mentres que as liñas de control do concentrador LoRa manteñen un nivel de 3,3 V mediante a asignación LVCMOS33.

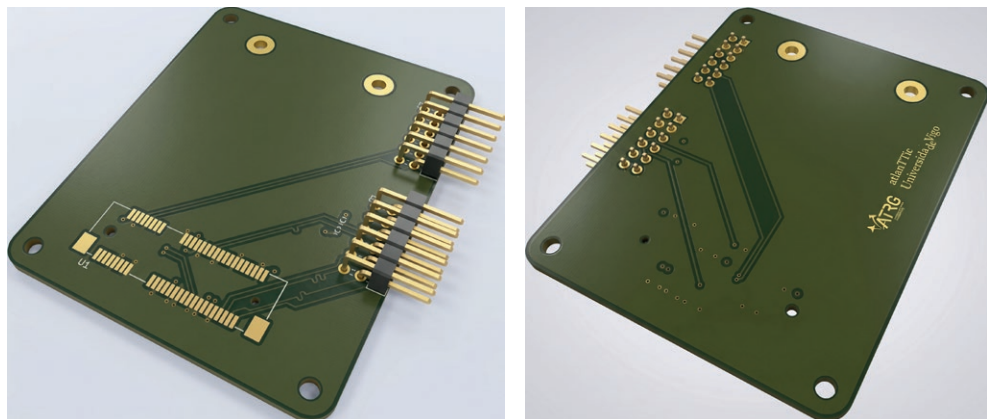


Figura 9. Placa adaptadora mini-PCIE a PMOD
(esquerda vista por enriba, dereita vista por debaixo)

3.3.2. Lóxica reconfigurable (HDL) e peche de tempos

O desenvolvemento dentro da matriz FPGA (PL) tivo como obxectivo orquestrar o fluxo asíncrono de datos de radiofrecuencia para libéralo da intervención directa da CPU. Diseñouse unha arquitectura de bloques mediante estratexias de síntese automatizadas.

A canle de datos dixital (*datapath*) divídese funcionalmente:

- Interface SDR e acceso a memoria: instanciouse un núcleo IP (Intellectual Property) de código aberto para xestionar a interface dixital LVDS do AD9364 a unha frecuencia de reloxo de 250 MHz. O desprazamento das mostras dixitais (I/Q) dende a memoria RAM do satélite cara ao conversor dixital-analóxico realizouse mediante un controlador DMA avanzado operando en modo Scatter-Gather. O uso de empaquetadores de canles por hardware permite converter o bus de sistema AXI de 64 bits en fluxos de datos aliñados, evitando interrupcións do procesador ARM durante os pases satelitais.
- Controlador SPI estendido para LoRa: o control do concentrador SX1302 solucionouse mapeando un bus SPI do dominio de procesamento (ARM) a través da interface EMIO (Extended Multiplexed I/O) da FPGA. Implementáronse decodificadores *chip-select* en hardware, o que permite á CPU xestionar o chip de banda base e o circuito auxiliar de radio ao mesmo tempo. As interrupcións asíncronas xeradas pola recepción de tramas LoRa (IRQ) dirixíronse a través dun controlador de interrupcións xeral (GIC) cara ao procesador.

A integración desta densidade de lóxica provocou inicialmente problemas de *timing closure* (violacións de tempos de retención ao cruzar dominios de reloxo de 100 MHz e 250 MHz). Este desafío metodolóxico corrixiuse forzando algoritmos de síntese de alta dispersión (Congestion Spread Logic) que redistribúen os compoñentes ao longo de toda a matriz de silicio, validando a fiabilidade a nivel rexistro [13].

3.4. Arquitectura de software embarcado e pila de rede

O segmento de software achega a autonomía necesaria para que o *gateway* execute o paradigma de computación no bordo (*Edge Computing*), almacenando e procesando telemetría no espazo en condicións de illamento (*Store and Forward*) [14].

3.4.1. Contorno Linux embebido e Yocto Project

Para garantir o determinismo, a seguridade e a replicabilidade da imaxe de software, construíuse unha distribución Linux a medida empregando Yocto Project. Desenvolveuse unha capa de compilación cruzada específica (denominada *meta-perception*), e a configuración das dependencias orquestrouse de forma declarativa para certificar o seu uso espacial.

A nivel de sistema operativo:

- Subsistema IIO: substituíuse o kernel estándar polo núcleo soportado pola industria para dispositivos conversores de sinal. Isto permitiu integrar os controladores Industrial I/O (IIO) necesarios para gobernar dinamicamente o SDR a través de parámetros exportados en sysfs.
- Illamento mediante colectores (Containers): aplicouse un parche de configuración sobre o kernel para activar o soporte nativo de Namespaces, Control Groups (cgroups v2) e OverlayFS. Esta decisión arquitectónica permítelle ao satélite executar aplicacións de rede lixeiras e encapsuladas mediante Docker, un enfoque pioneiro que gañou moita tracción nas últimas misións de CubeSats para previr fallos en ferverza no software embarcado [14].

3.4.2. Pila LoRaWAN e descompresión SCHC a bordo

O procesamento de rede iníciase cando o concentrador físico detecta enerxía no espectro e decodifica unha modulación Chirp Spread Spectrum (CSS). Para interactuar co hardware, compilouse de forma estática unha capa de abstracción de hardware (HAL) adaptada mediante modificacións no código fonte para mapear os buses internos I2C do Zynq, garantindo a calibración térmica continua do transceptor.

Unha vez a trama en bruto chega ao espazo de usuario, é inxectada na pila de microservizos orquestrada a bordo:

1. Ponte de transporte (Gateway Bridge): captura as datagramas físicas UDP orixinadas polo decodificador, tradúceas a obxectos estruturados mediante Protocol Buffers e distribúeas usando o protocolo lixeiro de mensaxaría MQTT.
2. Servidor de rede (Network Server): a aplicación ChirpStack procesa a capa MAC de LoRaWAN, valida criptograficamente os paquetes (AES-128) e calcula as fiestras de recepción descendentes (clase B) para os nodos ourensáns.
3. Motor central SCHC: desenvolveuse un cliente nativo en Python que se subscribe ao fluxo MQTT do satélite. Cando chega un *payload* fragmentado e comprimido polos sensores terrestres, este microservizo aplica a base de datos de regras estáticas (RFC 8724), reconstrúe o mapa de bits, empaqueta de novo as variables ambientais lexibles (temperatura, VOC, CO2) e as incrusta nunha base de datos temporal, listaxes para o fluxo descendente cara á estación de control.

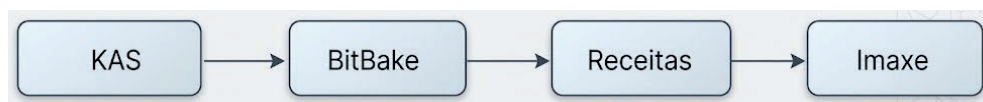


Figura 10. Cadea de compilación para a xeración da imaxe do sistema

4. Avaliación e resultados experimentais

Para validar o rendemento da arquitectura de hardware híbrida e o protocolo de compresión SCHC baixo as estritas condicións dunha órbita LEO, sen depender do lanzamento físico e inmediato dun nanosatélite, deseñouse unha rigorosa contorna de probas de laboratorio baseada no paradigma Hardware-in-the-Loop (HIL) [15]. Esta metodoloxía permite illar as variables electromagnéticas e certificar o funcionamento do sistema antes do seu futuro despregamento real na xeografía ourensá.

4.1. Deseño do banco de probas (Testbed)

O banco de ensaio configurouse conectando directamente o porto de radiofrecuencia (SMA) do nodo terrestre STM32WL55 co porto de recepción do concentrador SX1302 a bordo do Zynq-7020, utilizando cables coaxiais blindados para evitar interferencias de redes terrestres alleas.

Para emular as perdas por espazo libre (FSPL) calculadas na sección 3, inseriuse na liña de transmisión un atenuador dixital programable paso a paso (Step Attenuator). Este instrumento permitiu varrer o rango de atenuación dende os 60 dB ata os 160 dB

con pasos de 1 dB, emulando a traxectoria completa do satélite dende o cénit ata o seu ocultamento polo horizonte.

A caracterización do límite de sensibilidade require coñecer o nivel de fondo de ruído térmico do sistema receptivo. O chan de ruído analítico (P_n) calculouse a partir da lei de Nyquist-Johnson:

$$P_n(\text{dBm}) = 10\log_{10}\left(\frac{k_B T B}{1 \text{ mW}}\right) + NF$$

Onde K_B é a constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), T é a temperatura de ruído do sistema (asumida como 290K estándar), B é o ancho de banda da canle LoRa (125kHz) e NF é a figura de ruído do amplificador de baixo ruído (LNA) do módulo SX1302, tipificada en 2,5 dB. A avaliación matemática situou o chan de ruído teórico ao redor dos -120,5 dBm. Calquera sinal cuxa potencia recibida (P_{RX}) caia moi por debaixo deste limiar dependerá integramente da ganancia de procesamento do Chirp Spread Spectrum (CSS) para emerxer do ruído.

4.2. Resultados de rendemento do enlace (RSSI e SNR)

No experimento transmitíronse refachos de 1000 paquetes simulando alertas de incendios forestais (tramas comprimidas con SCHC de 18 bytes) varrendo diferentes factores de expansión (SF9 a SF12) mentres se incrementaba progresivamente a atenuación espacial.

O satélite Zynq rexistrou para cada trama decodificada con éxito dous indicadores fundamentais: o indicador de forza do sinal recibido (RSSI) e a relación sinal-ruído (SNR).

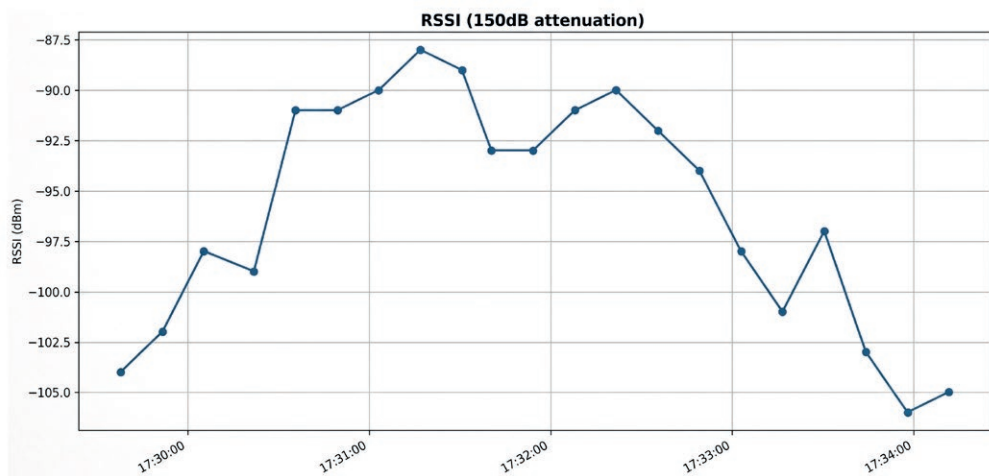


Figura 11. Evolución do RSSI experimental no gateway con 150dB de atenuación

A análise dos datos empíricos extraídos das probas HIL revelou que:

1. Límite de decodificación: o sistema foi capaz de recuperar as métricas ambientais ata unha atenuación de liña máxima de 157 dB operando no factor de expansión SF12. Neste punto crítico, o nivel de potencia rexistrado acadou os -136,5 dBm, cadrando case á perfección coa sensibilidade teórica descrita nas follas de enxeñaría de Semtech.
2. Robustez submarina (SNR negativo): a modulación demostrou a súa capacidade de traballo en contornas de interferencia severa. As últimas tramas decodificadas con éxito antes da perda total do enlace rexistraron valores de SNR de ata -20 dB, o que confirma que o hardware do Zynq é capaz de reensamblar as mensaxes aínda cando o sinal de emerxencia forestal posúe cen veces menos potencia ca o ruído térmico circundante.
3. Taxa de erro de paquete (PER): a fiabilidade do enlace mantívose óptima ($PER < 1\%$) mentres a marxe de enlace foi superior a 3 dB. Unha vez que o sinal traspasou o límite de sensibilidade en SF12, a curva do PER degradouse de forma exponencial (*cliff effect*), e acadou a perda total da comunicación, un comportamento típico das demodulacións dixitais agresivas [16].

5. Conclusións e traballo futuro

5.1. Conclusións

A vulnerabilidade xeográfica e medioambiental da provincia de Ourense ante os incendios forestais, sumada ao potencial do seu sector vitivinícola para adoptar estratexias de precisión, demanda solucións tecnolóxicas audaces para superar a ausencia endémica de cobertura celular. O proxecto Ourense InouSpace demostrou de maneira analítica, metodolóxica e empírica a absoluta viabilidade de empregar as tecnoloxías do NewSpace para resolver esta problemática a un custo asumible.

A principal achega científica deste traballo radica na superación dos dous grandes colos de botella do paradigma IoT espacial (Direct-to-Satellite). En primeiro lugar, o limitante tamaño da trama de rede mitigouse de forma pioneira mediante a integración estática de SCHC (RFC 8724), comprimindo as cabeceiras de rede e incrementando a eficiencia espectral das telemetrías nun 88 %. En segundo lugar, a proposta dunha carga útil híbrida soportada por un SoC Zynq-7020 certificouse como un éxito arquitectónico: o uso dun ASIC LoRaWAN para a escoita terrestre asegura un baixo consumo, mentres que a reserva do transceptor SDR para a descarga de datos soluciona o colapso de memoria ao permitir transferencias en banda S a alta velocidade, confirmando os modelos teóricos con probas de laboratorio de alta fidelidade.

5.2. Perspectivas e liñas futuras de investigación

Aínda que os resultados experimentais demostran a solidez da arquitectura hardware/software desenvolvida, este traballo asenta unicamente as bases do que debe ser un sistema completo de monitorización forestal. De cara ao futuro inmediato, expóñense as seguintes liñas de investigación:

1. Campañas de voo suborbital e atmosférico: o seguinte fito natural consiste en validar o balance de enlace nunha contorna dinámica real. Proponse o encapsulado do *gateway* Zynq en globos estratosféricos (operando a 30 km de altitude) e o uso de drones (UAV) sobre a área da Ribeira Sacra ou os montes ourensáns para medir de primeira man o impacto da atenuación por vexetación (Canopy Loss) baixo condicións de campo estritas.
2. Algoritmia de intelixencia artificial a bordo (Edge AI): a arquitectura Zynq e o sistema Linux desenvolvido mediante Yocto Project proporcionan unha plataforma idónea para a computación a bordo. Como traballo futuro, planifícase o desenvolvemento de aceleradores de hardware na FPGA para executar redes neuronais lixeiras (TinyML) no propio satélite, permitindo que a carga útil discrimine autonomamente os falsos positivos de incendios sen necesidade de intervención dende a estación terrea [17].
3. Misión de demostración espacial (InouSat): a longo prazo, o obxectivo definitivo debe orientarse á miniaturización da carga útil cara aos estándares PC/104 compatibles cos formatos CubeSat (1U/3U), facilitando o seu acoplamento a buses comerciais e optando a convocatorias competitivas para poñer en órbita o primeiro nanosatélite especificamente enfocado na prevención do medio natural galego.

Referencias

- [1] Fraire, J.A., Céspedes, S., Accettura, N. (2019). Direct-To-Satellite IoT - A Survey of the State of the Art and Future Research Perspectives. In: Palattella, M., Scanzio, S., Coleri Ergen, S. (eds) Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks. ADHOC-NOW 2019. Lecture Notes in Computer Science(), vol 11803. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31831-4_17
- [2] Consellería do Medio Rural, *Plan de Prevención e Defensa contra os Incendios Forestais de Galicia (Pladiga)*, Xunta de Galicia, 2022.
- [3] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), *Datos de las declaraciones de producción del sector vitivinícola*, 2023.

[4] I. González Rúa, *Desarrollo de un subsistema de comunicaciones espaciales para monitorizar la selva amazónica*, Trabajo de Fin de Máster, Universidad Internacional de La Rioja (UNIR) 2026.

[5] Coutaud, U.; Heusse, M.; Tourancheau, B. LoRa Channel Characterization for Flexible and High Reliability Adaptive Data Rate in Multiple Gateways Networks. *Computers* 2021, 10, 44. <https://doi.org/10.3390/computers10040044>

[6] Hong, T.; Yu, X.; Liu, Z.; Ding, X.; Zhang, G. Narrowband Internet of Things via Low Earth Orbit Satellite Networks: An Efficient Coverage Enhancement Mechanism Based on Stochastic Geometry Approach. *Sensors* 2024, 24, 2004. <https://doi.org/10.3390/s24062004>

[7] A. Minaburo, L. Toutain, C. Gomez, D. Barthel y J.-C. Zuniga, «SCHC: Generic Framework for Static Context Header Compression and Fragmentation», RFC Editor, RFC 8724, abr. de 2020. DOI: 10.17487/RFC8724. dirección: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8724>.

[8] O. Gimenez e I. Petrov, «Static Context Header Compression and Fragmentation (SCHC) over LoRaWAN», RFC Editor, RFC 9011, abr. de 2021. DOI: 10.17487/RFC9011. dirección: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9011>.

[9] Lie, D. Y. C., “RF-SoC”: Integration Trends of On-Chip CMOS Power Amplifier: Benefits of External PA versus Integrated PA for Portable Wireless Communications, *International Journal of Microwave Science and Technology*, 2010, 380108, 7 pages, 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/380108>

[10] T. K. M, S. S. K, J. N, V. K and J. P. W. H, “Intelligent IoT-Enabled Safety Monitoring and Hazard Prediction System for Fireworks Manufacturing,” 2026 9th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Erode, India, 2026, pp. 66-72, dirección: <https://doi.org/10.1109/ICICCS67901.2026.11502809>.

[11] G. M. Torres, J. V. L. De Souza, J. G. F. Aguiar and J. O. de Sousa, “Performance and Power Consumption of Real-Time Task Scheduling for Embedded Systems Devices,” 2025 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV, USA, 2025, pp. 1-6, dirección: <https://doi.org/10.1109/ICCE63647.2025.10929994>.

[12] C. Gavrila, M. Alexandru, V. Popescu, C. Sacchi and D. Giusto, “Satellite SDR Gateway for M2M and IoT applications,” 2019 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2019, pp. 1-9, dirección: <https://doi.org/10.1109/AERO.2019.8741705>.

[13] C. Zhang, J. Chen and D. Wang, “Development of Space-based IoT Gateway Based on ZYNQ SOC,” 2021 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP), Xi'an, China, 2021, pp. 1122-1125, doi: 10.1109/ICSP51882.2021.9408860.

- [14] Liubimov, O.; Turkin, I.; Pavlikov, V.; Volobuyeva, L. Agile Software Development Lifecycle and Containerization Technology for CubeSat Command and Data Handling Module Implementation. *Computation* 2023, 11, 182. <https://doi.org/10.3390/computation11090182>
- [15] X. Zhang et al., “Hardware-in-the-Loop Simulation System for Space Information Networks,” in *Journal of Communications and Information Networks*, vol. 2, no. 4, pp. 131-141, Dec. 2017, doi: 10.1007/s41650-017-0046-2.
- [16] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella and M. Zorzi, “Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios,” in *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60-67, October 2016, doi: 10.1109/MWC.2016.7721743.
- [17] Kumar, G., Sankar, P. Artificial Intelligence Powered Satellite Communications and Sentinel Satellite Constellations: An Overview and Future Perspectives. *SN COMPUT. SCI.* 6, 735 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42979-025-04268-8>

Xeoarqueoloxía nos Penedos da Raíña Loba

J. M. Galiña Lorenzo

*Área de Historia Medieval, Grupo H2M, Departamento de Historia, Arte e Xeografía.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo.
juan.manuel.galina@uvigo.gal*

P. M. Bello Alonso

*Área de Prehistoria, Grupo GEAAT, Departamento de Historia, Arte e Xeografía.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo.
patriciamaria.bello@uvigo.gal*

T. R. Cotos Yáñez

*Grupo SiDOR, Departamento de Estatística e Investigación Operativa.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo.
cotos@uvigo.gal*

A. Pérez González

*Grupo SiDOR, Departamento de Estatística e Investigación Operativa.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo.
anapg@uvigo.gal*

M. A. Álvarez-Vázquez

*Área de Xeografía Física. Grupo GEAAT. Departamento de Historia, Arte e Xeografía.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo.
mianalva@uvigo.gal*

Resumo

Os Penedos da Raíña Loba (Os Blancos, Ourense) constitúen un enclave granítico de altitude con evidencias de ocupación humana de cronoloxía medieval. Aínda que o topónimo non aparece explicitamente nas fontes históricas, a documentación relativa ao castelo de Aguiar da Moa suxire que este espazo puido integrarse nun sistema territorial organizado, hipótese sustentada pola converxencia de indicios documentais, toponímicos e materiais. O proxecto XeRaLo (Xeoarqueoloxía no contorno da Raíña Loba) aborda o estudo deste enclave mediante unha metodoloxía multidisciplinar que combina análise documental, prospección arqueolóxica, caracterización xeoquímica de solos e tratamento estatístico dos datos. Na fase inicial identificáronse tres sectores diferenciados segundo a súa posición topográfica e a presenza de indicios de actividade humana; recolléronse 30 mostras de solo, incluídas mostras superficiais e testemuñas estratigráficas. A análise mediante fluorescencia de raios X (XRF) permitiu identificar padróns de distribución en elementos como calcio (Ca), cobre (Cu), manganeso (Mn), fósforo (P) e cinc (Zn), interpretados como posibles sinais de acumulación antrópica. A análise estatística destacou anomalías significativas nun punto concreto, onde se rexistraron valores elevados destes elementos en profundidade, en asociación con materiais arqueolóxicos. A intervención arqueolóxica neste sector confirmou a presenza de estruturas, niveis de uso con evidencias de combustión e un conxunto relevante de materiais (cerámica, restos óseos, moedas e útiles metálicos), coherentes cun contexto de ocupación medieval. Os resultados permiten interpretar os Penedos da Raíña Loba como un espazo funcional integrado nun territorio máis amplo, aínda que estas conclusións deben considerarse provisionais e abertas a futuras investigacións.

Palabras clave: paisaxe histórica, xeoquímica de solos, medieval e prospección arqueolóxica.

1. Introducción

Na provincia de Ourense, no interior do noroeste da península ibérica, a paisaxe está marcada por vales fluviais encaixados, afloramentos graníticos e pequenas concas que articulan o territorio. No val do río Salas, un conxunto de formacións rochosas coñecidas como os Penedos da Raíña Loba destaca sobre o relevo circundante (fig. 1) e configuran un enclave singular desde o punto de vista xeomorfolóxico e paisaxístico. Estes afloramentos, situados nunha zona de transición entre áreas de cultivo, monte e

cursos fluviais, constitúen un espazo onde converxen procesos naturais e evidencias de ocupación humana. A interacción entre a dinámica do medio físico e as actividades desenvolvidas historicamente neste territorio deixou sinais que poden quedar preservados nos solos e rexistros sedimentarios, convertendo o enclave nun lugar especialmente axeitado para explorar as relacións entre sociedade e medio ambiente na paisaxe histórica da provincia.

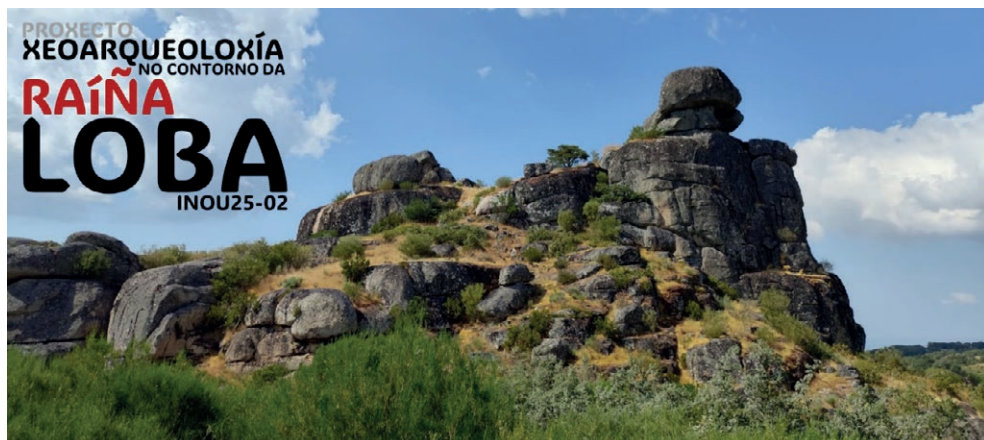


Figura 1. Penedos da Raiña Loba (Castelo Novo). Foto: M. A. Álvarez Vázquez

As paisaxes actuais son o resultado dunha longa sucesión de procesos naturais e accións humanas. Moitas destas interaccións deixan pegadas materiais que se incorporan ás compoñentes físicas do territorio; solos, sedimentos e rexistros estratigráficos, que funcionan como arquivos ambientais capaces de conservar indicios de combustión, acumulación de residuos orgánicos, manexo de animais ou outros usos recorrentes dun lugar. A súa análise ofrece unha vía privilexiada para reconstruír procesos de ocupación, modificación do medio e explotación de recursos, e comprender como se configuraron historicamente moitos espazos habitados. Numerosas investigacións teñen salientado o potencial destes arquivos para detectar e interpretar sinais de actividade humana. Mudanzas na composición sedimentaria ou na concentración de certos elementos químicos poden reflectir ocupación e uso continuado (p. ex., a acumulación de materia orgánica ou a presenza de fogares). Unha vez analizados no seu contexto estratigráfico, estes indicadores convértese en ferramentas útiles para identificar áreas de actividade e reconstruír (aínda que de maneira indirecta) as formas de interacción entre as comunidades humanas e o seu contorno.

Esta perspectiva insírese nunha liña de investigación máis ampla orientada ao estudo das interaccións natureza-sociedade a partir dos rexistros estratigráficos e sedimentarios.

Desenvolvida recentemente a través do proxecto SEReSS: Interaccións sociedade-medio ambiente en rexistros estratigráficos e sedimentarios (ED481D 2023/006), propón integrar xeografía ambiental, historia ambiental e xeoarqueoloxía para interpretar as pegadas que a actividade humana deixa nos arquivos naturais da paisaxe. Dende esta óptica, os sedimentos e os solos non se consideran unicamente produtos de procesos naturais, senón tamén soportes onde quedan rexistradas transformacións asociadas ás prácticas sociais, económicas e culturais.

O proxecto XeRaLo (Xeoarqueoloxía no contorno da Raíña Loba, INOU2025-02) inscribese neste marco e examina en que medida a análise da composición de solos e sedimentos pode contribuír á identificación de sinais de actividade humana e á interpretación das transformacións ambientais vinculadas á ocupación histórica das paisaxes. Para tratar esta cuestión seleccionouse o enclave dos Penedos da Raíña Loba, onde conflúen varios factores de interese: un substrato granítico que condiciona a formación dos solos, a existencia de pequenas áreas sedimentarias entre bloques e a presenza de indicios arqueolóxicos que apuntan a episodios de ocupación no pasado. A combinación destes elementos ofrece un escenario axeitado para explorar como os procesos naturais e as actividades humanas puideron deixar sinais detectables nos rexistros sedimentarios conservados no xacemento.

A investigación desenvolvida no marco do proxecto XeRaLo baséase nunha aproximación exploratoria que combina traballo de campo, análise estratigráfica e técnicas de caracterización composicional aplicadas aos solos. Complementariamente, incluíuse unha fase previa de documentación que integrou a revisión das fontes sobre a ocupación histórica do territorio, a análise das características físicas do enclave (con especial atención á súa xeomorfoloxía) e a consideración da tradición oral vinculada á Raíña Loba, co obxectivo de contextualizar o estudo e orientar as decisións de prospección. A recollida dirixida de mostras en diferentes sectores do xacemento, xunto coa documentación dos perfís sedimentarios e a análise elemental por fluorescencia de raios X (XRF), permitiu obter unha primeira imaxe da variabilidade na composición dos solos. Esta estratexia metodolóxica concibiuse tamén para orientar a prospección arqueolóxica, explorando ata que punto a distribución espacial de determinados indicadores pode contribuír á identificación de áreas potencialmente asociadas a actividades humanas. A integración desta información coa evidencia arqueolóxica dispoñible e coa análise espacial do lugar constitúe un punto de partida para avaliar a existencia de padróns de uso histórico do espazo.

2. Contexto do enclave

Os Penedos da Raíña Loba érguense nun promontorio granítico de media montaña que domina a depresión da Limia e o val do río Salas, cun relevo de bolos e bloques superpostos que alterna afloramentos e pequenas concas de depósito. A documentación medieval relativa ao castelo de Aguiar da Moa e ao territorio a el asociado apunta a funcións de vixilancia e control sobre os pasos naturais; ao mesmo tempo, a tradición oral da Raíña Loba dota o lugar dunha forte carga simbólica que perdura na memoria local. A combinación de condicionantes morfolóxicos, pegada histórica e relato popular ofrece o marco idóneo para ler con sentido as evidencias sedimentarias e arqueolóxicas do enclave.

2.1 Localización e contexto xeográfico

Os Penedos da Raíña Loba sitúanse no sector meridional da serra de Gomariz, ao sur da comarca da Limia (Ourense), próximos á fronteira con Portugal e no territorio da aldea de Covas (concello dos Blancos), en contacto coa marxe administrativa do concello de Baltar. O conxunto dos Penedos intégrase paisaxisticamente na continuidade cos montes do Cebreiro, formando parte dun sistema de relevos graníticos que se elevan de maneira destacada sobre a chaira da Limia e o val do Salas. A súa posición corresponde a un cordal de media montaña que supera os 1100 m s. n. m., no que salientan fitos como o Penedo da Raíña Loba (1164 m s. n. m.) e outras elevacións próximas que configuran un espazo topograficamente complexo. Desde o punto de vista espacial, o enclave ocupa unha posición de contacto entre unidades xeográficas ben contrastadas. Cara ao norte esténdese a depresión da Limia, ampla chaira de vocación agraria (antigamente en boa parte ocupada pola lagoa de Antela); cara ao sur, o relevo descende progresivamente cara ao val do Salas, hoxe parcialmente ocupado por un encoro; cara ao leste, o territorio conecta co sector oriental do val e coa serra do Larouco; mentres que cara ao oeste continúa o sistema montañoso dos montes do Cebreiro. Esta disposición reforza o seu carácter de punto elevado con ampla proxección territorial.

Na bibliografía e noutras fontes é frecuente atopar múltiples denominacións para a mesma área, o que pode xerar ambigüidades. Neste traballo adoptamos un criterio de uso consistente: serra da Raíña Loba designa o cordal ou pequena serra onde se insire o sitio, no extremo meridional da serra de Gomariz e en continuidade cos montes do Cebreiro; Penedos da Raíña Loba (en plural) refírese ao conxunto de afloramentos e pequenas elevacións ao longo do cordal (fig. 2-A e 3-A), incluíndo, entre outros, o Castelo Novo ou Castelo da Raíña Loba (1149 m s. n. m.), o *Cementerio* (1127 m s. n. m.), o Outeiro da Fraga (1125 m s. n. m., fig. 3-B) e o Castelo Vello (1058 m s. n. m.); Castelo da Raíña Loba (Castelo Novo) identifica un subconxunto caracterizado por ser o promontorio máis destacado no conxunto (fig. 2-B) e por unha maior densidade de evidencias

arqueolóxicas (modificacións da rocha, materiais etc.); e Penedo da Raíña Loba (en singular) denomina o cume ou afloramento máis elevado (fig. 2-C e 3-A) do conxunto (1164 m s. n. m.). Como criterio xeral, neste traballo empregárase «Penedos da Raíña Loba» para referirse ao conxunto da área, reservando as demais denominacións para elementos concretos cando cómpre precisalos. Este convenio terminolóxico aplicárase de maneira sistemática para evitar confusións e facilitar a lectura.

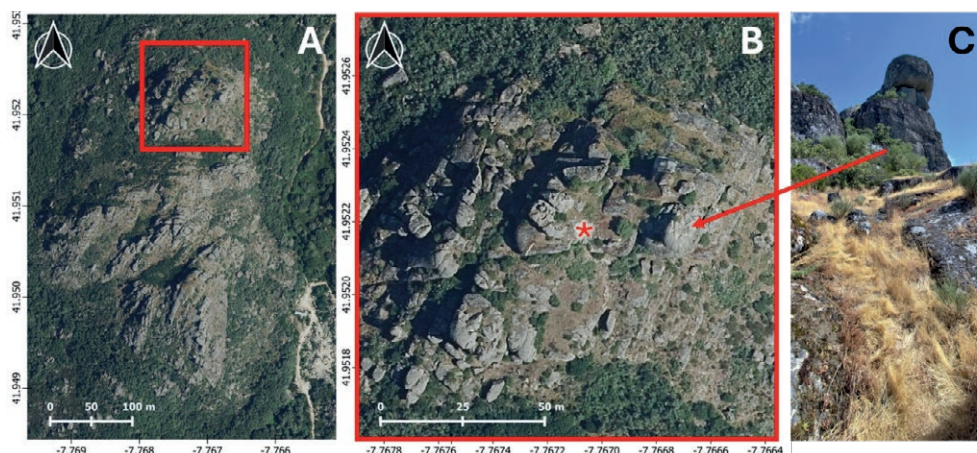


Figura 2. A: vista aérea do complexo da serra da Raíña Loba, B: detalle da zona dos Penedos da Raíña Loba (Castelo Novo), C: Penedo da Raíña Loba, fotografía do punto máis alto do complexo (o asterisco marca o punto dende o que foi tirada a foto). Vistas aéreas: PNOA máxima actualidade - ©IGN.

Figura elaborada con QGIS. Foto: M. A. Álvarez Vázquez

O termo «penedo», dende unha perspectiva xeomorfolóxica, refírese a mesoformas do relevo (escala métrica) típicas de medios graníticos, con perfís convexos xerados pola interacción prolongada entre a meteorización, a erosión e a estrutura interna do macizo (rede de fendas e fracturas). Estes condicionantes favorecen formas características da modelaxe granítica (bolos,¹ tors,² penas cabaleiras³ ou rochas acasteladas⁴) que compoñen

¹ **Bolos:** bloques graníticos de morfoloxía arredondada ou subesférica, formados pola interacción da estrutura e da meteorización das rochas ao longo das súas fracturas e a progresiva descomposición das arestas.

² **Tors:** conxuntos de bloques graníticos residuais formados pola meteorización e erosión diferencial ao longo das fracturas, quedando expostos bloques máis resistentes.

³ **Penas cabaleiras:** bloques graníticos situados en posición elevada sobre outros bloques, con aparente equilibrio inestable, resultado da evolución da modelaxe granítica que deixa en resalte volumes individualizados.

⁴ **Rochas acasteladas:** formas graníticas resultantes da fracturación intensa do macizo rochoso e da súa alteración e erosión diferencial, nas que a disposición dos bloques remanentes xera estruturas irregulares e graduadas que lembran construcións fortificadas ou elementos arquitectónicos de carácter defensivo.

un conxunto diverso e complexo do relevo. A singularidade de cada penedo é o resultado dunha evolución de longa duración na que interveñen factores litolóxicos e ambientais. No contexto dos Penedos da Raíña Loba, estas formas acadan especial relevancia. Trátase dunha paisaxe dominada por granitos e caracterizado por un relevo de media montaña, con altitudes que superan os 1100 m s. n. m. Os Penedos non son elementos illados, senón que integran un sistema de formas resultado da alteración diferencial do substrato e da exhumación progresiva de bloques.

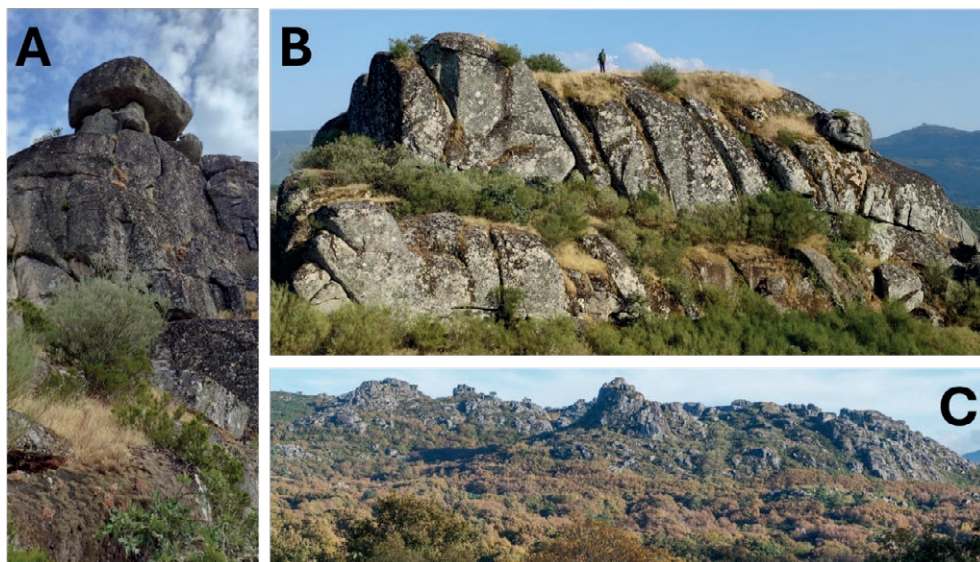


Figura 3. Paisaxe granítica da serra da Raíña Loba. A: Penedo da Raíña Loba, B: outeiro da Fraga (investigador incluído a modo de escala), C: vista xeral da serra dende o suroeste (Penedo da Raíña Loba no promontorio central). Fotos: M. A. Álvarez Vázquez

Os penedos posúen un valor destacado no ámbito da xeodiversidade (a variedade de formas, procesos e materiais do medio físico; [1]). Non só funcionan como testemuñas de procesos e condicións ambientais pasadas, senón que incorporan valores estéticos, históricos, culturais e socioeconómicos, converténdose en elementos singulares do patrimonio territorial [2, 3]. Investigacións recentes destacaron a dimensión cultural das formas do relevo, entendéndooas como soportes de significados e prácticas sociais [4, 5] e destacando o seu papel na construción da memoria colectiva [6, 7]. Por estes motivos, a consideración patrimonial require integrar valores científicos e culturais e atender ás prácticas de uso, xestión e valorización [8, 9].

No caso dos Penedos da Raíña Loba, esta confluencia é particularmente visible. O enclave sitúase nun punto elevado que domina o contorno, con condicións favorables para ocupacións humanas e control do territorio. Os indicios materiais (modificacións

na rocha, un alxibe, materiais cerámicos, muíños de man e un posible taboleiro de xogo; [10]) suxiren a reutilización e a adaptación destas formas en dinámicas sociais concretas. A tradición oral da Raíña Loba engade espesor simbólico, contribuíndo a integrar estas formas na paisaxe cultural. Os penedos deixan de ser simples elementos naturais para converterse en nodos de interacción entre procesos xeomorfolóxicos e dinámicas sociais, onde se materializa a relación histórica entre as comunidades e o seu contorno.

2.2 Ocupación histórica

A aproximación á ocupación histórica dos Penedos da Raíña Loba debe partir da información dispoñible sobre o castelo de Aguiar da Moa, co que se identifica a nivel territorial e funcional. Aínda que o enclave non aparece mencionado de forma explícita nas fontes medievais baixo a denominación actual, a converxencia de distintos indicios permite propoñer que este conxunto poida corresponder á localización (ou formar parte dos espazos vinculados) da fortaleza documentada como Aguiar da Moa. Por unha banda, a evidencia toponímica, coa presenza de denominacións como Castelo Novo e Castelo Vello, apunta á existencia dun sistema fortificado no lugar; por outra, as referencias documentais relativas a Aguiar da Moa sitúan esta fortaleza nun ámbito territorial plenamente compatible coa localización do enclave. Deste modo, os Penedos da Raíña Loba poden interpretarse como parte dun sistema máis amplo de control e organización do espazo, no que o castelo actuaría como elemento central.

Desde a súa primeira mención no ano 1146, no contexto dunha doazón ao mosteiro de Celanova, o castelo de Aguiar da Moa aparece xa configurado como un referente espacial consolidado, empregado para delimitar propiedades «inter castellum sancti Iohannis de Olariis et inter castellum Aquilar»⁵ [11, 12]. Ao longo da segunda metade do século XII, a documentación reforza esta idea ao situar herdades e propiedades en relación directa co castelo, como no documento de 1180 que menciona terras localizadas «subtus castellum»⁶ de Aguiar da Moa» [13]. Este tipo de formulacións amosan o papel do castelo como referente espacial e territorial, ao tempo que apuntan á existencia dun ámbito próximo vinculado ao seu contorno, no que se integrarían distintos espazos de explotación e ocupación.

A finais do século XII e comezos do XIII, Aguiar da Moa adquire unha dimensión política máis ampla ao integrarse nas dinámicas entre os reinos de León e Castela. A súa inclusión nas arras do matrimonio entre Afonso IX e Berenguela en 1198, formando parte dun conxunto de castelos de reguengo, manifesta o seu valor estratéxico dentro

⁵ Entre o castelo de San Xoán de Oleiros e o castelo de Aguiar.

⁶ Ao pé do castelo.

do sistema defensivo e administrativo da rexión [14, 15, 16]. Este tipo de operacións evidencia o valor político e estratéxico do castelo e a súa integración nun sistema máis amplo de organización territorial, no que se debe considerar o ámbito dos Penedos da Raíña Loba como posible localización da fortaleza documentada como Aguiar da Moa. A inestabilidade derivada da anulación do matrimonio e a posterior reorganización das relacións entre as coroas cristaliza no tratado de Paz de Cabreris de 1206 [17, 18], no que se formaliza a devolución dos castelos entregados en arras, entre eles Aguiar da Moa [18]. A participación da fortaleza nestes procesos diplomáticos reforza a súa condición como elemento relevante nas dinámicas políticas e territoriais da rexión, utilizado como instrumento de negociación e garantía nos acordos políticos.

Durante o século XIII, a documentación segue reflectindo o papel do castelo nas estratexias patrimoniais da monarquía. A súa exclusión da doazón realizada en 1217 por Afonso IX a favor das súas fillas Sancha e Dulce, no contexto das obrigas económicas derivadas do seu primeiro matrimonio con Teresa de Portugal, evidencia a súa consideración como un ben de especial relevancia, cuxo control directo se mantén no ámbito rexio [15, 19]. Este feito reforza a idea de que Aguiar da Moa constituía un punto estratéxico dentro da rede de fortalezas vinculadas ao exercicio do poder territorial. Xa a finais do século, no contexto das relacións entre Castela e Portugal, o castelo volve aparecer integrado en acordos políticos e matrimoniais, como o tratado de Ciudad Rodrigo de 1291, no que se inclúe a entrega temporal de diversas fortalezas, entre elas Aguiar da Moa [19, 20]. Este tipo de operacións manifesta a continuidade do seu valor estratéxico e a súa inserción nun espazo político sometido a procesos recorrentes de negociación e reorganización territorial. A morte de Sancho IV en 1295 e a proclamación do seu fillo Fernando IV, aínda menor de idade, non alteraron substancialmente a dinámica política da fronteira, que continuou marcada pola necesidade de consolidar os acordos entre Castela e Portugal. Neste contexto, o Tratado de Alcañices de 1297 ratificou o enlace entre Fernando IV e Constanza de Portugal, formalizado finalmente tras alcanzar o monarca a maioría de idade en 1301 [21].

A comezos do século XIV, a inclusión do castelo na permuta de bens realizada en 1308 entre Fernando IV e Marina Páez, que abrangue non só a fortaleza senón tamén a terra de Aguiar da Moa e o Val de Salas [22, 23], evidencia de maneira explícita a existencia dun territorio asociado. Esta referencia resulta especialmente significativa ao confirmar documentalmente a articulación dun espazo máis amplo no que o castelo actúa como centro de control e xestión. A través destes procesos de cesión, confirmación e transmisión, o control do enclave acabaría por quedar ligado á liñaxe dos condes de Monterrei ao longo da Baixa Idade Media, integrándose nas redes de poder señorial características deste período.

A información procedente do memorial do preito polo morgado dos Biedma, xa na época moderna, permite reconstruír con maior detalle esta realidade territorial. No século XVI, a fortaleza de Aguiar da Moa formou parte do morgado establecido por Francisca de Zúñiga a favor da súa filla Teresa ([22], libro, 2/41039, fols. 9v-10v;), circunstancia que explica a súa presenza nos preitos entre os condes de Lemos e Monterrei ao longo do século XVI e parte do XVII polos dereitos de posesión dos bens da casa de Biedma. Estas disputas xeraron unha serie de interrogatorios que achegan información de interese sobre aspectos concretos da súa xurisdición, as rendas satisfeitas polos veciños e mesmo a memoria do seu abandono. Neste sentido, algunhas testemuñas recollidas sitúan o derrubamento do castelo en tempos do primeiro conde de Monterrei, Sancho de Ulloa, por mandato dos Reis Católicos ([22], libro 2/41039, fols. 40r-40v/345r-345v.), incorporando así unha dimensión retrospectiva que contribúe a completar a evolución histórica da fortaleza máis alá do período medieval.

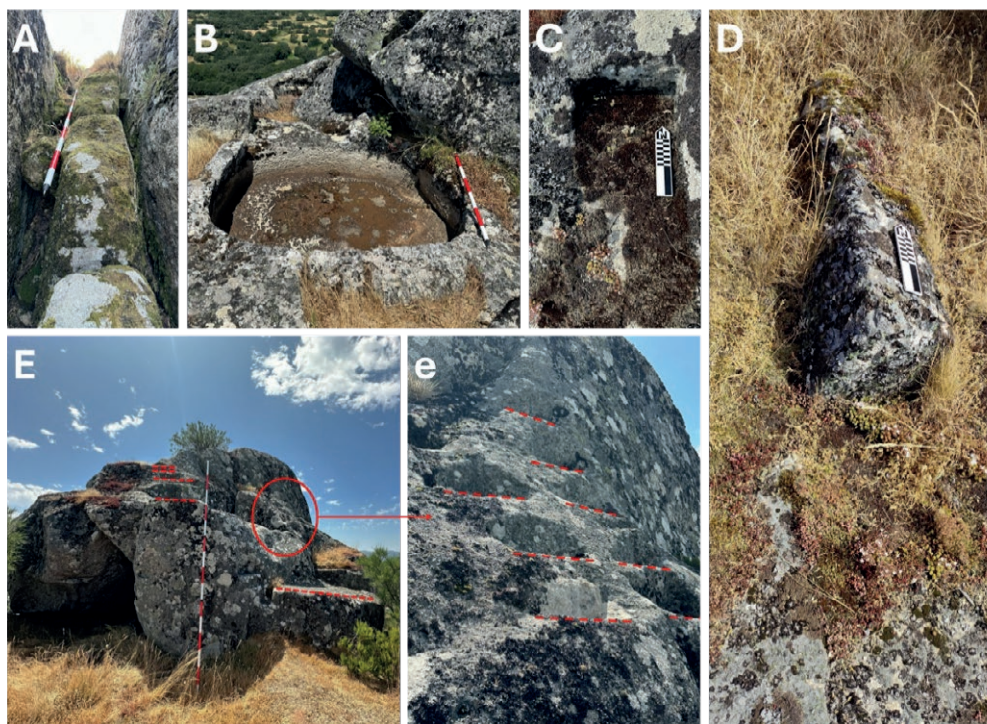


Figura 4. Evidencias da ocupación humana nas rochas da zona dos Penedos da Raiña Loba (Castelo Novo). A: chanzos labrado na rocha, B: alxibe, C: encaixe, D: perpiaño, E: plataformas e chanzos (F).

Fotos: J. M. Galiña Lorenzo e M. A. Álvarez Vázquez

A identificación dos Penedos da Raíña Loba co castelo de Aguiar da Moa debe ser entendida como unha hipótese de traballo fundamentada na converxencia de distintos tipos de evidencias, e non como unha equivalencia demostrada de maneira definitiva. A ausencia de referencias explícitas nas fontes medievais que permitan situar con precisión a fortaleza contrasta coa existencia dunha toponimia local significativa (na que se conservan denominacións como Castelo Novo e Castelo Vello), así como cun conxunto de indicios materiais e espaciais coherentes coa presenza dun enclave fortificado de cronoloxía medieval (fig. 4). A isto engádese a información procedente das fontes documentais, que describen un sistema territorial articulado arredor do castelo de Aguiar da Moa, cuxa localización exacta non foi ata o momento determinada con seguridade. Neste contexto, a proposta de situar este castelo no complexo granítico dos Penedos da Raíña Loba constitúe unha interpretación razoada e verosímil, que deberá ser contrastada e afinada mediante o desenvolvemento de futuras investigacións arqueolóxicas e documentais.

2.3 Paisaxe e lenda

No ano 1929, nun discurso centrado na figura do lobishome (principalmente no caso de Manuel Blanco Romasanta), Vicente Risco [24] recolle en Loureses (Os Blancos) unha tradición oral sobre unha nena de Castela que gustaba moito de comer carne e que recibe a maldición do pai: «Inda vaías comer carne cos lobos ó monte». A partir dese momento anda polos montes e amosa poder sobre as bestas: «andivo moito tempo de capitana dos lobos, (...) unhas veces andaba de lobo e outras de muller». O relato sitúase claramente no ámbito do mítico, onde a transformación animal funciona ao tempo como castigo e como expresión dunha ruptura coa orde social. Cando toma a forma de lobo, causa estragos e dana as persoas, episodio que Vicente Risco recolle en primeira persoa: «e fixen moitos estragos e por ningún tiven tanta pena como por un rapaz que comín»; mentres que cando aparece como muller é benévola e aglutina os lobos «darredor d'ela, e non lles deixaba faguer mal ningún a ninguén»; configurando unha figura ambivalente, ao tempo destrutiva e protectora. Finalmente a muller desfai a maldición e regresa á casa, deixando paz na zona dos Blancos, «e agora que s'estaban moi a gusto dende que ela faltara», o que pecha o ciclo narrativo coa restauración da orde. Para Risco, trátase dunha lenda completa, que reúne os motivos esenciais do lobishome.

Outros relatos, como o de Florentino López Cuevillas en 1956 [25], abandonan o plano sobrenatural e falan dunha persoa real, designada como «raíña» por gobernar aquelas terras e cobrar tributo, descrita como fermosa mais de carácter despótico. Aquí, a «loba» pode entenderse como metáfora da rapacidade, trasladando o foco ao conflito social e ás relacións económicas. Os tributos serían tan onerosos que uns veciños acaban coa súa vida tirándoa desde a altura da fortaleza: «un día en que varios de ellos

fueron al castillo (...), dos hombres (...) se lanzaron sobre la tiránica mujer y desde lo alto la lanzaron al fondo de la cortadura de la peña, muriendo, como es natural, del terrible golpe». O escenario físico é parte da trama: «sabemos que hay allí unos grandes peñascales que descienden cortados casi a pico», o que ancora o relato na morfoloxía dos Penedos da Raíña Loba e reforza a súa lectura paisaxística. Nas múltiples variantes desta liña, repítese o núcleo dunha gobernante tirana deposta polo pobo, cun desenlace de emancipación colectiva: «Y con esta hazaña quedaron los pueblos sujetos a la Reina Loba libres del pago de toda clase de impuestos y celebrando tal liberación (...)».

A pesar das diferenzas de formulación, ambas as tradicións comparten un mesmo substrato. Unha estrutura narrativa que pasa pola alteración da orde e a súa restauración, ben por superación dunha maldición (versión mítica), ben por acción directa da comunidade (versión histórico-social). Máis que opoñer mítico e histórico, podemos falar de dúas capas dun mesmo motivo narrativo. A presenza recorrente de figuras femininas de poder asociadas a espazos agrestes, castros ou penedos suxire un tema máis amplo do imaxinario popular. Tamén cabe a hipótese dun proceso evolutivo: unha posible figura histórica (muller de poder ligada ao control do territorio) sería reelaborada pola tradición ata adquirir trazos míticos, incorporando motivos do lobishome e converténdose nun ser híbrido entre muller e animal. En todo caso, o valor destas lendas para este estudo non reside en verificar a súa literalidade, senón en entender como codifican percepcións colectivas sobre o poder, a xustiza e o territorio, ofrecendo claves culturais para ler a paisaxe dos Penedos da Raíña Loba e para relacionar morfoloxía (fig. 5), memoria e usos históricos do espazo.



Figura 5. Pareidolia forzada que representa os penedos como unha loba deitada observando a paisaxe. Superposición de debuxo sobre fotografía real realizada con Google Gemini (empregando o modelo Nano Banana). Foto: M. A. Álvarez Vázquez

3. As evidencias materiais

Esta sección reúne os resultados do proxecto XeRaLo, preséntase como un percorrido encadeado que comeza co marco conceptual, onde se formulan as preguntas de investigación e se definen os criterios e indicadores que orientan o resto do traballo. A prospección inicial permite recoñecer ámbitos e rexistrar indicios sobre o terreo; a análise da composición dos solos e sedimentos ofrece unha lectura comparativa que prioriza zonas de interese; e a intervención arqueolóxica permite contrastar as hipóteses nun contexto estratigráfico controlado. O desenvolvemento segue esta orde (marco conceptual, prospección, análise de solos e escavación) e subliña a relación entre fases; cada paso informa o seguinte ata compoñer unha lectura integrada do xacemento.

3.1 Marco teórico

O estudo das interaccións históricas entre as sociedades humanas e o medio ambiente sitúase nun espazo de converxencia entre a arqueoloxía e as ciencias da Terra. A ocupación humana dun lugar non só implica a súa transformación inmediata, senón que deixa unha pegada que pode quedar incorporada aos rexistros sedimentarios e estratigráficos xerados ao longo do tempo. A acumulación gradual de materiais derivada de procesos xeodinámicos pode conservar sinais asociados á presenza e á actividade humana, convertendo estes rexistros nunha fonte relevante de información para reconstruír as dinámicas socioambientais do pasado.

A xeoarqueoloxía constitúe unha subdisciplina da arqueoloxía que emprega técnicas, métodos e conceptos procedentes das ciencias da Terra para tratar cuestións relacionadas coa ocupación humana e coa formación dos rexistros arqueolóxicos [26]. Máis ca unha simple aplicación de ferramentas analíticas, a súa práctica implica a integración de coñecementos de diferentes campos (xeoloxía, xeografía, sedimentoloxía, pedoloxía, estratigrafía ou xeomorfoloxía). Esta aproximación interdisciplinar permite comprender con máis amplitude os procesos naturais e antrópicos que interveñen na formación e transformación dos depósitos sedimentarios asociados aos xacementos arqueolóxicos.

Entre as ferramentas empregadas neste tipo de investigación, a análise de variables xeoquímicas ocupa un lugar destacado, ao permitir identificar sinais que, doutro xeito, resultarían difíciles de detectar. Determinados elementos, minerais ou compostos orgánicos poden actuar como indicadores da presenza ou da actividade humana cando aparecen en contidos ou distribucións particulares dentro dun rexistro estratigráfico [27]. O estudo da variabilidade na composición de solos e sedimentos pode ofrecer información relevante sobre procesos como a combustión, a acumulación de residuos orgánicos, o manexo de animais, as actividades domésticas, o manexo de metais ou outras formas de uso do espazo.

A utilidade destas aproximacións queda reflectida en numerosos estudos desenvolvidos en contextos arqueolóxicos diversos, que ilustran a súa capacidade para reconstruír procesos humanos a partir de evidencias materiais indirectas. A análise xeoquímica permitiu, por exemplo, identificar restos de fogueiras atribuídas a neandertais en Xibraltar [28], detectar evidencias de contaminación asociadas a actividades humanas no Antigo Exipto [29] ou documentar sinais relacionados coa minaría romana na península ibérica [30]. No ámbito galego, a análise de depósitos sedimentarios contribuíu á descrición de procesos históricos e ambientais de diversa natureza, como o posible impacto da peste negra sobre dinámicas de poboación no século XIII [31] ou as transformacións recentes da paisaxe en sistemas costeiros como a ría de Cedeira e a ría de Arousa [32, 33].

Estas liñas de traballo permiten entender os rexistros sedimentarios non só como depósitos materiais, senón como arquivos nos que quedan inscritas as interaccións entre as sociedades humanas e o medio ao longo do tempo. A historia das sociedades pode lerse tamén nos sedimentos, a través das pegadas que as actividades humanas deixan na súa composición e estrutura, en coherencia co enfoque adoptado para o estudo dos Penedos da Raíña Loba.

3.2 Prospección inicial

En coherencia cos obxectivos xerais do proxecto, orientados á identificación e á análise da pegada humana no rexistro estratigráfico dos Penedos da Raíña Loba, desenvolveuse unha primeira fase de prospección de carácter exploratorio. Esta fase concibiuse como unha aproximación inicial ao comportamento espacial dos depósitos sedimentarios no conxunto da área de estudo, sen a pretensión de obter resultados concluíntes, senón a de establecer unha base de traballo que permitise avaliar a variabilidade interna do enclave e identificar ámbitos con distinto grao de influencia antrópica. Buscouse definir un marco comparativo no que puidesen distinguirse sinais potencialmente vinculadas á ocupación humana fronte a outras derivadas de procesos naturais, integrando desde o inicio a dimensión xeomorfolóxica e a presenza de evidencias materiais visibles en superficie (fig. 6).

A delimitación das áreas de estudo realizouse a partir dunha lectura integrada do relevo, da distribución dos afloramentos graníticos e dos indicios arqueolóxicos recoñecibles durante o traballo de campo. Esta aproximación permitiu identificar diversos ámbitos de interese dentro do conxunto. Nesta fase inicial optouse por concentrar a análise en tres sectores diferenciados, considerados representativos da súa variabilidade espacial (fig. 7). A selección destes sectores respondeu á combinación de criterios topográficos, ás características dos solos e, especialmente, á intensidade e á natureza das evidencias de ocupación humana observadas.



Figura 6. Exemplos de indicios de ocupación humana atopados durante a primeira prospección do xacemento dos Penedos da Raiña Loba. A: muro, B: ósos, C: encaixe, D: fragmentos de cerámica. Fotos: J. M. Galiña Lorenzo e M. A. Álvarez Vázquez

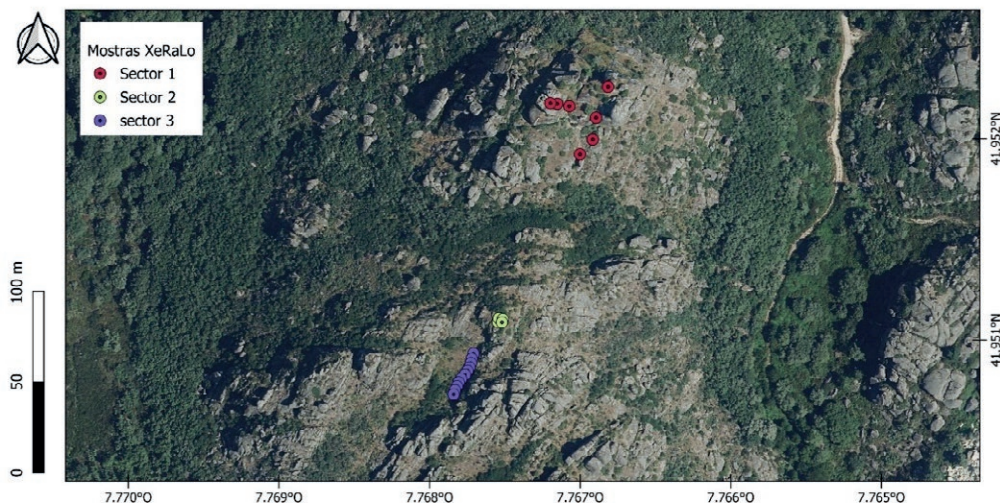


Figura 7. Localización da área de estudo con indicación das mostras recollidas durante a prospección inicial. Imaxe de fondo: PNOA máxima actualidade - ©IGN. Figura elaborada con QGIS

O primeiro destes ámbitos corresponde ao Castelo da Raiña Loba (Castelo Novo), identificado como sector 1 (RL), situado na parte máis elevada do conxunto dos Penedos. Trátase do sector de maior complexidade arqueolóxica, no que se concentran numerosas modificacións antrópicas da rocha (rebaixes, escaleiras labradas e restos construtivos), así como a presenza de perpiños e acumulacións de derrubamentos. A estas evidencias súmase a aparición frecuente de materiais en superficie, entre os que destacan fragmentos cerámicos e escouras, o que permite interpretalo como un ámbito de ocupación relevante dentro do xacemento.

Nunha posición tamén elevada, aínda que cun desenvolvemento espacial máis limitado, localízase o sector 2 (TC), identificado como o *Cementerio*. Neste ámbito

recoñécense igualmente intervencións sobre a rocha, aínda que de menor entidade, xunto coa presenza de restos óseos de animais en superficie, que introducen unha dimensión funcional diferenciada respecto ao sector anterior. A escasa potencia dos solos condiciona tanto a conservación do rexistro estratigráfico coma as posibilidades de intervención, configurando un contexto no que a información arqueolóxica aparece máis fragmentada e exposta.

O sector 3 (SC) sitúase nunha valgada entre afloramentos rochosos, a unha cota inferior respecto aos sectores anteriores, e presenta características notablemente distintas. A menor presenza de indicios directos de actividade humana contrasta cunha maior acumulación de sedimentos e cun desenvolvemento máis significativo da cuberta vexetal, dominada por matogueiras. Estas condicións fan deste ámbito un espazo especialmente adecuado para a análise de procesos naturais e para o establecemento de termos comparativos fronte aos sectores claramente antropizados.

A partir desta diferenciación espacial, deseñouse unha estratexia de mostraxe adaptada ás características de cada sector. No conxunto da prospección recolléronse trinta mostras de solo, combinando a toma de mostras superficiais (onde non había potencia suficiente) coa obtención de perfís estratigráficos mediante un sacatestemuñas de media cana tipo Auger, empregado nos puntos onde a acumulación sedimentaria permitía recuperar secuencias con certa continuidade. A distribución das mostras respondeu á extensión e ao potencial arqueolóxico de cada ámbito: quince no sector 1, catro no sector 2 e once no sector 3. Nos sectores máis directamente asociados á ocupación humana, a selección dos puntos realizouse de maneira dirixida, atendendo á presenza de estruturas, materiais ou outras evidencias superficiais; pola contra, no sector 3 optouse por unha mostraxe sistemática, establecendo unha liña regular ao longo da valgada co obxectivo de obter unha referencia continua nun contexto, aparentemente, de menor intervención antrópica.

Este deseño permitiu establecer unha base sólida para a análise comparativa entre sectores e para a posterior aplicación de técnicas analíticas máis específicas, ao tempo que garantiu a integración das observacións de campo co rexistro material e co contexto xeográfico do enclave.

3.3 Análise dos solos

As mostras de solo recollidas durante a fase de prospección foron sometidas a un proceso de preparación orientado á súa análise xeoquímica, co obxectivo de identificar posibles marcadores asociados á actividade humana no rexistro sedimentario. Unha vez secadas e acondicionadas, as mostras foron remitidas ao laboratorio do CINTECX (Universidade de Vigo), onde se caracterizaron mediante espectrometría

de fluorescencia de raios X (XRF), técnica amplamente empregada en estudos xeoarqueolóxicos [34] pola súa capacidade para determinar de maneira rápida e fiable a composición elemental dos solos.

A aplicación desta metodoloxía permitiu obter datos cuantitativos para un conxunto de elementos de especial interese na interpretación de contextos arqueolóxicos, como arsénico (As), calcio (Ca), cobre (Cu), ferro (Fe), manganeso (Mn), níquel (Ni), chumbo (Pb), titanio (Ti) e cinc (Zn). Estes elementos poden estar asociados tanto a procesos naturais de formación do solo coma a actividades humanas relacionadas co uso e transformación do espazo [35], polo que a súa análise conxunta resulta fundamental para distinguir entre sinais de distinta orixe. Para garantir a calidade dos resultados, o procedemento analítico foi validado mediante a análise sincrónica de materiais de referencia certificados (CRM), o que permitiu avaliar a precisión e a fiabilidade das determinacións. Neste proceso comprobouse, ademais, unha boa correspondencia entre os valores medidos e os valores de referencia para elementos como Al e P, aínda que, debido ao número limitado de estándares dispoñibles para ambos, estes resultados deben considerarse de carácter semicuantitativo.

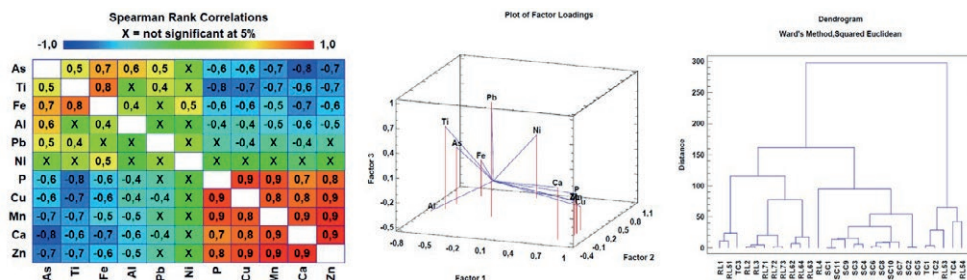


Figura 8. Resultados da análise estatística da base de datos. Análise multivariante (correlacións), análise factorial e análise clúster

Unha vez obtidos os datos, tratáronse estatisticamente (fig. 8) co obxectivo de explorar padróns de distribución e relación entre variables que puidesen resultar significativos desde o punto de vista interpretativo. Nunha primeira aproximación, observouse que os sectores con maior presenza de evidencias arqueolóxicas presentan tamén valores relativamente elevados nalgúns elementos traza, especialmente Cu e Zn, o que suxire a posible existencia de enriquecementos vinculados á actividade humana. A análise das correlacións permitiu identificar un grupo de elementos estreitamente asociados (Ca, Cu, Mn, P e Zn), cuxa covariación apunta á existencia de dinámicas comúns no comportamento destes elementos dentro do solo.

Este padrón reforzouse cos resultados da análise factorial, que sintetizou a variabilidade do conxunto en tres factores principais. O primeiro factor, responsable da maior parte da variabilidade observada, presenta cargas positivas elevadas nos elementos anteriormente mencionados, mentres que Al, Fe e Ti amosan valores de signo contrario. Esta oposición pode interpretarse, nunha primeira lectura, como a diferenciación entre compoñentes de carácter litoxénico (vinculados á matriz xeolóxica do substrato) e outros asociados a procesos de acumulación derivados da ocupación humana, nunha dinámica coherente co denominado *habitation effect* [36], descrito na literatura, que alude á converxencia de múltiples fontes potenciais de orixe humana nun lugar determinado e á súa contribución conxunta á diferenciación na composición dos solos.

A análise de conglomerados permitiu identificar un pequeno número de mostras que se afastan claramente do comportamento xeral, caracterizadas por presentar valores máis elevados de determinados elementos traza e por concentrarse en intervalos de profundidade concretos. A detección destes padróns non só reforza a coherencia interna dos resultados, senón que proporciona unha base sólida para seleccionar áreas de interese prioritario, nas que a intensidade e persistencia dos sinais analíticos suxiren unha maior relevancia desde o punto de vista da ocupación histórica.

A converxencia entre os datos xeoquímicos e as observacións realizadas durante a prospección permitiu sinalar como especialmente significativa a mostra RL5, correspondente a unha testemuña de sedimento de aproximadamente 50 cm de profundidade, situada na zona central do sector 1 (Castelo da Raíña Loba ou Castelo Novo). Nesta secuencia identifícanse valores elevados dos elementos agrupados (especialmente Cu e Zn) entre os 30 e os 40 cm de profundidade (fig. 9), definindo un nivel claramente diferenciado respecto ao resto da columna estratigráfica. A esta singularidade xeoquímica súmase a presenza, ao longo da propia testemuña, de indicadores directos de actividade humana, como fragmentos cerámicos, restos óseos e materiais con evidencias de exposición ao lume.

A coincidencia entre o sinal xeoquímico e a presenza directa de evidencias materiais no rexistro estratigráfico fixo posible identificar en RL5 un punto especialmente significativo dentro do xacemento, no que ambas as dimensións (analítica e material) aparecen claramente superpostas. Esta correspondencia suxire a existencia dun espazo de ocupación persistente e funcionalmente relevante. Á vista destes indicios, decidiuse orientar cara a este sector unha intervención arqueolóxica específica, co obxectivo de contrastar sobre o terreo as hipóteses formuladas a partir da análise dos solos e avanzar na comprensión das dinámicas de ocupación do enclave.

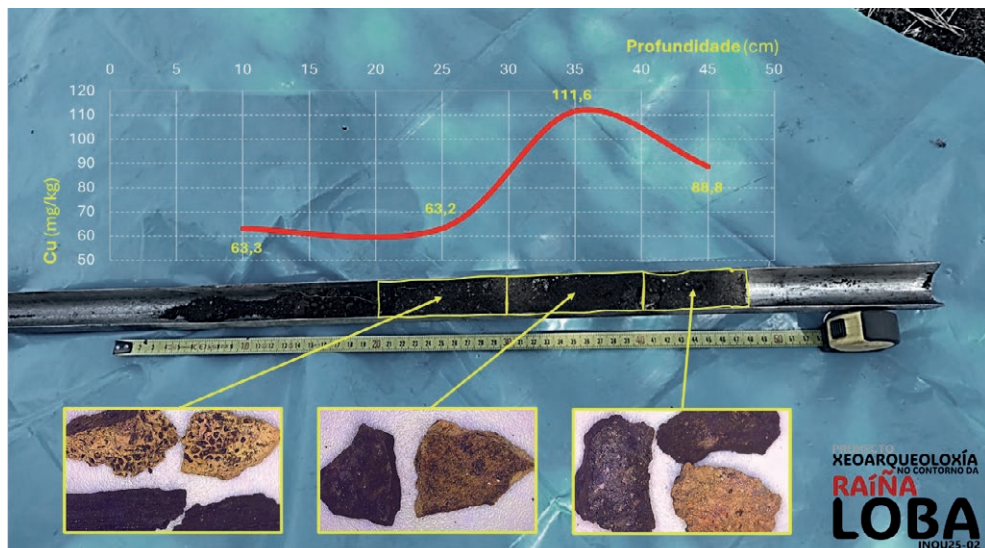


Figura 9. Resumo gráfico das evidencias documentadas na testemuña sedimentaria RL5, con indicación dos resultados da análise de contidos de Cu e exemplos dos diferentes materiais identificados entre os sedimentos. Fotos: M. A. Álvarez Vázquez

3.4 Traballos arqueolóxicos

A intervención arqueolóxica desenvolvida no sector sinalado pola testemuña RL5 materializouse na apertura dunha cata de 3 x 3 m (fig. 10), situada nunha posición lixeiramente dominante dentro do sector 1 (Castelo da Raíña Loba ou Castelo Novo) e en estreita relación co conxunto de estruturas visibles en superficie, entre elas indicios interpretados como restos dun posible muro perimetral e unha área na que se recuperaron materiais compatibles cun lugar de fogueira. A escavación permitiu documentar unha secuencia estratigráfica ben definida, na que se recoñeceron diferentes unidades asociadas a procesos de ocupación e uso do espazo. Entre os elementos máis salientables destaca a presenza de estruturas pétreas que parecen corresponder a distintas fases construtivas, con muros de aparello irregular adaptados á topografía e apoiados directamente sobre o substrato granítico. A organización destes elementos suxire a existencia dun espazo funcionalmente estruturado, no que a arquitectura se integra de maneira estreita co relevo natural, posiblemente resultado de sucesivas intervencións ao longo do tempo.

No interior da área escavada identificouse tamén un nivel de uso caracterizado pola presenza de sedimentos escurecidos, con abundantes carbóns e restos de combustión, interpretado como unha posible zona de fogueira ou de actividade doméstica vinculada ao uso cotián do espazo. Esta lectura vese reforzada pola presenza de restos óseos de fauna, algúns deles calcinados, compatibles con actividades domésticas como o

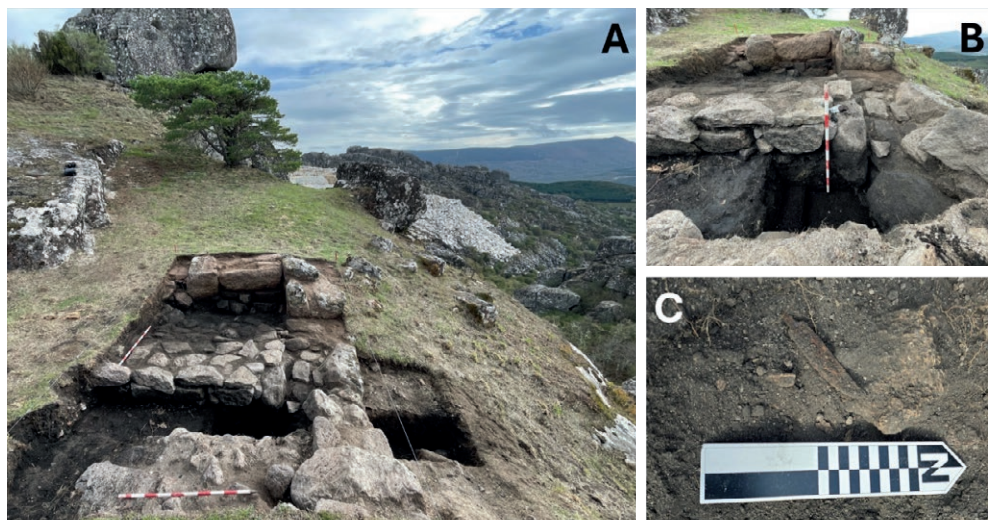


Figura 10. Resultados da cata arqueolóxica. A: perspectiva da cata arqueolóxica desde poñente. B: detalle da cata desde o oeste. C: coitelo. Fotos: E. B. Nieto Muñiz e J. M. Galiña Lorenzo

consumo, a preparación de alimentos e a xestión de refugallos. Este nivel presenta unha correspondencia clara coa franxa de maior concentración de elementos traza detectada na análise xeoquímica (RL5, 30-40 cm de profundidade), reforzando a coherencia entre ambas as liñas de evidencia. A escavación permitiu, ademais, constatar a presenza de pequenas estruturas negativas escavadas no sedimento, cuxa funcionalidade concreta se atopa aínda en proceso de estudo, que poderían estar relacionadas con actividades específicas desenvolvidas no interior do recinto.



Figura 11. Exemplo de materiais recuperados durante a escavación arqueolóxica. A: ósos, B: cerámicas, algunhas decoradas, C: fusiola, D: moeda, E: escoura e elementos de ferro, F: coitelo. Fotos: E. B. Nieto Muñiz e J. M. Galiña Lorenzo

O conxunto de materiais recuperados resulta especialmente significativo pola súa abundancia e diversidade. Destaca un conxunto duns 300 fragmentos cerámicos, maioritariamente de tradición medieval, xunto con numerosos restos óseos de fauna, actualmente en análise para a súa determinación taxonómica. A estes engádense dous exemplares monetarios de bronce e un conxunto de útiles metálicos, entre os que se inclúen dous coitelos e, de maneira particular, unha punta de béstia, elemento que pode estar asociado tanto a actividades de caza coma a prácticas de carácter defensivo, segundo o contexto de uso. A presenza de fragmentos calcinados, tanto cerámicos coma líticos, completa un rexistro material que apunta a unha ocupación intensa e continuada, na que se combinan actividades domésticas, produtivas e, posiblemente, de control e aproveitamento do territorio.

Os resultados da intervención confirman de maneira empírica a capacidade da prospección xeoquímica para identificar áreas de alto potencial arqueolóxico, permitindo orientar con precisión a localización das escavacións. Ao mesmo tempo, a información obtida nesta cata ofrece unha primeira aproximación material á organización interna do enclave e ás dinámicas de ocupación que o caracterizaron, abrindo novas liñas de investigación destinadas a profundar na secuencia cronolóxica e na súa integración no sistema territorial documentado para este sector da Limia e do Val do Salas.

4. Conclusións

O estudo desenvolvido nos Penedos da Raíña Loba permite avanzar na comprensión da ocupación histórica deste enclave a partir da integración de distintas liñas de evidencia, combinando información documental, análise xeoquímica do rexistro sedimentario e unha intervención arqueolóxica de carácter puntual. Esta aproximación multidisciplinar ofrece unha lectura coherente do lugar como un espazo efectivamente ocupado durante a Idade Media, inserido nun sistema territorial máis amplo e articulado.

A análise das fontes documentais relativas ao castelo de Aguiar da Moa manifesta a existencia dun territorio organizado arredor dunha fortaleza con funcións políticas, administrativas e defensivas relevantes no contexto fronteirizo dos séculos XII e XV no Val de Salas. Aínda que a localización exacta deste castelo non pode establecerse con certeza a partir da documentación dispoñible, a converxencia entre estas fontes, a evidencia toponímica e a configuración espacial do enclave permite propoñer, de maneira razoada, a súa posible identificación co complexo dos Penedos da Raíña Loba ou, cando menos, a súa integración funcional dentro deste ámbito territorial.

Desde o punto de vista metodolóxico, os resultados obtidos confirman o potencial da análise xeoquímica dos solos como ferramenta prospectiva para a identificación de áreas con presenza de actividade humana en contextos arqueolóxicos complexos. A detección de padróns significativos na distribución de elementos como Ca, Cu, Mn, P e Zn, interpretados como posibles indicadores de acumulacións de orixe antrópica, permitiu orientar de maneira eficaz a selección de áreas de interese para a intervención arqueolóxica. A actuación no sector sinalado pola testemuña RL5 constitúe un exemplo especialmente significativo da utilidade desta aproximación. A coincidencia entre as anomalías xeoquímicas detectadas, a presenza de materiais arqueolóxicos no rexistro sedimentario e a posterior documentación de estruturas e niveis de uso durante a escavación reforza a validez da estratexia aplicada, ao tempo que permite identificar este sector como un ámbito de ocupación intensa e prolongada, no que se sucederon diferentes fases de uso ao longo do tempo.

En termos máis amplos, os resultados obtidos apuntan á necesidade de interpretar os Penedos da Raíña Loba non como un elemento illado, senón como parte dun sistema territorial organizado, no que distintos espazos (con funcións potencialmente diversas) contribuían de maneira complementaria á articulación e ao control da paisaxe. Esta lectura reforza a idea de que a ocupación histórica do enclave debe entenderse no marco das dinámicas de relación entre as sociedades medievais e o seu medio, nas que o aproveitamento, a transformación e o control do espazo desempeñaban un papel fundamental.

Cómpre subliñar que as interpretacións aquí propostas deben entenderse como un marco conceptual inicial para futuras investigacións. Debe terse en conta que a interpretación avanza desde evidencias moi puntuais cara a consideracións de escala territorial, polo que este cambio de escala debe entenderse como unha proposta interpretativa fundamentada pero suxeita a contraste. A ampliación da mostraxe, o desenvolvemento de novas intervencións arqueolóxicas e unha revisión máis exhaustiva das fontes documentais permitirán afinar e verificar as hipóteses formuladas, contribuíndo a unha mellor caracterización deste enclave e do seu papel no contexto histórico rexional.

Agradecementos: á CMVM de Montes de Covas (núm. 1331), entidade titular dos terreos onde se localiza a área de estudo, polo seu apoio e disposición, fundamentais para o desenvolvemento dos traballos arqueolóxicos, así como por facilitar o acceso ao sitio mediante a limpeza de camiños. O traballo de J. M. Galiña Lorenzo foi financiado polo programa de axudas á etapa predoutoral da Xunta de Galicia (Consellería de Cultura, Educación, Formación Profesional e Universidades; Ref. ED481A 2022/078). O traballo de P. M. Bello Alonso foi financiado polo programa de axudas de apoio á etapa

de formación posdoutoral da Xunta de Galicia (Consellería de Cultura, Educación, Formación Profesional e Universidades; ref. ED481B-2022-079). Empregáronse ferramentas de intelixencia artificial como apoio na redacción e revisión do texto. O contido científico, a análise e as interpretacións son responsabilidade exclusiva dos autores, e todo o material foi revisado e validado por eles.

5. Referencias

- [1] Gray, M. (2011). Other nature: geodiversity and geosystem services. *Environmental Conservation*, 38(3), 271-274.
- [2] De Uña-Álvarez, E. (2012). Patrimonio geomorfológico en la dimensión local. Formas graníticas en Galicia meridional (NW del macizo Ibérico). En *Actas del XIII Coloquio Ibérico de Geografía*, Santiago de Compostela, 2158-2163.
- [3] De Uña-Álvarez, E. (2014). Patrimonio geomorfológico y cultura local. Formas graníticas en las iniciativas de uso público (Galicia meridional, noroeste de la Península Ibérica). En Varios Autores, *Geografías Ibero-Afro-Americanas*, Universidade do Minho, 2158-2163.
- [4] Panizza, M., & Piacente, S. (2009). Cultural Geomorphology and Geodiversity. In E. Reynard, et al. (Eds.), *Geomorphosites*, München: Springer-Verlag, 35-48.
- [5] Wilcock, D., Brierley, G., & Howitt, R. (2013). Ethnogeomorphology. *Progress in Physical Geography*, 37(5), 573-600.
- [6] Claval, P. (2002). El enfoque cultural y las concepciones geográficas del espacio. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 34, 21-39.
- [7] Martínez de Pisón, E. (2007). Paisaje, cultura y territorio. En J. Nogué (Ed.), *La construcción social del paisaje*, Madrid: Biblioteca Nueva, 325-337.
- [8] Giusti, C., Fouache, É., Cossart, É., Gramond, D., Hobléa, F., Jacob-Rousseau, N. (2009). Geomorphosites 2009: raising the profile of geomorphological heritage through iconography, inventory and promotion. *International Symposium, Abstracts Volume*, Paris, 192 p.
- [9] Coratza, P., & Hobléa, F. (2018). The Specificities of Geomorphological Heritage. In E. Reynard, & J. Briha (Eds.), *Geoheritage: Assessment, Protection, and Management*, Elsevier, 87-106.
- [10] Fundación Barrié (s.d.). Xacemento Penedos da Reina Loba/O Castelo Novo, *Ficha inmovle ID 020123*. Recuperado de http://www.altalimia.org/ficha_inmovle.php?id=020123.

[11] Andrade Cernadas, J. M. (Ed.) (1995). *O Tombo de Celanova: Estudio introductorio, edición e índices (SS. IX-XII)*. Santiago de Compostela: Consello da Cultura Galega.

[12] Durany Castrillo, M., Pérez Rodríguez, F. J., & Vaquero Díaz, M. B. (2010-2011). A Terra da Limia na Idade Media. *Lethes, Cuadernos Culturais do Limia*, (10), Xinzo de Limia, 52-54.

[13] Vaquero Díaz, M. B., & Pérez Rodríguez, F. J. (2010). *Colección documental del Archivo de la Catedral de Ourense I (888-1230)*. León: Centro de Estudios e Investigación San Isidoro-Caja España.

[14] Rodríguez López, A. (1995). Dotes y arras en la política territorial de la monarquía feudal castellana: siglos XII-XIII. *Arenal, revista de historia de las mujeres*, 2, 272-293.

[15] Olivera Serrano, C. (2001). Fortalezas y Villas del Rey: Notas sobre la Frontera Galaico-Portuguesa en Tierras Ourensanas a fines del Siglo XII. *Cuadernos de Estudios Gallegos*, XLVIII(114), 397-414.

[16] González Paz, C. A. (2009). Una fortaleza medieval en el camino portugués a Santiago de Compostela: Castellum Sancti Pelagii de Luto. *Cuaderno de Estudios Gallegos*, LVI(122), 152-70.

[17] González Mínguez, C. (1998). La minoría de Fernando IV de Castilla (1295-1301). *Revista da Faculdade de Letras. Historia*, Universidade do Porto, 15(2), 1071-84.

[18] González, J. (1944). *Alfonso IX*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto Jerónimo Zurita.

[19] De Antonio Rubio, M. G., & González Paz, C. (2006). Allariz: aspectos urbanos de una ciudad gallega con judería en el siglo XIII. En M. González Jiménez (Ed.), *El mundo urbano en la Castilla del siglo XIII*, Sevilla: Fundación El Monte, 45-52.

[20] Grabois de Ballesteros, M. (1922). *Historia del Reinado de Sancho IV de Castilla* (Tomo I). Madrid: Revista de Archivos, Bibliotecas y Museos.

[21] Pascual Martínez, L. (1994). Apuntes para un estudio de la Cancillería del rey Fernando IV de Castilla (1285-1312). *Estudis castellonencs*, (6), 1021-36.

[22] Biblioteca Histórica Nacional. (1620). *Memorial del pleyto, que es entre Don Pedro Fernandez de Castro, Conde de Lemos, y de Andrade, Con Don Manuel de Fonseca y Zuñiga. Conde de Monterrey, y Conde de Fuentes. Sobre. El cumplimiento de la carta executoria, librada en el Consejo en grado de mil y quinéntas, en fauor del Conde de Lemos, sobre la casa de Vierzma*. Recuperado de <https://bnedigital.bne.es/bd/card?oid=0000209304>.

[23] Fernández Oxea, J. R. (1950). Descripción de los Estados de la Casa de Monterrey en Galicia por D. Pedro Gonzalez de Ulloa. *Cuadernos de Estudios Gallegos*, (Anejo IV). Santiago de Compostela: Instituto Padre Sarmiento.

[24] Risco, V. & Cabanillas, R. (1971). Un caso de lycantropía: (o home lobo). *Publicacións da Real Academia Galega*. Recuperado de <https://publicacions.academia.gal/index.php/rag/catalog/book/54>.

[25] Cuevillas, F. (1956). Un nuevo castillo de la Reina Loba. *Boletín de la Comisión de Monumentos de Ourense*, XVIII, 193-194.

[26] Weisler, M. I., & Love, S. (2015). Geoarchaeology. In J. H. Wright (Ed.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (pp. 53-7).

[27] Ferro-Vázquez, C., Blanco-Rotea, R., Sanjurjo-Sánchez, J., García-Rodríguez, S., & García Quintela, M. V. (2021). Territories of Faith: 1000 Years of Landscape Multifunctionality in Santa Mariña de Augas Santas (NW Spain). *Land*, 10(9), 992.

[28] Monge, G., Jimenez-Espejo, F. J., García-Alix, A., Martínez-Ruiz, F., Mattielli, N., Finlayson, C., Ohkouchi, N., Cortés Sánchez, M., Bermúdez de Castro, J. M., Blasco, R., Rosell, J., Carrión, J., Rodríguez-Vidal, J., Finlayson, G. (2015). Earliest evidence of pollution by heavy metals in archaeological sites. *Scientific Reports*, 5(1), 14252.

[29] Younes, G., Kaniewski, D., Marriner, N., Morhange, C., Sheisha, H., Odler, M., Wang, Y., Chen, Z., El-Qady, G., Saleem, A., Véron, A. (2024). The construction of the Giza pyramids chronicled by human copper contamination. *Geology*, 52(10), 774-778.

[30] Mil-Homens, M., Vale, C., Naughton, F., Brito, P., Drago, T., Anes, B., Raimundo, j., Schmidt, S., Caetano, M. (2016). Footprint of roman and modern mining activities in a sediment core from the southwestern Iberian Atlantic shelf. *Science of the Total Environment*, 571, 1211-1221.

[31] Viveen, W., Sanjurjo-Sanchez, J., Goy-Diz, A., Veldkamp, A., & Schoorl, J. M. (2014). Paleofloods and ancient fishing weirs in NW Iberian rivers. *Quaternary Research*, 82(1), 56-65.

[32] Álvarez-Vázquez, M. Á., Prego, R., Caetano, M., De Uña-Álvarez, E., Doval, M., Calvo, S., Vale, C. (2017). Natural and Anthropocene fluxes of trace elements in estuarine sediments of Galician Rias. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 198, 329-42.

[33] Álvarez-Vázquez, M. Á., González-Prieto, S. J., & Prego, R. (2018). Possible impact of environmental policies in the recovery of a Ramsar wetland from trace metal contamination. *Science of the Total Environment*, 637, 803-812.

[34] Shackley, M. S. (2010). An introduction to X-ray fluorescence (XRF) analysis in archaeology. In *X-ray fluorescence spectrometry (XRF) in geoarchaeology*, New York: Springer New York, 7-44.

[35] Oonk, S., Slomp, C. P., & Huisman, D. J. (2009). Geochemistry as an aid in archaeological prospection and site interpretation: current issues and research directions. *Archaeological Prospection*, 16(1), 35-51.

[36] Bintliff, J., & Degryse, P. (2022). A review of soil geochemistry in archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 43, 103419.

Plan de potencialidade, recuperación, posta en valor e protección da surxencia termal da Fonte do Baño, no val do Salas (Baltar, Ourense)

Ángel Domínguez López

*Departamento de Historia, Arte e Xeografía, campus de Ourense
Facultade de Historia. Facultade de Belas Artes.
Facultade de Ciencias Empresariais e Turismo. Universidade de Vigo
adominguez@uvigo.gal;*

Lorenzo Rodríguez Comesaña

*Departamento de Organización de Empresas e Márketing, campus de Ourense
Facultade de Ciencias Empresariais e Turismo, Universidade de Vigo.
loroco@uvigo.gal;*

Noelia Araújo Vila

*Departamento de Organización de Empresas e Márketing, campus de Ourense
Facultade de Ciencias Empresariais e Turismo, Universidade de Vigo.
naraujo@uvigo.gal;*

Nuria Rodríguez López

*Departamento de Organización de Empresas e Márketing, campus de Ourense
Facultade de Ciencias Empresariais e Turismo, Universidade de Vigo.
nrl@uvigo.gal;*

Pilar Aurora Araujo Araujo

*Departamento de Organización de Empresas e Márketing, campus de Ourense
Facultade de Ciencias Empresariais e Turismo, Universidade de Vigo.
piliaraujo@hotmail.com*

Resumo

Galicia destaca pola súa riqueza termal dentro de España. O número de mananciais mineromedicinais existentes na comunidade autónoma é de 300, dos cales algúns son termiais. Co afán de pór en valor unha das rexións europeas de maior riqueza en augas minerais e termiais, optouse por investigar e recuperar un manancial que, posiblemente, fora xa explotado na época romana.

Este proxecto céntrase no estudo de potencialidade mineromedicinal da auga, da posta en valor e protección da Fonte do Baño, situada na Veiga de Quintá, no val do Salas, no concello de Baltar (Ourense), cunha abordaxe interdisciplinaria que combina investigación arqueolóxica, histórica, etnográfica e turística. A fonte, abandonada desde hai décadas, contén augas con propiedades mineromedicinais, tal como o reflicten as tradicións no val do Salas.

O proxecto recomenda a limpeza e o acondicionamento da zona, continuar coa realización de catas arqueolóxicas para identificar posibles estruturas asociadas ao uso histórico da fonte, ampliar a recollida de testemuños orais e conseguir a declaración de condición mineral, termal e de manancial das augas, e realizar máis estudos e análises da auga para iniciar a caracterización para o seu potencial uso terapéutico. Ademais, recoméndase a integración deste recurso en estratexias de turismo sostible e cultural para contribuír ao desenvolvemento económico e social da comarca da Limia e da provincia de Ourense. Así, comezouse coa divulgación dos primeiros resultados a través da Feira Internacional de Turismo de Interior (INTUR), de Valladolid.

Palabras clave: augas mineromedicinais, termalismo, fonte, patrimonio, Baltar, val do Salas, turismo sostible e desenvolvemento rural.

1. Introducción e contexto estratéxico

O proxecto trata a necesidade de identificar, protexer e valorizar recursos hídricos con potencial terapéutico e patrimonial na provincia de Ourense, dada a riqueza de 300 mananciais existentes en Galicia [1]. O presente estudo céntrase no afloramento termal da fonte «Do Baño», situada nun enclave xeográfico dentro do destino turístico transfronteirizo da Raia Seca e o Parque Natural do Gerês/Xurés.

1.1. Localización

A Fonte do Baño sitúase no val do Salas, na Veiga de Quintá, pertencente ao concello de Baltar, na provincia de Ourense. As súas coordenadas xeográficas son 41° 55' 28.1" N, 7° 47' 07.2" O. Esta Veiga de Quintá está xunto ao río Salas e ao pé das ladeiras do monte do Castro da serra do Larouco, que fai fronteira con Portugal.

A fonte sitúase en terreos de propiedade comunal, explotados para pastos e recollida de herba seca, por parte dos veciños das aldeas próximas. Tratábase dun manancial de auga de uso público, que está sen actividade dende hai décadas.

1.2. Caracterización da auga

Os resultados das análises realizadas confirman os indicios de termalidade da fonte, con niveis elevados de sílice, sodio e condutividade. Os datos analíticos obtidos son os seguintes:

Mostra	Si (mg/l)	Ca (mg/l)	Fe (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)
ID_1690	20,05	12,5	0,03	0,83	1,04	24,25
Mostras	F (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)			
ID_1689	2,8	2,6	3,1			
pH	Condutividade (mS/cm)	mg/L CaCO ₃		mg/L HCO ₃		
7,8	216	-		123		

Figura 1. Datos analíticos obtidos

Os parámetros fisicoquímicos da auga son pH: 7,8; condutividade: 216 μ S/cm; HCO₃: 123 mg/L; temperatura da auga da fonte: 14 °C; temperatura da auga do río: 7 °C; temperatura ambiente no momento da medición: 9 °C (figura 1).

Estes valores suxiren que a auga da fonte contén propiedades mineromedicinais que poden ser de interese para a súa valorización.

1.3. Presentación do problema e situación actual

Na actualidade, a fonte atópase en estado de abandono. A súa localización apenas se percibe debido á densa vexetación de salgueiros que a rodea e que a cobre. Segundo testemuñas locais, o lugar foi respectado debido á crenza na existencia de areas movedizas preto da fonte.

Como a fonte foi deixada de utilizar durante décadas, perdeuse completamente. Por iso, recoméndase a súa recuperación. Así, é importante a posta en valor deste recurso natural e patrimonial, e transmitir a súa potencialidade como augas mineromedicinais despois de obter os resultados de indicios de termalidade.

2. Obxectivo principal

O obxectivo principal desta investigación foi realizar unha análise inicial do manancial para o estudo do seu potencial terapéutico e turístico para unha futura recuperación, posta

en valor e protección do manancial. É, por tanto, unha fase inicial multidisciplinar para fundamentar a recuperación integral do manancial, co fin de alumear augas susceptibles de ser posteriormente declaradas coa condición mineromedicinal, de utilidade pública, para poder, así, recuperar un uso histórico delas.

3. Metodoloxía da investigación realizada en relación coas tarefas

O proxecto estruturouse en cinco fases: 1. Análise fisicoquímica: estudo inicial da composición da auga para determinar a súa posible clasificación como mineromedicinal e avaliar o seu potencial terapéutico. 2. Investigación histórica: revisión documental e consulta de fontes históricas, como o dicionario de Madoz, na que aparece nomeada esta fonte, para reconstruír o uso da fonte e das da contorna. 3. Estudo etnográfico: recollida de testemuños orais sobre o uso da fonte e identificación das aldeas e camiños que conducían a ela. 4. Traballo arqueolóxico: catas arqueolóxicas para determinar posibles estruturas asociadas ao uso histórico da fonte en época castrexa, romana e posteriores [2]. 5. Divulgación e posta en valor: creación de materiais informativos, divulgación e comunicación de resultados realizada na feira INTUR, con miras á integración da fonte en estratexias de turismo termal e patrimonial.

4. Achados da investigación multidisciplinar

A través dunha serie de entrevistas etnográficas, púidose constatar a vixencia do coñecemento popular sobre as propiedades da fonte. As persoas consultadas, moitas das cales foron usuarias directas, reafirmaron o poder curativo das súas augas. Historicamente, este recurso atraía veciños de todas as aldeas do arredor, que acudían especificamente para tratar afeccións cutáneas como feridas e úlceras, o que demostra o papel fundamental da fonte na medicina tradicional da comarca.

Máis aló da súa memoria terapéutica vinculada á cura de afeccións, a recuperación deste espazo adquire hoxe unha nova dimensión estratéxica fronte ao cambio climático. Nun contexto de incremento das temperaturas e acumulación de carbono, o acondicionamento da Fonte do Baño con zonas de sombra permitirá que este enclave se transforme nun refuxio climático; grazas á súa localización privilexiada na zona de montaña do val do Salas e da serra do Larouco, que axuda a minimizar os impactos ambientais no medio rural, como espazo de protección e benestar para a comunidade.

A investigación estruturouse a través dun enfoque que combina a etnografía, a hidroquímica, a arqueoloxía e a xeoloxía, e lanza os seguintes cinco enfoques: 1.

Valor etnográfico e uso tradicional: propiedades curativas. As enquisas etnográficas confirmaron o uso inmemorial da fonte por parte dos habitantes e coñecedores do val. A tradición oral documenta a procura deste recurso polas súas propiedades curativas, especialmente para o tratamento de feridas e afeccións cutáneas. 2. Contexto histórico e patrimonial: mantívose como premisa que o manancial mineromedicinal é indisoluble do seu contexto humano e cultural. Este enclave do val do Salas conta cunha densa traxectoria de poboamento documentada desde épocas anteriores ao século x, favorecida pola súa localización estratéxica: a desembocadura do río Salas no Limia e a súa proximidade ao complexo romano de Aquis Querquennis. A súa condición fronteiriza con Portugal e o seu profundo legado castrexo consolidan un espazo de alto valor histórico. Por tanto, a posta en valor do manancial debe entenderse desde a simbiose entre o patrimonio natural e o inmaterial; unha visión integradora que non só reforza a identidade do xeodestino, senón que actúa como un motor clave para o desenvolvemento socioeconómico local. 3. Conectividade histórica: documentouse o trazado dos camiños históricos que converxían cara á fonte, e confirman a súa importancia como punto nodal para a poboación local e comarcal en épocas pasadas. 4. Densidade toponímica: o val do Salas presenta unha toponimia de parcelas de terreo excepcionalmente densa, así como unha alta concentración de fontes con termos identificativos propios, o que subliña o valor ancestral e a importancia do recurso hídrico na organización socio-espacial do val. 5. Vestixios arqueolóxicos: os traballos de prospección revelaron restos arqueolóxicos que indican a presenza continuada de asentamentos de culturas castrexas, romanas e medievais na proximidade do manancial, o que confirma a perdurabilidade e a relevancia do enclave ao longo da historia.

A continuación explícase brevemente o descuberto en relación coa documentación teórica con respecto á fonte, as divisións parcelarias, os camiños, a titularidade dos terreos, a xeoloxía, a toponimia e a paisaxe no val do Salas.

4.1. Pascual Madoz

O achado do contexto histórico: segundo a descrición de Pascual Madoz no ano 1850, na Veiga de Quintá existía un «baño frío» abandonado, empregado para tratar diversas afeccións. Ademais, afirmábase que antigamente houbo un «baño quente» na zona, actualmente convertida en pradeira. Este testemuño reforza a importancia histórica e patrimonial do recurso.

Pascual Madoz fala dunha fonte de augas quentes, de rúas e dun pozo, nesta «veiga» de «Quintá», no val do Salas, onde varias aldeas, como Tosende, teñen as súas «veigas» e «meras» [3].

ABADES (SAN PAYO): felig. en la prov. y dióc. de Orense (7 1/2 leg.), part. jud. de Ginzo de Limia” (3), y ayunt. de Baltar; SIT. en un valle que forman los montes que por aquel lado dividen a España de Portugal; el CLIMA templado y sano; comprende los l. de Abades, San Martin, Sabucedo y Quintá ; la igl., dedicada á San Pelayo, la sirve 1 párroco de provisión laical, por el duque de Berwik; el TÉRM., de 1/2 leg. de circunferencia, confina por N. con el de San Lorenzo de Tosende, por E. con el de Sta. María de Bullosa, por S. con la raya y pueblo de Sandín del Portugal, y por O. con el térm. de Santiago de Rubiás; le baña por N. el r. Salas y tiene una buena vega para pasto. En el centro de esta, y cubiertas de roble, existen las ruinas de un pueblo que parece haber sido de consideración; le llaman Saler, y se dice derivado de este nombre el del valle de Salas; aún se distingue una calle y a poca distancia un pozo, en el que se introduce un riego de agua que se le creó en comunicación con el r. Salas: entre Abades y Sabucedo se nota un pequeño monte con reductos, en la parte de Tosende unha muralla con indicios de haber sido cast., y junto a Paradela de Randín se conocen dobles fortificaciones. Desde la destruida Saler al r. se encuentra el infértil campo Ourique, cuya esterilidad atribuye la tradición vulgar a la mucha sangre vertida en una batalla. En la misma vega, y junto a Quintá, está abandonado un baño frío, útil para varias indisposiciones, y se asegura lo hubo caliente en lo que hoy es pradería: lo demás del terreno es de buena calidad. Los CAMINOS son vecinales y penosos; la CORRESPONDENCIA la recibe en Ginzo; PROD.: centeno, patatas, lino, trigo, legumbres, leña y mucho pasto para el ganado, lo cría lanar, vacuno y algo de caballar; POBL. :70 vec., 276 hab.; CONTR. con su ayunt. (V. Baltar). (pp. 32, 33)

4.2. A «mera» unidade agraria, en Galicia e León

O achado do uso da «mera». Na provincia de Ourense, nas veigas dedicadas a cereal do val do Salas, que pertencen a cada aldea, utilízase esta unidade de medida. Os veciños de Tosende tiñan cada un a súa «mera» na veiga para o cultivo e a posterior «xeitura» ou recolección do cereal. Poderíase considerar a «mera» como sinónimo de «emina» ou «hemina» que, na provincia de León, equivalería a uns 939 metros cadrados para a de secaño e 626 m² para a de regadío, segundo o estudo de Escalona (2009) na Universidade de León.

En léxico tradicional para a superficie agraria en inventarios do século XVII [4] aparece o uso de medidas agrarias para «emina»:

La lexicografía recoge esta voz por primera vez como medida de capacidad y de líquidos en 1611, en la obra titulada Origen y etimología de todos los vocablos

originales de la Lengua Castellana de Francisco del Rosal; pero no será hasta 1884 cuando el diccionario académico la incluya por vez primera como “medida agraria usada en la misma provincia León que tiene 1344 varas cuadradas y equivale a 939 centiáreas”. Entre los estudios sobre tema metrológico, es Escalona (2009: 119) quien confirma el uso de hemina o emina en León y distingue hemina de secano con una superficie de 939 m² y hemina de regadío de 626 m², entre otros valores. En cuanto a la extensión en el uso de dicha voz en la provincia leonesa, Díez Suárez (1994: 6 8) la localiza en distintas zonas, concretamente en La Vecilla, Villacidayo, Valencia de Donjuán, Astorga y Murías de Paredes en Luna. Por su parte, Escalona (2009: 119) extiende su documentación a Palencia, donde mide 1057 y 1346 m², y a Zamora, con 856 m². Y finalmente, Pérez de Castro (1973: 216) advierte el uso de eimina en Asturias, concretamente en la diplomática del siglo XV de Cornellana, como medida de capacidad y de superfice para indicar el “lote de pastos y arbolados comunes que se adjudicaba por sorteo a los vecinos” (Prieto Bances 1969: 44). Por tanto, su registro se halla confirmado en una amplia zona, desde Asturias a Valladolid pasando por León, Zamora y Palencia. (p. 86)

4.3. Os camiños que ían a Saler e á Fonte do Baño



Figura 2. O camiño que viña de Covas ata a Fonte do Baño e localización da
Fonte do Baño ao lado do camiño. Fonte: IGN

O achado dos camiños que ían á Fonte do Baño procedían de varias parroquias distintas segundo o Instituto Xeográfico Nacional (IGN). Ademais, ao centro do val no que Madoz fala de Saler tamén conflúen varios destes camiños. Así, o proxecto pode recuperar o coñecemento sobre o antigo pobo de Salare (orixe do nome do río Salas), posicionando a fonte «Do Baño» como un punto nodal de gran relevancia histórica e espiritual, que foi limítrofe con asentamentos castrexos (altares), romanos (camiños) e medievais (Ilduara Eriz e San Rosendo) [5] situados no val do Salas e nas súas montañas. Esta narrativa transfírese ao municipio de Baltar como un elemento clave na reafirmación da identidade local.

Apréciase o camiño que pasaba pola fonte dende Covas a Quintá segundo o IGN e o «camiño de Quintá» que viña de Covas pola Fonte do Baño (figura 2) segundo reflicte o Instituto Xeográfico Nacional (IGN) [6] (figura 2).

Isto reflicte a relevancia da fonte dentro do territorio, ao atoparse situada xunto a un camiño de paso que a facía accesible non só para os habitantes do lugar, senón tamén para persoas procedentes de aldeas próximas como Penalonga, Covas, Baltar, Boullosa, entre outras. A ela acudían os que buscaban alivio para diversas doenzas, tanto humanas coma animais, motivados polas propiedades curativas das súas augas.

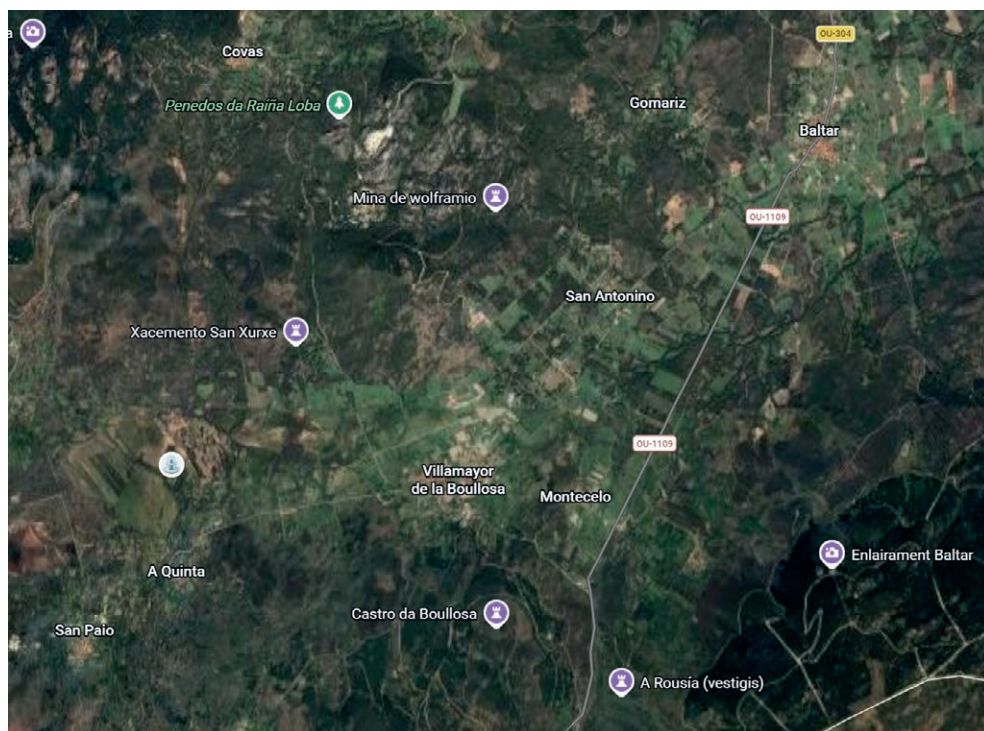


Figura 3. Localización da Fonte do Baño. Fonte: Google Maps

Localización da Fonte do Baño ao lado do camiño segundo o Google Maps (figura 3).
- Camiños de acceso á fonte:



Figura 4. Camiños de acceso á fonte. Fonte: comparativa da localización en GoogleMaps e no voo fotogramétrico 1956-57 do IGN.

Obsérvanse a localización e os camiños de acceso á fonte en 1956-1957 segundo o voo fotogramétrico da fototeca dixital do IGN (figura 4).

4.4. Titularidade do terreo en que está a fonte

O achado da titularidade do terreo da fonte, a nome de montes Moas e Veiga. Baltar (Ourense) de 107 380 m². Polígono 32. Parcela 900. Referencia catastral: 32006A032009000000KD (figura 5).

DATOS DESCRIPTIVOS DEL INMUEBLE

Referencia catastral

32006A032009000000KD

Localización

Polígono 32 Parcela 900
MONTES MOAS Y VEIGA. BALTAR (OURENSE)

Clase

Rústico

Uso principal

Agrario

PARCELA CATASTRAL

Localización

Polígono 32 Parcela 900
MONTES MOAS Y VEIGA. BALTAR (OURENSE)

Superficie gráfica

107.380 m²

CULTIVO

Subparcela	Cultivo/Aprovechamiento	Intensidad Productiva	Superficie m ²
0	E- Pastos	03	107.380

Figura 5. Titularidade do terreo da fonte. Fonte: sede do catastro

67

4.5. Xeoloxía

4.5.1. Introducción

Interesa pescudar as fisuras polas cales pode ascender a auga do subsolo, así como a composición do subsolo do val do Salas para coñecer a hora da perforación e da permeabilidade que poida presentar como comprensión inicial hidroxeoquímica. As análises da auga, aínda que iniciais, mostran indicios de termalidade que, sumados ao contexto xeolóxico, suxiren unha circulación profunda en relación co afloramento e de que a auga xorde directamente da roca matriz, asegurando a pureza e as características mineromedicinais do afloramento.

4.5.2. Marco xeolóxico

Sitúase o afloramento nunha contorna de roca cristalina do Cámbrico-Ordovícico. Esta composición é fundamental, xa que a fracturación deste material rochoso permite a infiltración e a circulación profunda das augas, garantindo as súas propiedades terapéuticas.

4.5.3. Fisuras no val do Salas



Figura 6. Fisuras no val do Salas. Fonte: IGN

Onde se ven as fisuras no val do Salas é por onde pode ascender a auga do subsolo ata a superficie. Observamos en punto vermello a localización da fonte que se sitúa moi próxima á fisura, pola que ascende a auga procedente do fondo onde é roca antiga cristalina, é dicir, metamórfica, datada no Cámbrico-Ordovícico (figura 6).

4.5.4. Localización xeolóxica

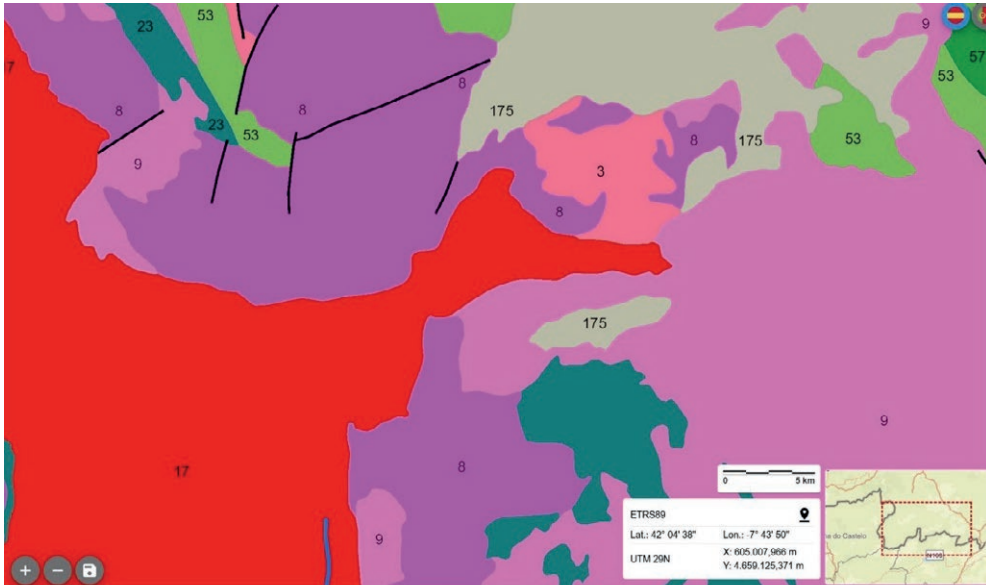


Figura 7. Localización do val do Salas co número 175. Fonte: IGME

Segundo o Instituto Xeolóxico e Mineiro de España (IGME) vese a localización do val do Salas co núm. 175.41° 55' 28.1" N, 7° 47' 07.2" W (figura 7).

4.5.5. Interpretación da figura 9

Segundo o IGME, en datos e mapas do visor de mapas, podemos interpretar a figura 7 do mapa xeolóxico coa axuda da IA; co obxectivo de iniciar unha comprensión da composición do subsolo do val do Salas, fundamental para calquera perforación ou proxecto.

Segundo este mapa xeolóxico do IGME, a zona do val (identificada co número 175) está composta por unidades cuaternarias. A diferenza das rocas antigas que forman a base do terreo, estas unidades son depósitos non consolidados e moito máis recentes. Formáronse durante os últimos 2,58 millóns de anos e consisten en depósitos de aluvión: unha mestura de gravas, areas, limos e arxilas transportadas e depositadas polo río Salas nas chairas de inundación.

O mapa mostra unha lóxica xeolóxica clara: as rocas antigas (número 9), formadas hai centos de millóns de anos, constitúen a base sólida e o esqueleto das ladeiras e zonas elevadas. Sobre elas acumuláronse, no período cuaternario (número 175), os materiais máis recentes, transportados polo río. Por tanto, o subsolo do val é unha superposición de sedimentos novos sobre un baseamento rochoso moi antigo.

É dicir, no val do Salas, a composición do subsolo está marcada pola presenza de unidades cuaternarias, principalmente depósitos de aluvión. Estes materiais superficiais aséntanse sobre un baseamento de rocas metamórficas duras e antigas, datadas no Cámbrico-Ordovícico. Este coñecemento é crucial para calquera proxecto que requira perforacións ou unha análise da permeabilidade do terreo.

4.6. Validación de singularidades. Paisaxe e toponimia de autosuficiencia e economía circular

O val do Salas conserva unha rica toponimia que reflicte con precisión o uso tradicional do territorio e dá testemuño do seu pasado como exemplo representativo de economía circular e autosuficiencia no medio rural galego. Cada pequena parcela, carreiro ou accidente xeográfico posúe un nome específico, transmitido oralmente de xeración en xeración, o que demostra un coñecemento íntimo e funcional da contorna. Esta abundancia toponímica, característica singular da provincia de Ourense, constitúe non só unha valiosa fonte de información etnográfica e cultural, senón tamén unha evidencia do profundo vínculo entre as comunidades locais e a paisaxe. Isto modelábase activamente en función das necesidades agrícolas e gandeiras, organizando o territorio segundo os seus usos específicos: as leiras destinábanse ao cultivo de cereais, de liño, á forraxe para o gando ou á recolección de materias primas como os xuncos, empregados artesanalmente na confección de cestos e capas impermeables para a choiva.

O aproveitamento da auga era clave para a produción: mediante unha rede de regueiros (canles tradicionais) dirixíase o caudal cara aos terreos de cultivo, asegurando a irrigación de forma colectiva e sostible. As familias criaban animais como vacas, bois, galiñas, coellos ou ovellas, cuxa produción se integraba plenamente no ciclo económico local: a la fiábase e tecíase en teares domésticos, elaborábanse queixos, cultivábanse cereais que se moían nos muíños do río, e o pan cocíase semanalmente en fornos comunais, xestionados de forma rotativa entre os veciños.

Esta forma de vida caracterizábase por un alto grao de autosuficiencia: practicamente todos os bens necesarios para a subsistencia eran producidos localmente, e os excedentes, como tenreiros, cabritos ou poldros, destinábanse á venda e xerábanse ingresos complementarios. Todo era aproveitado, sen xerar apenas residuos, nun sistema integrado onde cada recurso tiña un propósito dentro do ciclo de vida comunitario. Así, o val do Salas constituíu un valioso testemuño de sustentabilidade ancestral, baseado no equilibrio entre a natureza, a cultura e a economía rural.

4.6.1. Singularidade da toponimia no val do Salas

No val do Salas o nome alto medieval de Córdoba puido evolucionar a Corva e a Covas [7].

El Monte Córdoba, en la Diócesis de Oporto, aún conserva abiertamente su nombre, con la peculiaridad de que, por ignorancia, los incultos comenzaron a llamarlo Cordova y luego, con mayor distorsión, Monte Corva. Se hará especial referencia a él y a las Basílicas Lasitas del Salvador y San Miguel Arcángel en la historia de las obras y la vida del obispo y confesor San Rosendo, a quien también un día, y con la ayuda de Dios, nos esforzaremos por sacar del anonimato al conocimiento público. (p. 20)

Fue la residencia permanente de estos caballeros (de D. Guterre y doña Ilduara) en su villa de Salas, que estaba lejos de esta ciudad (scil., de Oporto), al pie del monte Corduba, que ahora se ha corrompido al nombre de Corva. Aquí vivió la condesa Ilduara, dedicando todo el tiempo que le sobraba del gobierno de su casa a la oración, en parte por el buen éxito de las empresas del conde, su esposo, quien habitualmente acompañaba a su rey en las guerras contra los moros, le permitió pedir a Dios que le diera un hijo, al que deseaba que las madres dedicaran y consagrasen a su servicio, para poder dejarlo como heredero de sus riquezas.

El lugar donde solía rezar estas oraciones era la iglesia del Salvador, construida en el punto más alto del monte Corva, a la que subía a pie y descalza, a menudo al atardecer. Para que fueran mejor escuchadas, las tomaba como una oración al arcángel San Miguel, de quien siempre había sido muy devota. Dios se complació en concederle su petición, y así un día le hizo prometer, por el glorioso Arcángel, un hijo que sería la luz resplandeciente de su linaje y la gloria de toda España (...). Nueve meses después, los Condes tuvieron a su tan esperado hijo, nacido el 2 de noviembre, fecha en que la Iglesia celebra la festividad de los gloriosos Mártires San Facundo y San Primitivo, en el año 907.

La Condesa le legó su bendición para que lo bautizaran en la iglesia donde Dios lo había encomendado, la Iglesia del Salvador, que se encontraba en la cima de la montaña. Como no había pila bautismal allí, al no ser una iglesia parroquial, lo sacaron del pueblo en una carreta. Sin embargo, el camino era tan accidentado y la subida tan empinada que a los bueyes les resultó imposible llegar a la cima, por lo que a mitad de la colina la carreta se averió. Sin embargo, ni siquiera eso fue suficiente para impedir que la pila bautismal llegara a la iglesia, traída hasta ellos por un milagro, no por la fuerza humana. (p. 21)

4.6.2. Singularidade: os usos da toponimia. Galicia a rexión de maior densidade toponímica de España

O reino Suevo en Galicia deu lugar á máis densa toponimia xermánica de toda España [8]: «Galicia presenta a maior densidade de nomes xeográficos xermanos de toda España» (p. 5).

4.6.3. Multitude de afluentes do Salas

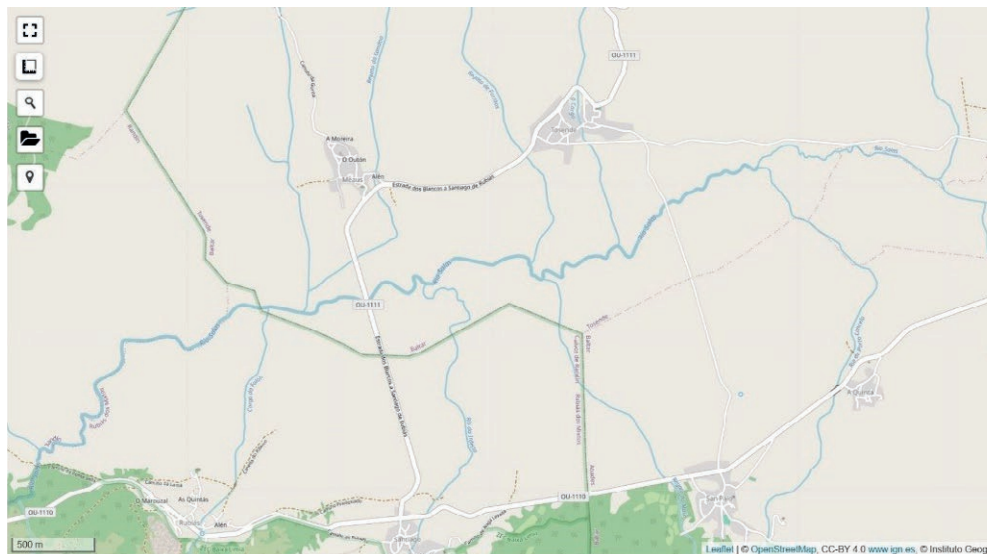


Figura 8. Ríos e arroios no val do Salas. Fonte: IGN. CNIG

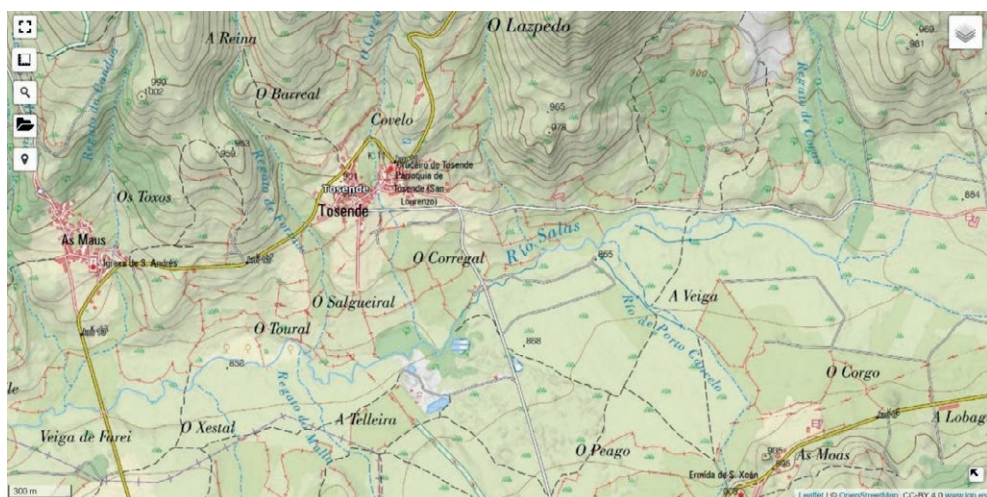


Figura 8. Ríos e arroios no val do Salas. Fonte: IGN. CNIG

Pódense apreciar os ríos e os arroios no val de Salas (figuras 8 e 9). Grazas aos visualizadores do Instituto Xeográfico Nacional [9] podemos nomear algúns afluentes que desembocan no río Salas situado na Veiga. Así, na súa marxe dereita atópanse O «Regato do Corgo», afluente que divide a aldea de Tosende en dous barrios; o «Río de Forzaos» ao oeste da aldea; polo leste o afluente «Regato da Pedrosa»; e na marxe esquerda do río Salas están o «Regato do Mallo» e o «Río Porto Cancelo», que é importante porque é o que pasa preto de «A Fonte do Baño».

5. Liñas futuras para a posta en valor do recurso natural, patrimonial turístico

Segundo os resultados que demostran o triplo valor (etnográfico, terapéutico e patrimonial) da fonte «Do Baño», propóñense as seguintes cinco accións: 1. Recuperación da fonte: actuación para a rehabilitación integral do afloramento, ao comezo do proxecto en total abandono e cuberta de terra, asegurando a canalización e a protección da emanación orixinal. 2. Adecuación de camiños: restauración e acondicionamento dos camiños históricos que conducen á fonte, garantindo un acceso seguro, respectuoso coa contorna e coherente co percorrido etnográfico. 3. Infraestruturas de benestar: instalación de zonas de descanso para os camiñantes. Recoméndase a implementación de marquesiñas vexetais (pérgolas con especies autóctonas) que proporcionen sombra natural e refuxio contra a choiva, ofrecendo un espazo de repouso para quen acuda á fonte, especialmente para o uso tradicional de curación. 4. Sinalización interpretativa: colocación de paneis informativos de alta calidade que divulguen os resultados da investigación (etnografía, termalidade, historia e xeoloxía), permitíndolle ao visitante comprender a riqueza e o significado profundo do lugar. 5. Promoción do destino: Raia Seca e val do Salas: a recuperación da fonte «Do Baño» non será só un acto de protección patrimonial, senón que tamén pode ser unha ferramenta máis para a dinamización turística do destino Raia Seca, Parque Natural do Gerês/Xurés e a comarca da Limia.

Deste xeito, o territorio reforza a súa proxección como destino de benestar, saúde e natureza, consolidando un ecosistema de recursos turísticos complementarios que facilitan a súa promoción conxunta. A conclusión estratéxica é clara: a posta en valor da Fonte do Baño capitaliza a demanda dun turista que busca experiencias auténticas de saúde e conexión coa contorna. Ao recuperar e promocionar este activo, o destino da Raia Seca non só rescata o seu patrimonio, senón que se dota dun elemento diferenciador e competitivo dentro do mercado do turismo de benestar.

5.1 Liñas futuras de posta en valor do recurso natural

Sería necesario continuar coas seguintes cinco liñas, en relación co recurso natural:

1. Realizar labores de mantemento do lugar para permitir o acceso á fonte e o seu uso para baños.
2. Avaliación da potencialidade do recurso hídrico mediante novos estudos hidroxeoquímicos e hidrolóxicos.
3. Realizar máis análises para continuar co estudo do seu potencial terapéutico e turístico, co fin da súa recuperación, posta en valor e protección do manancial; non só como metas en relación coa saúde e coa recuperación do manancial, senón tamén como relevancia de desenvolvemento sostible para a comarca da Limia e da provincia de Ourense.
4. Monitorización da evolución da calidade da auga para avaliar posibles variacións na súa composición ao longo do tempo. Co fin de ser posteriormente declaradas coa condición mineromedicinal de utilidade pública.
5. Estudo da posible captación e aproveitamento sostible da auga para un uso termal ou recreativo.

5.2 Liñas futuras de posta en valor do patrimonio cultural

Tamén se recollen as oito seguintes liñas futuras, en relación co seu valor patrimonial:

1. Ampliar o estudo de testemuños orais sobre o uso tradicional da fonte. Para poder recuperar o seu uso histórico, que no seu día deron servizo á comunidade (segundo Pascual Madoz, estas augas empregábanse para tratar diversas indisposicións).
2. Identificación das aldeas da contorna que acudían historicamente á fonte para tratamentos (Vilamaior da Boullosa, Penalonga, Covas, Sampaio, Baltar, entre outras).
3. Posible incorporación da fonte a rutas de interese termal e patrimonial dentro do concello de Baltar.
4. Documentación histórica complementaria sobre o uso das augas mineromedicinais na zona.
5. Creación de sinalización interpretativa que explique a historia e as características da fonte.
6. Promoción da fonte dentro das iniciativas de turismo sostible e termal do territorio.
7. Estudo de posibles proxectos de dinamización cultural vinculados á tradición termal da zona.
8. Organización de xornadas divulgativas e actividades sobre o valor das augas mineromedicinais.

6. Impacto e innovación

Impacto ambiental como refuxio climático: nos períodos de seca xa houbo na historia, con anterioridade, diminución da capa freática. Polo que adquire importancia a protección das augas e dispoñer de refuxios climáticos.

A importancia da reserva de carbono e da emisión de dióxido de carbono [10].

Durante un período chamado Anomalía Climática Medieval, de 1040 a 1300 d. C., debido á diminución da capa freática, o clima seco reduciu a acumulación de carbono, o que resultou nunha diminución na produción de materia orgánica, e en picos negativos na concentración de carbono (p. 18).

A emisión de CO₂ do chan correlaciónase significativa e positivamente coa humidade relativa, iluminación, temperatura do chan e carbono orgánico do chan. Os resultados obtidos suxiren que as estacións do ano e as variables ambientais son factores que determinan os procesos de respiración e fluxo de CO₂ do chan (p. 46).

O cambio climático supón novos retos para o turismo mundial [11].

No ano 2019 creouse o Marco estratéxico de enerxía e clima, co obxectivo último da descarbonización da economía, e cuxas liñas principais son a «mitigación, adaptación e transición xusta» (Ministerio para a Transición Ecolóxica e o Reto Demográfico). Os piares deste marco son os seguintes:

1. Plan nacional integrado de economía e clima. Recolle os obxectivos relativos á redución de emisións de gases de efecto invernadoiro, de implantación de enerxías renovables e de eficiencia enerxética (Instituto para a Diversificación e Aforro da Enerxía de España).
2. Estratexia de Transición Xusta. Fomenta políticas que aseguren que o tránsito cara á economía descarbonizada sexa xusto socialmente para todos. A lei aprobada en 2021 establece a necesidade de actualizar cada cinco anos esta estratexia (Ministerio para a Transición Ecolóxica e o Reto Demográfico). Algúns dos obxectivos da Estratexia de Transición Xusta son facilitar o aproveitamento das oportunidades que xera a transición ecolóxica, o desenvolvemento de políticas que melloren o apoio ás empresas por parte do Estado, minimizar os impactos negativos nas zonas máis vulnerables etc.

Neste escenario, onde o cambio climático altera os ciclos de carbono e as normativas esixen mitigar o seu impacto nas áreas máis vulnerables, a recuperación da Fonte do Baño preséntase como unha intervención estratéxica. O acondicionamento deste espazo con sombras permite transformar estas zonas de montaña nun auténtico refuxio climático e xera as seguintes cinco repercusións positivas para o territorio: 1. Contribución á investigación sobre termalismo en Galicia. Supón implicacións para estudos futuros en relación co proxecto coa saúde e ofrecer futuros beneficios terapéuticos para a provincia

de Ourense. 2. Dinamización da comarca da Limia. Estes achados iniciais influirán na nosa comprensión dun campo relevante, como o do aproveitamento histórico das augas termais na comarca da Limia e na súa contorna. Co obxectivo de recuperar e poñer en valor a Fonte do Baño, permitir que a comunidade local e os visitantes poidan beneficiarse do seu uso. 3. O proxecto pode axudar a dar a coñecer a realidade social e documentar tradicións nunha zona transfronteiriza con Portugal, dando a coñecer os elementos únicos e valiosos desta realidade lindeira. 4. Non é menos importante a contribución que pode ofrecer xerar un novo punto de atracción. Contribución económica, que sexa capaz de xerar un fluxo de visitantes desde os dous lados da fronteira, que pode ser aproveitado, pola iniciativa privada. E tamén contribución social, ao ofrecer equipamento e un novo punto de encontro para os habitantes da comarca. 5. A innovación desta proposta reside na rehabilitación e recuperación dun recurso que, malia ter un valor patrimonial e terapéutico, caeu no esquecemento. A súa recuperación non só permitirá o seu aproveitamento, senón que tamén o converterá nun elemento novo dentro da oferta termal da provincia.

7. Conclusión

A Fonte do Baño, no val do Salas, representa un recurso natural e cultural de valor singular para o concello de Baltar, a comarca da Limia e a provincia de Ourense. O abandono no que estaba sumida supoñía a perda dun elemento con potencial para o desenvolvemento de actividades termais e turísticas. Este proxecto é un primeiro paso para a recuperación deste espazo que permitirá non só a preservación do seu legado histórico, senón tamén a súa reintegración como recurso de benestar e turismo sustentable.

A posta en valor desta fonte, combinada cunha estratexia de recuperación ambiental e promoción turística, contribuirá ao desenvolvemento local e ao reforzo da identidade cultural do territorio. A análise das súas augas e o seu estudo mineromedicinal poderá abrir novas oportunidades para o seu uso público e aproveitamento terapéutico tradicional. Así mesmo, a súa inclusión en rutas termais e a integración en iniciativas de turismo sostible poderían atraer visitantes interesados no termalismo e no patrimonio natural da zona.

Polo tanto, representa unha oportunidade máis para dinamizar economicamente a comarca da Limia, potenciando o turismo sostible e a valorización do patrimonio hídrico, que abrirá novas vías para o desenvolvemento rural baseado no aproveitamento sostible do patrimonio natural e termal.

Referencias

- [1] Comunidad Autónoma de Galicia. (2020, 10 de enero). Ley 8/2019, de 23 de diciembre, de regulación del aprovechamiento de los recursos lúdicos de aguas termales de Galicia. *Diario Oficial de Galicia*, (6). <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-1850>
- [2] Palomanes, P. (30/09/2021). Martín Rivas: “En Tosende ao labrar as leiras descubrían pezas arqueolóxicas”. *La Región*. https://www.laregion.es/a-limia/martin-rivas_1_20210930-2242979.html
- [3] Madoz, P. (1845-1850). Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de Ultramar. Tomo 1. p. 32. [ABA-ALICANTE]. <https://www.cervantesvirtual.com/obra/diccionario-geograficoestadistico-historico-de-espana-y-sus-posesiones-de-ultramar-tomo-1-abaalicante--0/>
- [4] Toral, M. P. (2015). Léxico tradicional para la superficie agraria en inventarios del siglo XVII. *Revista de Historia de la Lengua Española*, (10), 77-103. <https://rhle.es/index.php/revista/article/view/293/183>
- [5] Pallares Méndez, M.C. (2004). Escolma de textos relacionados con Ilduara, Ilduara, una aristócrata del siglo X, Seminario de Estudos Galegos, 2004. Consello da Cultura Galega. Comisión de Igualdade. Traducción ao galego: Eva Vieites Salmonte. https://consellodacultura.gal/mediateca/extras/ccg_pr_a19-mulleres_escolma-ilduara.pdf
- [6] Instituto Geográfico Nacional (s.f). Fototeca Digital del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). <https://www.ign.es/web/ign/portal> y <https://fototeca.cnig.es/fototeca/> y Lidar: <https://www.ign.es/iberpix/visor/>
- [7] Andrade Cernadas, J. M. (1994). O tombo de Celanova: Estudio introductorio, edición e índices (ss. IX-XII) (M. Díaz Tie & F. J. Pérez Rodríguez, Colabs.). Consello da Cultura Galega. <https://books.google.gm/books?hl=es&id=mF5pAAAAMAAJ&focus=searchwithinvolume&q=celare>
- [8] De Rossi, M. I. C. (1988). Participación monástica en el control de la repoblación. El monasterio de San Salvador de Celanova en el siglo x. *Cuadernos de Historia de España*, (70), 5-59. <http://revistascientificas.filo.uba.ar/index.php/ch/article/view/15795/14942>
- [9] Instituto Geográfico Nacional (s.f). Fototeca Digital del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Vuelos fotogramétricos. <https://visualizadores.ign.es/comparadormapas/>

[10] Mamani Mamani, M. (2024). Reserva de carbono y emisión de dióxido de carbono del bofedal en el sector Vizcachani, distrito de Capaso, El Collao-2022. https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/945/Mauro_MAMANI_MAMANI.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[11] García Negreira, R. (2024). Cambio climático y nuevos retos del turismo mundial. <https://ruc.udc.es/rest/api/core/bitstreams/86e5074a-93a5-4e73-aa4a-d87124b0e099/content>

Poboación centenaria ourensá: unha proposta de zona de extrema lonxeidade no sur de Galicia

M. Isorna

*Facultade de Ciencias da Educación e Traballo Social.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo.*

isorna.catoira@uvigo.gal

J. M. Failde

*Facultade de Ciencias da Educación e Traballo Social.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo.*

jmfailde@uvigo.gal

M. Dapía

*Facultade de Ciencias da Educación e Traballo Social.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo.*

ddapia@uvigo.gal

F. Braña

*Facultade de Ciencias da Educación e Traballo Social.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo.*

fatimab@uvigo.gal

Resumo

A provincia de Ourense constitúe un dos territorios con maior concentración de persoas centenarias en Galicia, tanto en termos absolutos coma en taxas axustadas pola poboación histórica. Este capítulo presenta unha síntese dos resultados dun proxecto que analizou de maneira integral a lonxeidade extrema na provincia, combinando métodos cuantitativos e cualitativos para identificar unha posible zona de extrema lonxeidade no sur de Galicia (ZEL-sur) e caracterizar os estilos de vida e contextos asociados á supervivencia excepcional.

Nun primeiro bloque realizouse unha análise demográfica exhaustiva a partir de microdatos do Instituto Nacional de Estatística (INE) e do Instituto Galego de

Estatística (IGE), calculando taxas de *centenariedade* para o total dos concellos ourensáns e elaborando mapas de prevalencia. O resultado final é unha área compacta de 28 concellos cunha concentración extraordinaria de persoas centenarias (entre 734 e 1669 por cada 100 000 nados). As comarcas de Terra de Caldelas, A Limia, O Carballiño e Allariz-Maceda destacan por presentar taxas medias moi elevadas, nun contexto de altitude media-alta, clima oceánico semicontinental, baixa densidade poboacional e forte presenza de estilos de vida rurais.

Nun segundo bloque desenvolveuse un estudo cualitativo con 30 persoas centenarias residentes na ZEL-sur, que permitiu contextualizar os datos estatísticos. As entrevistas en profundidade revelan padróns consistentes: alimentación tradicional baseada en produtos de autoprodución, actividade física continuada ao longo da vida, baixo consumo de medicación, resiliencia emocional, espiritualidade arraigada e redes familiares e comunitarias sólidas.

En conxunto, os achados apuntan a unha interacción complexa entre factores ambientais, socioculturais e biográficos, que configuran un ecosistema especialmente propicio para a lonxevidade extrema. A ZEL-sur emerxe así como unha área de especial interese científico, cuxo estudo continuado pode contribuír a orientar políticas de envellecemento saudable, cohesión territorial e valorización do medio rural.

Palabras clave: lonxevidade extrema, centenarios, Ourense, ZEL-sur e envellecemento saudable.

1. Introducción

Nas últimas décadas, a investigación sobre o envellecemento poboacional ten avanzado cara a unha análise máis fina das idades extremas e pon o foco na chamada lonxevidade excepcional; isto é, na capacidade dalgúns persoas e comunidades para alcanzar ou superar os 100 anos conservando, en maior ou menor medida, a saúde, a autonomía e a funcionalidade [1, 2]. Este interese enmárcase no avance da demografía da lonxevidade, disciplina que analiza tanto a aparición das primeiras persoas que alcanzan as idades máis avanzadas coma o comportamento da mortalidade nos límites actuais da vida humana [2].

No ámbito internacional, unha parte deste debate articulouse arredor do concepto de «zonas azuis», empregado para designar territorios onde se observan proporcións particularmente elevadas de persoas moi lonxevas en comparación co esperado segundo os padróns nacionais [3, 4]. Porén, a expansión mediática da etiqueta non sempre foi acompañada dun escrutinio metodolóxico equivalente: diversas achegas recentes teñen amosado que, en varias rexións popularizadas como «zonas azuis», a calidade

dos rexistros, a validación das idades e a consistencia dos indicadores demográficos son desiguais [5, 6, 7]. A isto engádense evidencias que poñen de relevo a posibilidade de artefactos estatísticos asociados a erros de rexistro, migracións selectivas ou efectos de selección dos superviventes, o que obriga a extremar a cautela á hora de interpretar concentracións aparentes de centenarios [2, 5, 6].

Desde unha perspectiva estritamente demográfica, Poulain e Herm [4, 8] propoñen recuperar o termo «zona azul» como categoría analítica e non só divulgativa, reservándoo para áreas onde existan datos de alta calidade, procedementos formais de verificación de idade e comparacións robustas coas poboacións de referencia. Complementariamente, análises históricas de cohortes dos Países Baixos suxiren que certas «concentracións» de centenarios poden ser explicadas por dinámicas demográficas de longo prazo sen necesidade de recorrer a narrativas sobre estilos de vida extraordinarios [9]. O panorama actual é, polo tanto, ambivalente: por unha banda, existen territorios cunha evidencia relativamente sólida de lonxevidade excepcional; pola outra, aumenta a esixencia metodolóxica para aceptar esa etiqueta [1, 7].

Paralelamente a esta discusión sobre os datos, foise configurando un certo consenso arredor dos factores que parecen asociarse con mellores traxectorias de envellecemento nas rexións máis estudadas. Entre eles destacan os padróns alimentarios baseados en produtos frescos e predominantemente vexetais, unha actividade física de baixa intensidade pero sostida no tempo, redes sociais e familiares densas, un sentido de propósito vital claramente articulado, niveis moderados de estrés crónico e unha cobertura sanitaria suficiente [3, 10]. A literatura epidemiolóxica e psicosocial apoia estes elementos: a dieta mediterránea e afíns vincúlase cun menor risco cardiovascular e maior supervivencia [11], o contacto habitual con contornos naturais asóciase con beneficios cognitivos e emocionais [12], e as persoas con vínculos sociais máis fortes presentan unha redución significativa da mortalidade fronte a quen ten redes máis febles [13]. Así mesmo, o estrés crónico e as respostas de afrontamento diferenciado teñen un impacto relevante na saúde cardiovascular e na mortalidade [14].

No plano biolóxico, os estudos de xenética da lonxevidade coinciden en que a herdanza contribúe a explicar unha fracción limitada, aínda que importante, da variabilidade na supervivencia a idades extremas, sempre en interacción cos estilos de vida e co medio [15, 16]. En cambio, desde a saúde pública sublíñase que os sistemas sanitarios, malia seren imprescindibles, explican só unha parte relativamente modesta das diferenzas de saúde e mortalidade entre poboacións; os determinantes sociais, condutuais e ambientais adoitan ter un peso máis decisivo [17, 18, 19]. O papel dos servizos sanitarios, incluído o sistema universal galego, enténdese así máis como un mecanismo de protección fronte á enfermidade que como o principal motor da lonxevidade excepcional.

Se trasladamos este marco a Galicia, emerxe un perfil que resulta particularmente suxectivo. A dieta atlántica tradicional –con alto consumo de peixe e marisco, verduras, legumes, cereais integrais e aceite de oliva– comparte numerosos trazos cos modelos mediterráneos asociados a menor risco cardiovascular e mellores resultados de saúde [11]. A iso engádese, en moitas zonas rurais, unha actividade física moderada ligada ao traballo no campo e ao desprazamento a pé, así como un contacto continuado con espazos verdes e paisaxes agrarias, que a literatura relaciona con efectos beneficiosos sobre a cognición e o benestar [12]. As comunidades galegas caracterízanse tamén por redes familiares e veciñais estreitas, con fortes normas de apoio e coidado interxeracional, coherentes coas evidencias que amosan a importancia das relacións sociais na supervivencia [13].

Dentro deste contexto, a provincia de Ourense destaca pola elevada proporción de persoas centenarias, o que abre unha oportunidade singular para examinar en profundidade a interacción entre territorio, estilos de vida e envellecemento. A combinación de orografía de montaña e media montaña, clima oceánico semicontinental, tradición agraria e estruturas comunitarias cohesionadas suxire a existencia dun contorno especialmente propicio para o envellecemento lonxevo, en liña con outros territorios onde se teñen descrito padróns de lonxevidade concentrada [1, 4]. Traballos previos da Sociedade Galega de Xerontoloxía e Xeriatría e do grupo LONG-AGING da Universidade de Vigo teñen sinalado a presenza de concellos con taxas moi elevadas de centenarios, aínda que carecíamos ata o de agora de análises espaciais sistemáticas e de verificación demográfica detallada.

O proxecto INOU-06 2025 inscríbese precisamente nesta lagoa de coñecemento: o seu propósito central é examinar a lonxevidade extrema na provincia de Ourense mediante unha estratexia mixta que combina análise demográfica e territorial da distribución da *centenariedade* cun estudo cualitativo das traxectorias vitais, dos estilos de vida e das interpretacións que as propias persoas centenarias fan do seu envellecemento. O capítulo que segue sintetiza os principais achados deste traballo e sitúa a proposta de zona de extrema lonxevidade do sur de Galicia (ZEL-sur) no contexto máis amplo da discusión internacional sobre zonas azuis e áreas de lonxevidade excepcional [1, 4, 7].

Os obxectivos específicos foron:

Identificar e *mapear* as zonas da provincia de Ourense con maior e menor concentración de persoas centenarias, mediante o cálculo de taxas axustadas e a súa representación cartográfica.

- Determinar unha posible zona de extrema lonxevidade no sur de Galicia (ZEL-sur), caracterizada por concentracións estatisticamente significativas de persoas centenarias respecto do conxunto provincial.
- Caracterizar sociodemograficamente a poboación centenaria ourensá, atendendo a variables como sexo, contorno residencial, estrutura familiar e continuidade residencial ao longo da vida.
- Analizar, a través de entrevistas en profundidade, os estilos de vida, valores e significados asociados ao envellecemento extremo nas persoas residentes na ZEL-sur, en diálogo cos factores descritos na literatura internacional sobre zonas de lonxevidade excepcional.

2. Metodoloxía

2.1 Deseño xeral

O estudo adoptou un deseño mixto, combinando un bloque cuantitativo de análise demográfica e territorial cun bloque cualitativo baseado en entrevistas en profundidade. Esta estratexia permitiu integrar datos macro (taxas, mapas e indicadores comarcais) con narrativas micro sobre a experiencia de envellecer máis alá dos 100 anos.

2.2 Fonte de datos e poboación de estudo

Os datos cuantitativos proceden das bases do Instituto Nacional de Estatística (INE) e do Instituto Galego de Estatística (IGE). A través do INE solicitáronse microdatos para determinar o número de persoas centenarias vivas e falecidas, nadas en concellos da provincia de Ourense entre 1903 e 1923. Do IGE obtivéronse datos de poboación histórica (censos de 1910 e 1920) e información demográfica recente. Ademais, recolléronse os nacementos acontecidos entre 1903 e 1923 mediante a consulta aos rexistros civís da provincia.

A poboación diana inclúe todas as persoas que acadaron ou superaron os 100 anos entre 2003 e 2023, nadas en concellos da provincia de Ourense e pertencentes aos municipios incluídos na ZEL-sur, é dicir, as nadas entre 1903 e 1923 nos devanditos concellos.

No bloque cualitativo, a mostra final estivo composta por trinta persoas centenarias (idade media: 102,83 anos, rango 100-109), seleccionadas entre residentes nos concellos identificados como de alta lonxevidade.

2.3 Procedemento e fases do traballo

O procedemento desenvolveuse en varias fases encadeadas:

1. Solicitude ao INE de microdatos de persoas centenarias nadas en Galicia (1903-1923) e identificación das nadas na provincia de Ourense.
2. Cálculo das taxas de *centenariedade* por provincias galegas e elaboración de mapas de prevalencia para identificar áreas de maior concentración de centenarios.
3. Cálculo detallado das taxas na totalidade dos concellos ourensáns seleccionados, utilizando como denominador tanto a poboación histórica coma o número de nacementos entre 1903 e 1923.
4. Identificación de posibles zonas de extrema lonxevidade na provincia, mediante mapas de coropletas e clasificación por cuartís.
5. Revisión nos rexistros civís dos concellos incluídos na posible zona de estudo para verificar o número de nacementos (1903-1923) e axustar as taxas.
6. Visita a unha mostra representativa de rexistros civís para contrastar o número de nacementos e defuncións (2003-2023) e garantir a calidade dos datos.
7. Elaboración do mapa final da ZEL-sur e selección dos concellos integrantes, mediante o calculo do índice de extrema lonxevidade (IEL) axustado.
8. Deseño e aplicación do estudo cualitativo: selección de participantes, realización de entrevistas en profundidade, gravación, transcripción e análise temática.

2.4 Técnicas de análise

Os datos cuantitativos foron procesados mediante unha folla de cálculo Excel e o paquete estatístico IBM SPSS Statistics 24. As taxas de *centenariedade* transformáronse en valores por 100 000 habitantes ou por 100 000 nacementos, segundo o caso. A representación cartográfica realizouse con QGIS 3.4.11, empregando mapas de coropletas e escalas por cuartís.

No bloque cualitativo realizouse unha análise temática, combinando codificación aberta e axial sobre as transcripcións das entrevistas, apoiándose en matrices elaboradas en Excel e nos criterios de saturación teórica.

3. Resultados

3.1 Resultados cuantitativos

3.1.1 Distribución da poboación centenaria en Galicia e Ourense

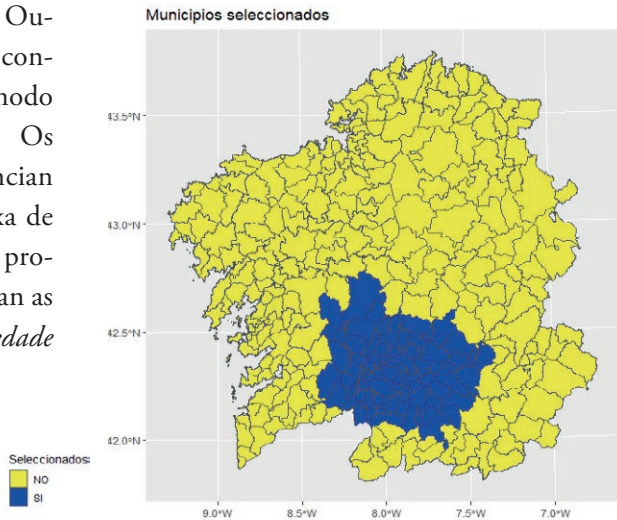
Entre 2004 e 2023 rexistráronse en Galicia 9557 persoas centenarias, das que 1950 naceran na provincia de Ourense. A Coruña e Ourense presentan as taxas brutas e os índices de lonxevidade extrema máis elevados, por enriba do 100 % cando se axusta pola poboación histórica.

	Poboación 1910	Poboación 1920	Poboación interpolada	Centenarios entre 2003–2024	Tasa por 100 000 Habitantes dende 2003–2024
A Coruña	648 264	686 698	667 481	3289	492,75
Lugo	466 734	456 693	461 713	2153	466,33
Ourense	399 760	400 256	400 008	1950	487,49
Pontevedra	465 307	503 850	484 578	2165	446,50
Galicia	1 980 065	2 047 497	2 013 781	9557	474,58

Táboa 1. Taxa de centenarios (2004-2023) por 100 000 habitantes segundo a poboación histórica

A análise intraprovincial en Ourense mostra que non todos os concellos envellecen do mesmo modo nin coa mesma intensidade. Os mapas de prevalencia evidencian un gradiente claro, cunha franxa de concellos no norte e no oeste da provincia de Ourense que concentran as taxas máis elevadas de *centenariedade* (figura 1).

Figura 1. Área inicial de concellos do sur de Galicia con taxas destacadas de centenariedade



3.2 Delimitación da ZEL-sur

Tras recalcular as taxas en función do número real de nacementos (1903-1923), elaborouse un novo mapa que permitiu identificar un subconxunto de concellos cunha concentración especialmente elevada de centenarios (entre 711,87 e 1670 por 100 000 habitantes).

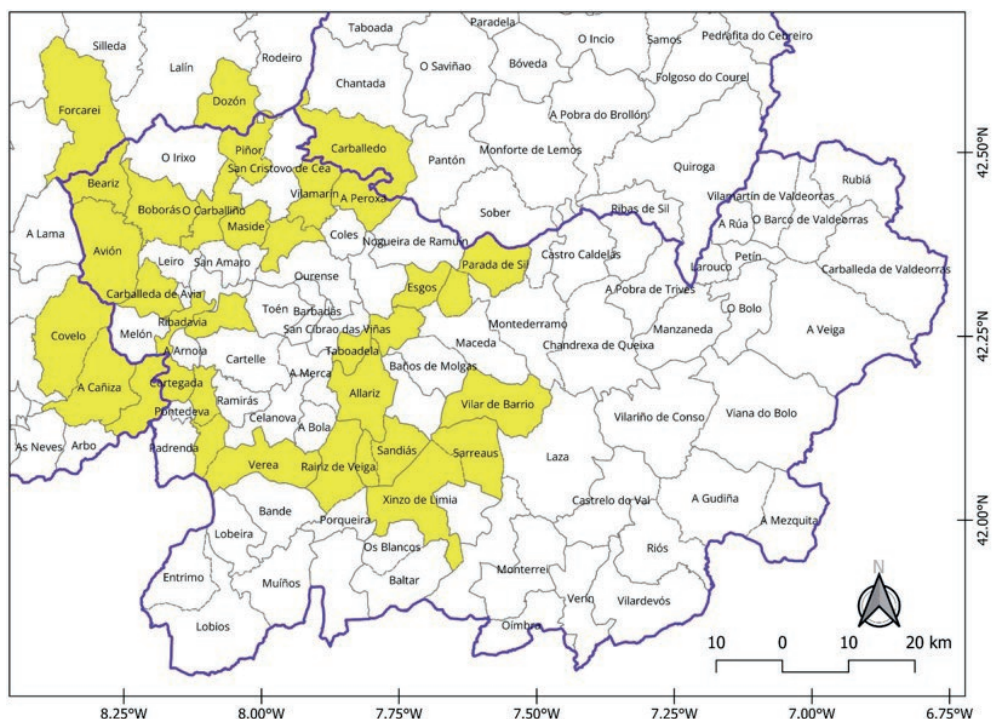


Figura 2. Solución final de 28 concellos ourensáns para o estudo como posible zona de extrema lonxevidade (ZEL-sur)

A eliminación progresiva de concellos periféricos con taxas máis baixas mellorou a compactación territorial da área de estudo. Isto deu lugar a unha proposta final de 28 concellos que integran a ZEL-sur (véxase a táboa 2 e a figura 2).

En conxunto, os 28 concellos suman 75 041 nacementos e 810 persoas centenarias, cunha taxa global de 1079,41centenarios por 100 000 nacementos e un rango intermunicipal entre 734 e 1669. Estes valores son comparables aos descritos noutras áreas internacionais de lonxevidade excepcional.

Concello	Núm. de nacementos 1904–1923	Núm. de centenarios 2003–2023	Taxa	Altitude media
Avión	3051	36	1180	597 m
Allariz	6047	59	976	591 m
Beariz	1618	27	1669	610 m
Amoeiro	2415	27	1118	348 m (87 — 500m)
Boborás	4306	41	952	424 m
Carballeda de Avia	2266	23	1015	346 (69–827 m)
Castrelo de Miño	3149	30	953	285 m (69–710 m)
Cortegada	1839	20	1088	198 m (65–417)
Esgos	1760	23	1307	597 m
Gomesende	1880	22	1170	397 (71–936 m)
Maside	3824	34	889	389 (264–469 m)
O Carballiño	5449	40	734	420 m
Paderne de Allariz	2435	20	821	512 m
Parada de Sil	2014	73	1142	751 m
A Peroxa	4257	42	987	476 m
Piñor	1962	21	1070	570 m
Quintela de Leirado	1350	14	1037	694 m
Rairiz de Veiga	2103	21	999	699 m
Ribadavia	4371	35	801	271 (66–710 m)
Sandiás	1544	18	1166	661 m
Sarreaus	2146	24	1118	718 m
Taboadela	1834	22	1200	440 m
Verea	2333	20	857	965 m
Vilamarín	2205	25	1134	441 m
Vilar de Barrio	1927	19	986	720 m
Vilar de Santos	894	10	1119	670 m
Xinzo de Limia	4988	49	982	725 m
Xunqueira de Espadanedo	1074	15	1397	856 m
Global	Total de nacementos 75 041	Total de centenarios 810	Taxa global 1079,41	Rango 734–1669

Táboa 2. Nacementos (1903–1923), número de centenarios (2003–2023)
e taxa por 100 000 habitantes na ZEL-sur

3.3 Perfil sociodemográfico e territorial das comarcas de alta lonxevidade

A análise comarcal sitúa Terra de Caldelas, A Limia, O Carballiño e Allariz-Maceda como os principais polos de lonxevidade extrema, con taxas medias superiores aos 1000 centenarios por 100 000 habitantes. Estas comarcas comparten:

- Altitude media elevada (entre 400 e 850 metros).
- Clima oceánico semicontinental, con invernos fríos e veráns cálidos (figura 3).
- Baixa densidade poboacional.
- Forte presenza de estilos de vida rurais e continuidade residencial.

A figura 5 mostra a distribución dos bioclimas de Galicia e permite contextualizar a ZEL-sur dentro das áreas de clima oceánico semicontinental.

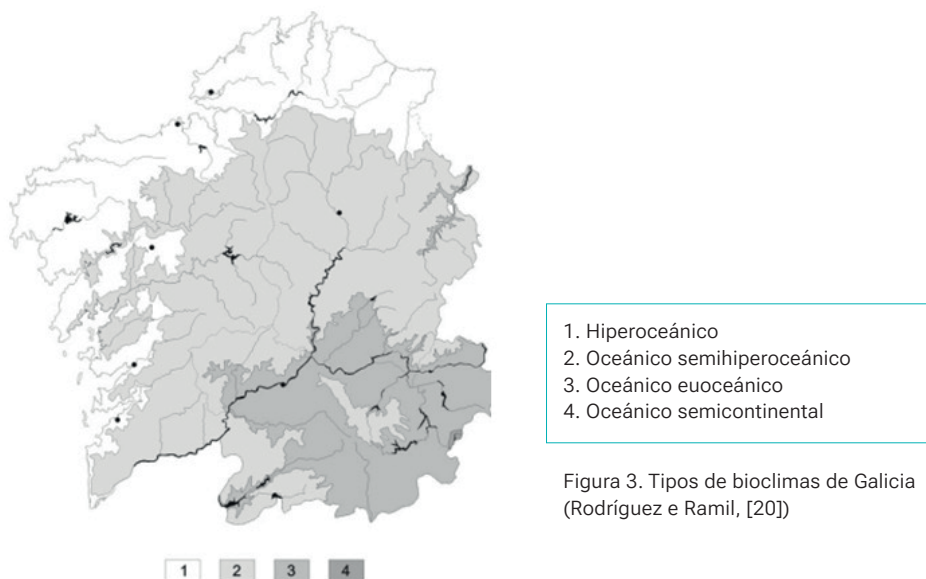


Figura 3. Tipos de bioclimas de Galicia (Rodríguez e Ramil, [20])

3.4 Resultados cualitativos

3.4.1 Características da mostra

Das 35 entrevistas realizadas, cinco foron descartadas por puntuacións no GDS ≥ 4 ; a mostra final quedou en trinta persoas centenarias, cunha idade media de 102,83 anos e unha proporción aproximada de tres mulleres por cada home. A maioría eran

viúvas, con antecedentes familiares de pais ou nais lonxevos, niveis socioeconómicos medio-baixos e unha traxectoria laboral ligada a ocupacións físicas pouco cualificadas no ámbito agrícola, gandeiro e doméstico.

Funcionalmente, a media no índice de Barthel foi de 66,23 puntos (rango 25-100), indicando un grao relevante de independencia nas actividades básicas da vida diaria. A media no GDS (2,66) é compatible cunha deterioración cognitiva leve, coherente cos criterios de inclusión.

3.4.2 Estilos de vida e hábitos nutricionais

As entrevistas revelan unha forte adherencia á dieta tradicional, con consumo habitual de produtos de autoprodución (hortas, gando, viño da casa) e escasa exposición a alimentos ultraprocesados ao longo da vida. A moderación alimentaria e o ritmo pausado nas comidas son trazos recorrentes nos relatos.

«Na casa dos campesiños todo dios tiñamos que criar un ou dous porquiños..., e tiñamos galiñas, verdura, patacas e viño.» (H4, 100, 580-585)

«Vale máis quedar con fame que ir moi farto.» (H15, 101, 569)

O consumo moderado de viño tinto, especialmente ao mediodía, aparece normalizado e asociado a unha sociabilidade cotiá.

3.4.3 Actividade física, saúde percibida e uso de medicación

A vida das persoas entrevistadas está marcada pola actividade física continuada, derivada do traballo no campo, co gando ou na casa. Moitas delas seguen mantendo rutinas activas, como camiñar ou bailar, incluso pasados os 100 anos.

«Vou bailar toda a tarde e mañá e o domingo tamén.» (M8, 106, 1127)

A percepción da saúde ao longo da vida é sorprendentemente positiva, cunha presenza limitada de enfermidades graves e un uso moderado da medicación, centrado en tratamentos puntuais.

3.4.4 Afrontamento emocional, espiritualidade e redes de apoio

Os discursos mostran altos niveis de resiliencia, capacidade de aceptación e actitude positiva, malia as dificultades vividas.

«Eu era así, positiva. Veña para adiante.» (M2, 102, 128)

A espiritualidade, fundamentalmente a práctica católica, funciona como fonte de consolo, sentido e estrutura vital.

«Eu teño que agradecerlle a Deus moito, porque me concedeu moitas cousas.» (H21, 102, 859)

As redes familiares e comunitarias son densas e estables, con fortes vínculos entre xeracións e unha alta percepción de apoio.

4. Discusión

A delimitación dunha zona de extrema lonxevidade no sur de Galicia (ZEL-sur), sustentada en cohortes históricas verificadas e na contrastación rexistral individualizada, constitúe unha achega relevante ao debate europeo sobre a lonxevidade excepcional. As taxas observadas –cun rango municipal entre 734 e 1669 centenarios por cada 100 000 nados e unha media global superior aos 1000– reflicten un padrón territorial consistente que supera amplamente a media autonómica. Este achado adquire un significado particular no contexto académico actual, no que se intensificou o escrutinio crítico sobre os supostos *hotspots* de lonxevidade [5, 6]. Así mesmo, os índices de extrema lonxevidade obtidos na ZEL-sur (IEL = 1079) duplican os rexistrados nunha das zonas azuis mellor caracterizadas e emblemáticas, Oligastra, en Sardeña, cuxo IEL se sitúa nos 509 centenarios por cada cen mil habitantes [21].

A diferenza de investigacións baseadas exclusivamente en rexistros agregados contemporáneos, o presente estudo adopta unha reconstrución lonxitudinal a partir de cohortes nadas entre 1903 e 1923, incorporando verificación nos rexistros civís e nos padróns municipais. Este enfoque responde ás recomendacións metodolóxicas formuladas por Barbi *et al.* [2], quen subliñan a necesidade de empregar datos fiables e contrastados para evitar artefactos derivados de erros documentais ou de migracións selectivas en idades avanzadas. Do mesmo xeito, alínase coa proposta conceptual de Poulain e Herm [8], que defenden reservar a identificación de áreas de lonxevidade excepcional a contextos nos que exista unha validación exhaustiva das idades e unha consistencia territorial do fenómeno.

Desde unha perspectiva espacial, a concentración de taxas elevadas en municipios contiguos do rural ourensán suxire a existencia dun clúster demográfico estrutural máis que a presenza de valores atípicos illados. A relativa homoxeneidade do núcleo central –coa maioría dos municipios situados entre 900 e 1200 centenarios por cada 100 000 nados– reforza a coherencia interna da área delimitada. Este padrón continuo constitúe un criterio fundamental para validar zonas de lonxevidade, tal como sinalan Poulain *et al.* [22], ao insistiren na necesidade de distribucións territoriais estables e non simplemente puntuais.

En termos ambientais, unha parte significativa dos municipios con maiores taxas localízase en áreas de media montaña ou con amplos rangos altitudinais. Aínda que o deseño ecolóxico do estudo non permite establecer relacións causais, a configuración orográfica e bioclimática podería constituír un factor contextual relevante. Investigacións previas teñen suxerido que determinados contornos de montaña, caracterizados por menor contaminación e maiores niveis de actividade física cotiá asociada ao relevo,

poderían vincularse con vantaxes en saúde cardiovascular e supervivencia [23]. Con todo, calquera interpretación nesta liña debe considerarse provisional e requirirá estudos específicos que integren variables ambientais individuais.

Nun plano máis amplo, a ZEL-sur comparte certos trazos cuantitativos con outras áreas descritas na literatura internacional sobre lonxevidade concentrada [21]. Porén, convén evitar equiparacións automáticas coas denominadas «zonas azuis», popularizadas por Dan Buettner [3, 12]. A literatura recente evidenciou que moitas destas rexións presentan heteroxeneidade na calidade dos rexistros e nos procedementos de validación [2, 5, 8]. En consecuencia, os resultados aquí presentados deben interpretarse como a identificación dun padrón demográfico específico e verificable, sen extrapolar analoxías internacionais ata dispoñer de estudos comparativos metodoloxicamente homoxéneos.

O estudo non incorpora nesta fase variables biomédicas, xenéticas ou condutuais, polo que non permite atribuír o fenómeno observado a factores causais concretos. Non obstante, a literatura epidemiolóxica e psicosocial documentou asociacións entre lonxevidade e redes sociais sólidas [13], regulación do estrés [14] ou interacción con contornos naturais [12]. Desde o ámbito biolóxico, recoñécese que a xenética contribúe parcialmente á supervivencia extrema, sempre en interacción con factores ambientais [15, 16]. A integración destas dimensións constitúe unha liña prioritaria para futuras investigacións.

O presente traballo enmárcase nun proxecto máis amplo orientado a estimar a prevalencia da extrema lonxevidade en Galicia, cartografar a súa distribución e analizar factores asociados de carácter biográfico, social e biomédico. Entre as liñas futuras destacan: i) profundar na análise comparada con outras áreas galegas potencialmente lonxevas; ii) incorporar estudos individuais que integren traxectorias de saúde e mobilidade residencial; iii) desenvolver investigacións cualitativas sobre estruturas familiares e capital social; iv) explorar marcadores biolóxicos e perfís xenéticos asociados á supervivencia extrema; e v) analizar determinantes ambientais e socioeconómicos en perspectiva histórica.

Estas aproximacións permitirán determinar se o padrón identificado responde a un conxunto de factores compartidos ou á converxencia de múltiples condicións heteroxéneas.

Finalmente, cómpre sinalar algunhas limitacións. O carácter ecolóxico da análise impide trasladar os resultados ao nivel individual ou establecer causalidade. A reconstrución de cohortes históricas, aínda que reforzada mediante verificación rexistral, pode incorporar pequenas imprecisións inherentes á interpolación censal. Así mesmo, o uso do lugar de nacemento como criterio de referencia non capta a mobilidade ao longo do ciclo vital. Por último, a delimitación territorial combina criterios estatísticos

e xeográficos, polo que podería refinarse mediante modelos espaciais máis avanzados. Con todo, a consistencia do padrón observado e a solidez das fontes empregadas avalan a existencia dun clúster demográfico real de lonxevidade extrema no sur de Galicia.

A análise confirma a presenza dunha concentración territorial de lonxevidade extrema no sur de Galicia, caracterizada por taxas de centenarios claramente superiores á media autonómica e distribuídas de maneira coherente nun conxunto amplo de municipios contiguos. A robustez metodolóxica –baseada en cohortes históricas verificadas e contraste rexistral– proporciona un nivel de fiabilidade que permite considerar a ZEL-sur como unha área demográfica de especial interese científico.

Con todo, a identificación do clúster constitúe un punto de partida. A comprensión dos mecanismos que poidan estar asociados a esta concentración de supervivencia excepcional requirirá investigacións multidisciplinares que integren datos demográficos, biomédicos, psicolóxicos e socioculturais, así como deseños capaces de vincular características individuais con contextos territoriais específicos.

Referencias

- [1] Candal-Pedreira, C., Rey-Brandariz, J., Martín-Gisbert, L., Teijeiro, A., García, G., Ruano-Ravina, A., & Pérez-Ríos, M. (2025). Blue Zones: An analysis of existing evidence through a scoping review. *Aging and Disease*. Advance online publication. <https://doi.org/10.14336/AD.2025.0461>
- [2] Barbi, E., Lagona, F., Marsili, M., Vaupel, J. W., & Wachter, K. W. (2018). The plateau of human mortality: Demography of longevity pioneers. *Science*, 360(6396), 1459–1461. <https://doi.org/10.1126/science.aat3119>
- [3] Buettner, D. (2008). The Blue Zones: Lessons for living longer from the people who've lived the longest. *National Geographic*.
- [4] Poulain, M., & Herm, A. (2025a). Blue Zone, a demographic concept and beyond. *American Journal of Lifestyle Medicine*, 19(5), 469–484. <https://doi.org/10.1177/15598276251342502>
- [5] Newman, S. (2024a). Centenarian hotspots: Demographic reality or statistical mirage? *Journal of Population Research*, 41(2), 123–140. <https://doi.org/10.1007/s12546-024-09321-7>
- [6] Newman, S. J. (2024b). Supercentenarians and the oldest old are concentrated in regions with no birth certificates and short lifespans. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2024.01.04.574333>

- [7] Caruso, C., Accardi, G., Aiello, A., Calabrò, A., Zarcone, R., & Candore, G. (2025). The longevity of Blue Zones: Myth or reality. *Journal of Gerontology and Geriatrics*, 73(2), 70–81. <https://doi.org/10.36150/2499-6564-N865>
- [8] Poulain, M., & Herm, A. (2025b). Exceptional longevity and the Blue Zones: A demographic perspective. *Journal of Gerontology: Social Sciences*. (En prensa).
- [9] van Poppel, F., Ekamper, P., & Stoeldraijer, L. (2025). Regional differences in the chance to become a centenarian in nineteenth and early twentieth century Dutch birth cohorts. *Population, Space and Place*, 31(1), 1–15. <https://doi.org/10.1002/psp.70101>
- [10] Buettner, D. (2023). The Blue Zones: Secrets for living longer. *National Geographic*.
- [11] Grosso, G., Marventano, S., Yang, J., Micek, A., Pajak, A., & Scalfi, L. (2017). A comprehensive meta-analysis on evidence of Mediterranean diet and cardiovascular disease: Are individual components equal? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(15), 3218–3232. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1107021>
- [12] Berman, M. G., Jonides, J., & Kaplan, S. (2008). The cognitive benefits of interacting with nature. *Psychological Science*, 19(12), 1207–1212. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02225.x>
- [13] Holt-Lunstad, J., Smith, T. B., & Layton, J. B. (2010). Social relationships and mortality risk: A meta-analytic review. *PLOS Medicine*, 7(7), e1000316. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000316>
- [14] Steptoe, A., & Kivimäki, M. (2012). Stress and cardiovascular disease. *Nature Reviews Cardiology*, 9(6), 360–370. <https://doi.org/10.1038/nrcardio.2012.45>
- [15] Christensen, K., Johnson, T. E., & Vaupel, J. W. (2006). The quest for genetic determinants of human longevity. *Nature Reviews Genetics*, 7(6), 436–448. <https://doi.org/10.1038/nrg1871>
- [16] Sebastiani, P., & Perls, T. T. (2012). The genetics of extreme longevity: Lessons from the New England Centenarian Study. *Frontiers in Genetics*, 3, 277. <https://doi.org/10.3389/fgene.2012.00277>
- [17] Marmot, M. (2017). The health gap: The challenge of an unequal world: The argument. *International Journal of Epidemiology*, 46(4), 1312–1318. <https://doi.org/10.1093/ije/dyx163> (doi.org in Bing)
- [18] McGinnis, J. M., Williams-Russo, P., & Knickman, J. R. (2002). The case for more active policy attention to health promotion. *Health Affairs*, 21(2), 78–93. <https://doi.org/10.1377/hlthaff.21.2.78> (doi.org in Bing)

[19] Woolf, S. H., & Aron, L. (2013). U.S. health in international perspective: Shorter lives, poorer health. National Academies Press. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK115854/>

[20] Rodríguez Guitián, M., & Ramil Rego, P. (2007). Clasificacións climáticas aplicadas a Galicia: Revisión desde unha perspectiva biogeográfica. Recursos Rurais: Revista do Instituto de Biodiversidade Agraria e Desenvolvemento Rural (IBADER), 3, 31–35.

[21] Poulain, M., Pes, G. M., Grasland, C., Carru, C., Ferrucci, L., Baggio, G., Franceschi, C., & Deiana, L. (2004). Identification of a geographic area characterized by extreme longevity in the Sardinia island: The AKEA study. *Experimental Gerontology*, 39(9), 1423–1429. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2004.06.016>

[22] Poulain, M., Herm, A., Errigo, A., Chrysohoou, C., Legrand, R., Passarino, G., Stazi, M. A., Voutekatis, K. G., Gonos, E. S., Franceschi, C., & Pes, G. M. (2021). Specific features of the ldest old from the Longevity Blue Zones in Ikaria and Sardinia. *Mechanisms of Ageing and Development*, 198, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.mad.2021.111543>

[23] Bartscher, M. (2014). Effects of living at higher altitudes on mortality: A narrative review. *Aging and Disease*, 5(4), 274–280. <https://doi.org/10.14336/AD.2014.0500274> (doi.org in Bing)

O espazo como recurso educativo: a súa importancia para facilitar a aplicación de metodoloxías activas

M. Loureiro-Ga

Departamento de Matemáticas, RITME, campus de Ourense.

Universidade de Vigo.

maloureiro@uvigo.gal

C. Míguez-Álvarez

Departamento de Didácticas Especiais, RITME, campus de Ourense.

Universidade de Vigo.

camiguez@uvigo.gal

I. Mociño

Departamento de Didácticas Especiais, RITME, campus de Ourense.

Universidade de Vigo.

imocino@uvigo.gal

Resumo

Este proxecto foi desenvolto no marco da convocatoria INOU 2025 e financiado a través do convenio anual coa Deputación Provincial de Ourense, impulsado por membros do [grupo de investigación RITME](#), coa colaboración doutros membros da [Facultade de Educación e Traballo Social \(FETS\)](#). O proxecto centrouse na análise da relación entre o deseño dos espazos educativos universitarios e a implementación de metodoloxías activas, tomando como referencia principal os espazos da FETS. Nese sentido, o proxecto desenvolveuse en diferentes etapas.

Nun primeiro momento, a revisión bibliográfica permitiu establecer un marco teórico sólido arredor da neuroarquitectura e do impacto que o espazo físico exerce no benestar, na motivación e nos procesos de aprendizaxe do alumnado. Neste contexto, elaborouse un cuestionario dirixido ao alumnado sobre a aula 0.10 –xa equipada con mobiliario flexible– para coñecer a súa percepción sobre o espazo e o seu uso.

Paralelamente, realizouse unha análise exhaustiva dos espazos da facultade, recompilando nun documento Excel información detallada sobre cada aula e identificando elementos relevantes para a súa avaliación. Tamén se inventariou o novo mobiliario flexible adquirido polo centro.

Co obxectivo de obter unha visión técnica especializada, colaborouse co estudo de arquitectura Trees Ecosistemas, que elaborou unha análise da aula 0.0 e propuxo diversas melloras. Finalmente, organizouse un obradoiro participativo con docentes e alumnado dos catro graos da FETS, orientado á reflexión colectiva sobre o espazo educativo, o traballo cooperativo e a escoita activa. Este encontro permitiu xerar propostas conxuntas como experiencia piloto para avanzar cara a espazos máis flexibles, inclusivos e axeitados ás metodoloxías activas.

Palabras chave: arquitectura educativa, espazos educativos e metodoloxías activas.

1. Marco teórico

Para comezar este traballo, decidiuse facer unha revisión sistemática da literatura (RSL) para coñecer o estado da cuestión. Como se atopou unha RSL moi recente (Llorens, 2022), partiuse dela e buscáronse novos artigos publicados nos períodos 2023 e 2024 para coñecer en certa medida a relación entre a neurociencia e o deseño arquitectónico (Ahmed, 2022).

Esta análise permitiu identificar un conxunto de variables de deseño espacial con impacto significativo na atención, na memoria e noutros procesos cognitivos, e confirmou que o espazo non é un elemento neutro no proceso de ensino-aprendizaxe, senón un factor activo que modula a experiencia educativa. Aínda que os estudos revisados describen tamén os métodos de medición empregados (cuestionarios, tarefas cognitivas e rexistros fisiolóxicos) e os perfís das persoas usuarias, o foco desta investigación sitúase especificamente nas características do espazo. En relación coa forma e xeometría, a evidencia amosa que os espazos con liñas curvas xeran maior satisfacción, entusiasmo e percepción positiva fronte aos rectilíneos, activando respostas emocionais favorables á aprendizaxe (Llorens *et al.*, 2024). Ademais, determinados materiais e xeometrías parecen optimizar funcións cognitivas concretas: a atención mellora en espazos construídos con

aceiro, formigón ou vidro; a memoria e a aprendizaxe vense favorecidas en espazos cadrados ou cilíndricos de formigón; mentres que a concentración aumenta en espazos cónicos, de vidro ou cadrados de madeira, o que suxire unha interacción complexa entre forma, materialidade e cognición.

No que atinxe á distribución do espazo e ao contexto, os estudos revisados sinalan que a percepción dun interior agradable activa áreas visuais e espaciais do sistema fronto-parietal, implicando procesos cognitivos e motores na avaliación dos espazos construídos (Llorens *et al.*, 2024). Isto implica que a organización espacial inflúe non só na comodidade percibida, senón tamén na maneira en que o alumnado procesa a información e interactúa coa contorna. En paralelo, a revisión destaca o papel das cores, materiais e texturas como estímulos emocionais que favorecen os procesos de aprendizaxe. As combinacións de cores de alto contraste melloran a memoria espacial, mentres que as cores frías nas paredes das aulas –especialmente o azul e o púrpura– favorecen a atención e melloran o rendemento en tarefas de atención e memoria (Llorens *et al.*, 2024; Zhou, 2024). Estes resultados son consistentes con investigacións recentes que sinalan que as cores suaves e equilibradas contribúen ao confort psicolóxico e ao rendemento académico en contextos universitarios (Zhou, 2024).

Outra variable relevante identificada é a relacionada coas dimensións do espazo: altura, ancho e sensación de amplitude. A literatura indica que a altura do teito inflúe nos estilos cognitivos: os teitos altos favorecen o pensamento abstracto e o procesamento global da información, mentres que os teitos baixos inducen un enfoque máis específico e detallado (Llorens *et al.*, 2024). Así mesmo, as aulas máis estreitas parecen mellorar o rendemento cognitivo, posiblemente por reducir distraccións, e os espazos con teitos altos combinados con xeometrías curvilíneas son percibidos como máis atractivos e estimulantes. Estes achados reforzan a idea de que o deseño volumétrico dos espazos debe responder ao tipo de tarefas que se pretenden desenvolver, especialmente cando se aplican metodoloxías activas que alternan traballo reflexivo, colaborativo e creativo.

As condicións ambientais das aulas exercen un papel determinante tanto no benestar coma no rendemento do alumnado. A mellora de variables como a ventilación, a iluminación, a temperatura ou a calidade do aire tradúcese nunha maior percepción de confort, o que repercute positivamente na disposición para a aprendizaxe (Brink, 2023). Ese mesmo estudo achou que cando o ambiente interior acada estándares elevados de calidade, o alumnado experimenta melloras significativas en tarefas cognitivas, especialmente as que requiren atención sostida, memoria de traballo ou procesamento da información. Estes achados suxiren que a optimización do ambiente físico non só incrementa o benestar inmediato, senón que tamén favorece procesos cognitivos clave, reforzando a idea de que o espazo educativo é un axente activo na aprendizaxe.

En relación coa iluminación, identifícanse as seguintes condicións óptimas segundo o tipo de tarefa: ambientes brillantes e frescos para a atención, luz moderadamente brillante e ambiente cálido para a memoria, e condicións termoneutras para a resolución de problemas. Estudos posteriores afinan estes resultados, sinalando que unha temperatura de cor arredor dos 4000 K é óptima para o confort visual, sendo a iluminancia (aprox. 650-1050 lx) un factor relevante pero secundario fronte á cor da luz (Liu, 2024). No ámbito acústico, o estudantado que realiza tarefas en condicións de ruído presenta peores resultados ca aquel en ambientes silenciosos, mentres que, no plano térmico, a temperatura óptima tamén varía segundo a tarefa cognitiva (Xiong *et al.*, 2018). A evidencia recente, baseada mesmo en medidas neurofisiolóxicas como EEG ou actividade electrodérmica, reforza estas conclusións e subliña a necesidade de deseñar aulas flexibles, con mobiliario móbil, control acústico e condicións lumínicas e térmicas adaptables ás distintas actividades de aprendizaxe (Castilla *et al.*, 2023).

Consecuentemente, por todo o visto anteriormente, investir en condicións ambientais de alta calidade nas aulas constitúe unha estratexia eficaz para potenciar o rendemento académico, poñendo de manifesto a importancia do deseño, mantemento e actualización dos espazos educativos como parte esencial das políticas de mellora docente.

2. Marco normativo e liñas de acción

Nesta sección vanse presentar dúas iniciativas clave no relativo á estruturación dos espazos educativos: O Plan de nova arquitectura pedagóxica, impulsado pola Xunta de Galicia, e o modelo Aulas do futuro do INTEF. Ambas as propostas teñen como obxectivo adaptar os espazos educativos ás novas metodoloxías de aprendizaxe, promovendo contornas máis flexibles e colaborativas que fomenten a participación activa do alumnado e axuden ao desenvolvemento das competencias clave.

2.1 Plan de nova arquitectura pedagóxica

Analízase nesta sección a resolución do 3 de decembro de 2021, da Secretaría Xeral Técnica da Consellería de Cultura, Educación e Universidade, pola que se dá publicidade ao https://www.xunta.gal/plans-programas?content=actuacion_0195.xml". Ao ser, pois, o marco normativo, cabe facer unha breve análise deste, aínda que cómpre ter en conta que non é un artigo científico e que, aínda que foi elaborado por un equipo multidisciplinar formado por diferentes especialistas, non se proporcionan datos concretos, evidencias empíricas ou referencias bibliográficas que xustifiquen as decisións.

O plan defende que o espazo educativo debe ser entendido como un elemento pedagóxico activo, capaz de influír na metodoloxía, na relación entre docentes e

estudantes, e no desenvolvemento integral das persoas. A arquitectura escolar debe adaptarse aos cambios sociais e educativos, promovendo unha cultura de aprendizaxe aberta, colaborativa e emocionalmente segura.

- Flexibilidade espacial
 - a. Espazos modulares e transformables segundo as necesidades pedagóxicas.
 - b. Aulas que permiten diferentes disposicións e dinámicas de grupo.
- Ambientes acolledores e inclusivos
 - a. Deseño que favoreza o benestar emocional.
 - b. Espazos que recoñezan a diversidade e fomenten a equidade.
- Conectividade e apertura
 - a. Relación fluída entre espazos interiores e exteriores.
 - b. Zonas comúns que favorezan a socialización e o intercambio.
- Iluminación natural e confort ambiental
 - a. Uso da luz natural como elemento central.
 - b. Control acústico, ventilación e temperatura para garantir o confort físico.
- Presenza da natureza
 - a. Integración de elementos naturais: patios, xardíns, zonas verdes...
 - b. Deseño biofílico que conecte co contorno e estimule os sentidos.
- Espazos para a autonomía e a creatividade
 - a. Recunchos para traballo individual, reflexión ou expresión artística.
 - b. Ambientes que fomenten a iniciativa e o pensamento crítico.
- Tecnoloxía integrada
 - a. Infraestruturas que permitan o uso fluído das TIC.
 - b. Espazos preparados para aprendizaxes híbridas e dixitais.
- Participación da comunidade educativa
 - a. Deseño colaborativo que inclúa a voz de alumnado, profesorado e familias.
 - b. Espazos que reflectan a identidade e os valores da comunidade escolar.

2.2 INTEF: aula do futuro

Outro proxecto interesante é o do proxecto [Aula do futuro do INTEF](#) (Instituto Nacional de Tecnoloxías *Educativas* e de Formación do Profesorado) onde se concibe a aula do futuro como moito máis ca un espazo físico: é un ecosistema pedagóxico

que integra metodoloxías activas, tecnoloxía e deseño flexible para transformar a aprendizaxe. Este proxecto propón a aprendizaxe baseada en metodoloxías activas, integrando a tecnoloxía e marcando espazos diferenciados e flexibles segundo se amosa na seguinte táboa 1:

Zona	Función
Investiga	Para buscar información e desenvolver habilidades de investigación
Interactúa	Para traballo colaborativo e comunicación entre estudantes
Crea	Para actividades de produción multimedia, deseño e expresión artística
Desenvolve	Para aprendizaxe autónoma e personalizada
Presenta	Para compartir resultados, exposicións e reflexións
Explora	Para experimentar con tecnoloxías e recursos innovadores

Táboa 1. Espazos dos que debe dispoñer unha aula do futuro segundo o INTEF

Este proxecto promove a competencia dixital docente impartindo formación e ofrecendo unha rede de centros e experiencias. Tamén ofrece un kit de recursos para axudar os centros a implementar o modelo. Achegan na web:

Kit con guías de deseño de espazos

- Kit 1. Identificar as partes interesadas nas tendencias: interactuar coas partes. Seleccionar e clasificar as tendencias relevantes
- Kit 2. Deseñar a aula do futuro
- Kit 3. Situacións de aprendizaxe
- Kit 4: Actividades pedagóxicas. Experiencias e situacións de aprendizaxe realizadas en centros educativos de diverso tipo, así como ferramentas de planificación e avaliación.
- Kit 5. Avaliación: recompilación e análise de evidencias sobre o proceso e os seus resultados. Deste xeito, pódese coñecer e analizar o que funcionou ben e o que precisa mellorar, de cara a tomar decisións futuras.

3. Análise de espazos da FETS

A partir da revisión da bibliografía e das iniciativas previamente mencionadas, levouse a cabo unha análise in situ dos espazos da FETS. Para esta análise empregouse un documento Excel cunha pestana por andar, no que se analiza cada un dos espazos de xeito individual. Esta análise ten en conta as seguintes variables:

1. **Reportaxe fotográfica do espazo:** fotografía que amosa o estado actual do espazo.
2. **Tamaño en metros cadrados:** obtívose dos planos do edificio proporcionados pola unidade técnica. Detectouse algún fallo obvio como pode ser a aula 4.3 que no plano de edificio indica que ten 68 m², o que difire da realidade. Deixouse indicado en vermello.
3. **Capacidade:** obtívose dos rexistros da conserxaría a partir dos cales se fai a distribución de aulas por materia, para exames etc.
4. **Tipo de mobiliario:** indícase principalmente o tipo de mesas e cadeiras do espazo. Se están en configuración fixa, ben por estar suxeitas ao chan ou por ter electrificación interior ou se, pola contra, poden establecerse en configuración flexible.
5. **Tipo de tecnoloxía:** o tipo de tecnoloxía co que conta a aula. As aulas máis equipadas contan con ordenador, proxector, sistema de videoconferencia e pantalla dixital.
6. **Metodoloxía:** segundo as características da aula indícase de xeito xenérico o tipo de metodoloxía para a que está preparada.
7. **Electrificación:** se a aula conta con electrificación, algo demandado polo alumnado, xa que adoita traballar con dispositivos electrónicos.
8. **Materialidade do espazo:** que tipo de material predomina no espazo.
9. **Tipo de iluminación artificial:** que tipo de iluminación hai no espazo. No anexo I tamén se indican medidas técnicas da iluminación da aula 0.0.
10. **Tipo de teito:** o tipo de teito de cada espazo, xa que teñen importancia tanto as súas formas coma o tipo de absorción de ruído.

11. **Tipo de chan:** que tipo de chan dispón cada espazo.

12. **Materiais de absorción acústica:** se no espazo existe algún material de absorción acústica que reduza a resonancia e absorba as ondas.

13. **Comentarios:** outros comentarios destacados na análise, incluíndo posibles propostas de mellora.

Estas variables serán fundamentais para unha futura intervención no ámbito de centro. A recollida desta información fíxose entre xullo e setembro de 2025, polo que posiblemente non se teñan reflectido actuacións ou modificacións despois desa data. Pódese atopar a análise no anexo I deste documento.

4. Investigación na aula 0.10

Dentro do proxecto elaborouse unha primeira versión dun cuestionario *ad hoc* dirixido a alumnado e profesorado da FETS, co obxectivo de recoller percepcións sobre o uso dos espazos, o mobiliario flexible e a súa influencia nos procesos de ensino-aprendizaxe. O cuestionario foi aplicado ao alumnado da materia «Matemáticas para mestres: educación infantil» na aula 0.10, cun total de 32 participantes. O cuestionario deseñouse arredor de tres dominios principais:

- Físico-espacial
- Persoal
- Proceso educativo

Moitas das preguntas referíanse a aspectos específicos da aula, mentres que outras eran máis xerais e trataban o efecto do espazo no proceso de ensino e aprendizaxe. Os principais resultados revelaron que o 87,7 % cre que «a acústica da aula afecta ao seu proceso de ensino e aprendizaxe» e máis do 78 % dos participantes cren que «as cores presentes na aula inflúen no seu estado de ánimo e concentración». Estes resultados demostran a percepción do alumnado sobre a influencia do espazo físico da aula no seu proceso de ensino e aprendizaxe, sendo o ruído e a cor os factores que máis afectan á súa concentración e motivación. Na figura 1 pódese apreciar o estado actual da aula 0.10 logo de que a FETS a dotase de novo material flexible que tamén foi rexistrado na folla de rexistro.



Figura 1. Estado actual da aula 0.10 logo de que a FETS a dotase de novo material flexible

5. Obradoiro na aula 0.0 e informe

No marco das iniciativas en curso, o día 17 de outubro do 2025 organizouse un obradoiro participativo no que se artellaron as achegas pedagóxicas e arquitectónicas do proxecto, contando coa colaboración do estudo de arquitectura Trees Ecosistemas. Neste obradoiro participaron as coordinacións dos graos da facultade, así como alumnado e docentes que empregan a aula de forma cotiá.

- Relatora: Mar Penela López.
- Listaxe de participantes: Marcos Loureiro García, María José Vázquez Figueiredo, Abraham Rubín Álvarez, María Victoria Carrera Fernández, Almudena Alonso Ferreiro, María Ainoa Zabalza Cerdeiriña, David Casado Neira, Juan Fernando Villalón Amorín, Mónica Rodríguez Enríquez, Ana Iglesias Álvarez, Carmen Castro Santiso e Érika Rodríguez Vázquez.

Nel, combináronse tanto o coñecemento técnico da relatora coma a experiencia dos docentes e alumando como usuarios do espazo. Tratáronse temas como a capacitación, a análise participativa e o deseño participativo, empregando dinámicas coma o *design thinking*, prototipaxe ou mapas colectivos para xerar propostas de mellora.

Foi unha oportunidade moi boa para comezar a ser consciente da importancia do espazo e de telo tamén en conta á hora de organizar reunións, clases e xornadas e de velo como un recurso máis no proceso de aprendizaxe. Pódense atopar imaxes deste obradoiro na figura 2.

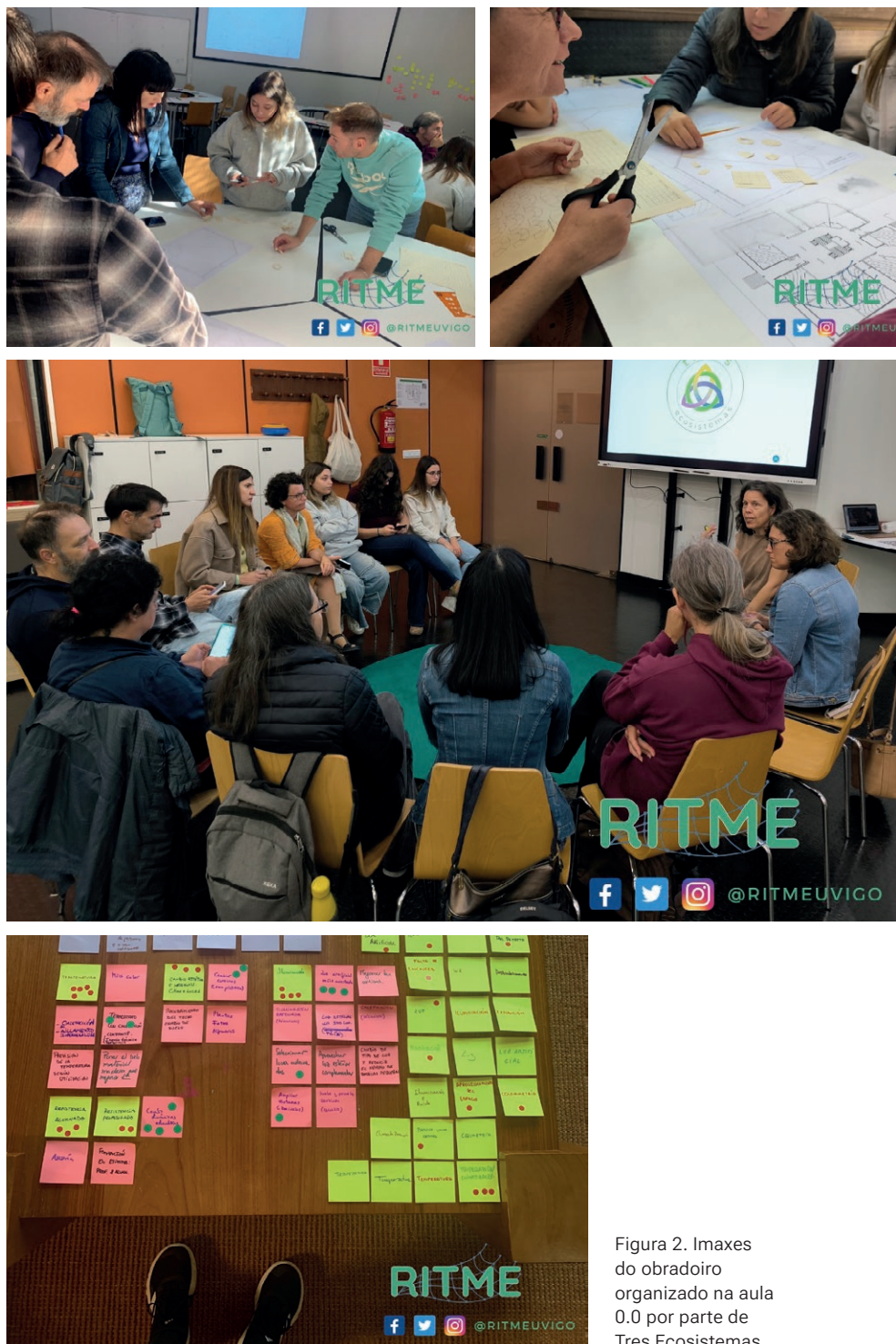


Figura 2. Imaxes do obradoiro organizado na aula 0.0 por parte de Tres Ecosistemas

6. Recomendacións para a FETS

Logo do estudo de artigos científicos, políticas e recomendacións de innovación, recoméndase que o equipo de innovación do centro comece realizando o plan de autoavaliación, tal e como se indica no kit 2 do INTEF. Isto permitirá analizar a capacidade de innovación do centro educativo empregando a [ferramenta SELFIE](#), o modelo de madurez e cotexar a guía de referencia para o modelo de aula do futuro (véxanse os detalles na web).

Así, logo de analizar os diferentes espazos da FETS, detéctase que a maior parte das aulas non están adaptadas para traballar con metodoloxías activas, tales como a aprendizaxe cooperativa, *thinking classroom*, aulas de pensar etc.

Ademais, mediuse a capacidade luminosa da aula en luxes e detectouse que a media, coas cortinas parcialmente abertas, é de 238 luxes. Esta cantidade está moi por debaixo da cantidade recomendada. Ademais, o tipo de iluminación actual produce cegamentos, tal e como se pode ver na figura 3.

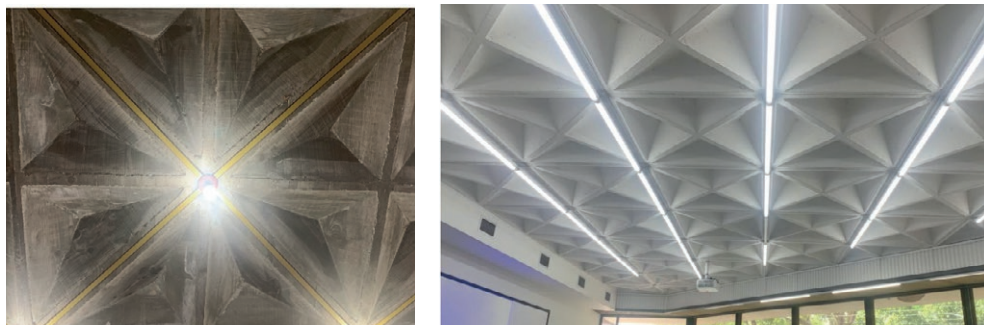


Figura 3. Á esquerda pódese apreciar o tipo de iluminación actual que é puntual con lámpadas que producen cegamento e non son abondo para iluminar todas as partes da aula de xeito correcto

Tamén se detecta que, malia ser un edificio de vidro, predomina a ausencia de luz natural na meirande parte das aulas. Isto débese a que todos os vidros están cubertos con amplas cortinas opacas que evitan encandeamentos e axudan a manter a temperatura da aula. Nalgúns casos resulta inviable a apertura delas por parte da persoa docente cada vez que entra ou sae da aula.

Ademais das aulas, púidose observar que o centro, ademais de ter todo o seu núcleo de movemento en zona interior e con ausencia de luz exterior, tamén carece de espazos verdes nestas zonas interiores. Sería acaído engadir elementos verdes e naturais nas zonas comúns, creando zonas cómodas para estar entre as clases. Aínda que xa se dispón actualmente de zonas verdes no exterior, estas non son visibles pola opacidade das cortinas e o seu estado permanente de «pechadas» cando o seu estado natural debería ser «abertas».



Figura 4. Arriba: estado actual da aula 0.0. Abaixo: *render* con melloras evidenciadas no obradoiro, tales como a materialidade modificando o pavimento, as cortinas e a iluminación





Figura 5. Fila superior: simulación da entrada da FETS, así como da aula 0.0. Fila inferior: fotos tomadas na FCCED de Pontevedra

Finalmente, recoméndase tamén incluír unha liña de formación de profesorado relacionada co espazo educativo para concienciar tanto ao actual PDI coma a todas as persoas docentes en formación que pasan por este centro. Esta formación permitirá que o profesorado do centro sexa consciente da importancia do espazo no proceso de aprendizaxe e tamén que se sinta cómodo empregándoo como unha ferramenta didáctica para a súa docencia. Pódense atopar todas as propostas e a súa xustificación técnica no informe técnico entregado á FETS, na sección **5. Liñas de acción**, e que se pode atopar na [web de i+D+I da FETS](#).

7. Referencias

- [1] Llorens-Gámez, M., Higuera-Trujillo, J. L., Sentieri-Omarrementeria, C., & Llinares, C. (2022). The impact of the design of learning spaces on attention and memory from a neuroarchitectural approach: A systematic review. *Frontiers of Architectural Research*, 11(1), 143–164. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.12.002>
- [2] Ahmed Shaaban, D. E., Kamel, S., & Khodeir, L. (2022). Exploring the architectural design powers with the aid of neuroscience (little architect's adventure). *Alexandria Engineering Journal*, 61(11), 102107. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.102107>
- [3] Zhou, Q., & Fang, X. (2024). Exploring the application of neurostructural principles to the design of public spaces on university campuses. *Land*, 13(12), 1978. <https://doi.org/10.3390/land13121978>
- [4] Liu, C., Li, J., Wang, X., Zhang, Q., Wang, W., & Gao, W. (2024). A review of subjective evaluation, physiological indicators and cognitive performance in indoor light environment: The role of illuminance and correlated color temperature. *Journal of Building Engineering*, 84, 110224. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110224>
- [5] Castilla, N., Higuera-Trujillo, J. L., & Llinares, C. (2022). The effects of illuminance on students' memory: A neuroarchitecture study. *Building and Environment*, 223, 109833. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109833>
- [6] Brink, H. W., Krijnen, W. P., Loomans, M. G. L. C., Mobach, M. P., & Kort, H. S. M. (2023). Positive effects of indoor environmental conditions on students and their performance in higher education classrooms: A between-groups experiment. *Science of the Total Environment*, 858, 161813. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161813>

Ourense TermalAcces: accesibilidade cognitiva en contornos termais

Iria Vázquez Silva

*GETS-IT, CISPAC, IISGS. Departamento de Socioloxía, Ciencia Política e da
Administración e Filosofía. Campus de Ourense. Universidade de Vigo*
ivazquez@uvigo.gal

Rubén González-Rodríguez

*GETS-IT, IISGS. Departamento de Análise e Intervención Psicosocioeducativa.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo*
rubgonzalez@uvigo.gal

Sabela Pérez-Martín

*GETS-IT, IISGS. Departamento de Análise e Intervención Psicosocioeducativa.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo*
sabela.perez@uvigo.gal

Clara Grech-Santi

*GETS-IT, IISGS. Departamento de Análise e Intervención Psicosocioeducativa.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo*
clara.grech@uvigo.gal

Carmen Verde-Diego

*GETS-IT, IISGS. Departamento de Análise e Intervención Psicosocioeducativa.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo*
carmenverde@uvigo.gal

María José Vázquez Figueiredo

*Psicoloxía Xurídica e da Saúde: Convivencia e Benestar, GI-1754.
Departamento de Análise e Intervención Psicosocioeducativa.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo*
figueiredo@uvigo.gal

Resumo

O proxecto Ourense TermalAcces sitúase no marco da accesibilidade universal, entendida como un requisito esencial para garantir a inclusión e a autonomía de todas as persoas. En particular, céntrase na accesibilidade cognitiva, unha dimensión aínda pouco desenvolvida no ámbito termal e turístico, que resulta clave para facilitar a comprensión dos espazos, a orientación e o uso autónomo dos servizos, especialmente para persoas con discapacidade intelectual, maiores ou con dificultades de comprensión. O obxectivo principal deste proxecto céntrase en mellorar o acceso de persoas con discapacidade cognitiva a dous balnearios do Programa de termalismo social da Deputación de Ourense. En concreto, foron seleccionados os balnearios OCA Vila de Allariz e Laias Caldaria, que se prestaron a colaborar coa nosa investigación, facilitando o traballo de campo e a identificación de barreiras e a proposta de melloras. Para isto, utilizouse unha metodoloxía mixta e estruturada en catro fases: revisión bibliográfica, traballo de campo, diagnose e difusión. Os resultados evidencian múltiples barreiras, especialmente na sinalización, orientación, identificación de servizos e comunicación da información. Isto xera desorientación, inseguridade e dependencia nas persoas con discapacidade intelectual. Identificáronse, así mesmo, algúns elementos positivos en relación coa accesibilidade cognitiva nos produtos termais analizados e formuláronse propostas de mellora baseadas en actuacións de baixo custo, como a simplificación da información, o uso de pictogramas e a homoxeneización da sinalización. En conclusión, o estudo confirma a necesidade de integrar a accesibilidade cognitiva de forma sistemática no turismo termal, destacando que pequenas intervencións poden ter un alto impacto na autonomía, seguridade e inclusión das persoas usuarias.

Palabras clave: accesibilidade cognitiva, persoas con discapacidade intelectual, persoas maiores, autonomía e termalismo.

1. Introducción

A accesibilidade universal constitúe un principio fundamental para garantir a igualdade de oportunidades e a participación plena de todas as persoas na sociedade. Este concepto enténdese como a condición que deben cumprir os contornos, procesos, bens, produtos e servizos para seren comprensibles, utilizables e practicables por todas as persoas en condicións de seguridade e autonomía [1]. Por isto, a adaptación do medio débese considerar unha responsabilidade ineludible das comunidades, co fin de ofrecerlle á cidadanía unha integración social, cultural e laboral efectiva [2].

Neste marco, a accesibilidade universal vincúlase estreitamente co enfoque do deseño para todas as persoas, que promove a creación de contornos inclusivos desde a súa propia concepción, evitando a necesidade de adaptacións posteriores. Nesta liña, a accesibilidade constitúe unha necesidade que abrangue a diversidade de condicións humanas, incluíndo as persoas con discapacidade física, sensorial ou intelectual, pero tamén para persoas maiores, nenos e nenas, mulleres xestantes, entre outras. A través desta perspectiva, este principio configúrase como un factor clave para favorecer a autonomía persoal e a inclusión social ao longo de toda a vida, tendo en conta que as capacidades e as funcionalidades das persoas non son estáticas no tempo [3]. Así, a Convención das Nacións Unidas sobre os Dereitos das Persoas con Discapacidade [4] consolida a accesibilidade como un dereito humano fundamental e como un requisito imprescindible para garantir unha inclusión social efectiva.

Por todo o sinalado, a accesibilidade non se debe entender unicamente como a eliminación de barreiras físicas, senón como un concepto amplo e multidimensional que abrangue tamén aspectos sensoriais e cognitivos [5]. Tradicionalmente, as intervencións centráronse na accesibilidade física, deixando nun segundo plano outras dimensións igualmente relevantes para garantir a autonomía e a participación das persoas. Porén, a evolución do concepto e das políticas públicas manifestou a necesidade de avanzar cara a unha accesibilidade integral, que teña en conta a diversidade de capacidades e necesidades da poboación. Neste contexto, cobra especial relevancia a accesibilidade cognitiva, como unha dimensión clave para asegurar a comprensión da información, a orientación nos espazos e o uso autónomo dos servizos.

1.1 A accesibilidade cognitiva

O concepto de accesibilidade cognitiva entendido como a capacidade dos contornos, procesos, bens, produtos, servizos, así como dos obxectos, ferramentas e dispositivos, de seren comprensibles e doados de utilizar para todas as persoas [6] foi introducido por primeira vez na normativa española coa Lei 6/2022, do 31 de marzo, de modificación do texto refundido da Lei xeral de dereitos das persoas con discapacidade e da súa inclusión social, aprobado polo Real decreto legislativo 1/2013, do 29 de novembro. En Galicia, a Lei 10/2014, do 3 de decembro, de accesibilidade, refírese a este tipo de adaptacións, mais non desenvolve o concepto nin concreta de maneira suficiente a súa aplicación.

A accesibilidade cognitiva constitúe unha dimensión clave para garantir a comprensión e o uso autónomo dos contornos, dirixida especialmente a persoas con discapacidade intelectual e a outros colectivos con dificultades de comprensión como persoas maiores, persoas con trastornos do neurodesenvolvemento, dano cerebral ou baixo dominio lingüístico, aínda que os seus beneficios se estenden ao conxunto da

poboación en situacións de desorientación ou carga cognitiva. A súa implementación contribúe á redución do estrés e da incerteza, á mellora da autonomía e da inclusión social, á diminución da frustración no uso dos servizos e ao incremento da súa eficiencia e aceptación. Para iso, recórrase a estratexias como a simplificación da linguaxe (lectura fácil e linguaxe clara), o uso de apoios visuais como pictogramas, o deseño de sistemas de sinalización e orientación coherentes, e a aplicación de criterios de accesibilidade cognitiva en contornos dixitais [7].

1.2 O ocio saudable e accesible como dereito

O ocio saudable, entendido como unha forma de tempo de lecer, constitúe unha dimensión fundamental do desenvolvemento persoal e da calidade de vida das persoas [8]. Especificamente, o ocio e o turismo termal non só favorece o descanso e a desconexión da rutina diaria, senón que tamén promove o benestar físico e mental, ao tempo que estimula o crecemento persoal a través da vivencia de novas experiencias, a interacción social e o contacto con diferentes contornas culturais e naturais [9]. Ademais, o turismo, en xeral, contribúe ao exercicio da autonomía individual, á participación activa na comunidade e á toma de decisións [9], aspectos clave para o desenvolvemento dunha vida plena e independente. Neste sentido, o acceso ao turismo non se debe entender unicamente como unha actividade recreativa, senón tamén como un elemento que favorece a inclusión social.

A Convención das Nacións Unidas sobre os Dereitos das Persoas con Discapacidade [4] establece que o turismo accesible debe ser concibido como un dereito. Na mesma liña, a Axenda 2030 para o desenvolvemento sostible [11], a través do seu obxectivo 11, promove as contornas inclusivas, seguras e accesibles para todas as persoas con especial atención aos grupos en situación de vulnerabilidade. Do mesmo xeito, a Estratexia europea sobre os dereitos das persoas con discapacidade 2021-2030 subliña o compromiso dos estados membros co garante do dereito das persoas con discapacidade a participar plenamente en todos os ámbitos da vida, incluídas as actividades de lecer. Esta estratexia establece, ademais, un marco de acción integral orientado a eliminar barreiras e promover a accesibilidade, a inclusión social e a igualdade de oportunidades [12]. No Estado español, a Lei 51/2003, de igualdade de oportunidades, non discriminación e accesibilidade universal (LIONDAU), e o Real decreto legislativo 1/2013, polo que se aproba o texto refundido da Lei xeral de dereitos das persoas con discapacidade e da súa inclusión social, recoñecen o dereito das persoas con discapacidade a acceder, en igualdade de condicións, a servizos e espazos culturais, deportivos e de lecer, garantindo a accesibilidade universal baixo o principio de deseño para todas as persoas.

A pesar do recoñecemento formal da accesibilidade universal nos espazos de ocio e tempo de lecer como un dereito, a realidade é que actualmente no Estado español existe unha vulneración sistemática e persistente deste dereito, especialmente en detrimento das persoas con discapacidade [13]. Aínda que se produciron pequenos avances na adaptación dos espazos para persoas con discapacidade física ou sensorial, as barreiras técnicas e ambientais que dificultan a comprensión da contorna e o desenvolvemento autónomo de moitas persoas con discapacidade intelectual seguen sendo unha realidade. Neste escenario, a accesibilidade cognitiva continúa a ocupar un lugar secundario ou mesmo a ser ignorada, o que se traduce nunha falta de desenvolvemento normativo e de aplicación práctica que impide garantir o acceso equitativo á información, aos espazos e aos servizos.

1.3 O turismo termal en Ourense

Unha das iniciativas de turismo social que se ofrecen na provincia de Ourense é o Programa de termalismo social da deputación que apostou de maneira estratéxica polo desenvolvemento do turismo termal como motor do seu crecemento económico e social. Esta estratexia estrutúrase arredor da marca Ourense Termal e susténtase en accións que integran os beneficios terapéuticos do termalismo cun enfoque orientado á saúde, ao envellecemento activo e ao benestar. O produto termal non só responde a posibles afeccións físicas, senón tamén a necesidades relacionadas co benestar xeral e á promoción dun envellecemento activo. Neste contexto, o programa ten como finalidade facilitar o acceso ao lecer turístico a colectivos con maiores dificultades [14], ofrecendo oportunidades a grupos de poboación que poden presentar limitacións, como persoas maiores, persoas con discapacidade, mocidade ou individuos con menores recursos económicos. Porén, malia o seu carácter social, continúan existindo importantes carencias en termos de accesibilidade cognitiva, especialmente no que atinxe ás persoas con discapacidade intelectual ou psicosocial, cuxa participación plena e autónoma neste tipo de servizos aínda non está completamente garantida.

2. Obxectivos

O proxecto tivo como obxectivo xeral ampliar o acceso das persoas con discapacidade cognitiva a dous dos balnearios pertencentes ao Programa de termalismo social, promovido pola Deputación de Ourense –o Hotel OCA Vila de Allariz¹ e o de Laias

¹ Cambiou o seu nome no transcurso do proxecto de investigación. O seu nome actual é Eurostars Vila de Allariz Hotel & Balneario.

Caldaria Hotel Balneario—, mediante a identificación das principais barreiras existentes e a formulación de propostas orientadas á mellora da accesibilidade nos establecementos termais participantes. Queremos agradecer a participación desinteresada de ambos os balnearios nesta investigación, xa que sen a súa colaboración sería imposible poder realizar esta diagnose. En todo momento facilitaron a realización do traballo de campo feito no marco do noso proxecto de investigación, mostrando o seu compromiso coa inclusión social.

Neste sentido, a iniciativa pretende contribuír á creación de contornos máis inclusivos, favorecendo a autonomía persoal, a comprensión da información e a participación plena das persoas usuarias no conxunto dos servizos ofrecidos.

Como obxectivos específicos destacan:

- Realizar un diagnóstico detallado da accesibilidade cognitiva dos equipamentos turísticos seleccionados, analizando aspectos como a sinalización, a claridade da información, a orientación nos espazos e a *usabilidade* dos servizos.
- Identificar as principais barreiras e limitacións presentes nos centros termais en relación con esta dimensión da accesibilidade, atendendo ás diferentes necesidades das persoas usuarias.
- Formular un conxunto de propostas de mellora dirixidas aos equipamentos participantes, baseadas nos resultados do diagnóstico, co fin de facilitar a súa implementación e avanzar cara a contornos máis comprensibles, seguros e accesibles para toda a poboación.

3. Metodoloxía

O proxecto Ourense TermalAcces foi financiado pola Deputación de Ourense a través das axudas aos grupos de investigación do campus de Ourense-InOU 2025. Este proxecto desenvolveuse a partir dunha metodoloxía de carácter mixto, combinando técnicas de análise documental, avaliación técnica e aproximación participativa, co obxectivo de identificar e analizar as barreiras de accesibilidade cognitiva en equipamentos termais da provincia de Ourense. O proceso metodolóxico estruturouse en catro fases diferenciadas que se detallarán a continuación.

Fases	Descrición	Actividades principais
1.ª FASE	Revisión bibliográfica e documental para a construción do marco teórico e conceptual	Análise de literatura científica, normativa e informes institucionais; planificación do traballo de campo; contacto inicial cos centros participantes
2.ª FASE	Desenvolvemento do traballo de campo e organización do proxecto	Contacto cos balnearios; selección de centros participantes; colaboración con FADEMGa Plena inclusión Galicia; planificación económica e administrativa; coordinación entre equipos; reunións e comunicación continua
3.ª FASE	Elaboración da diagnose de accesibilidade cognitiva	Análise da información recollida; elaboración de informes individualizados e diagnose global; aplicación de metodoloxía participativa con persoas con discapacidade intelectual; identificación de barreiras
4.ª FASE	Difusión e transferencia dos resultados	Elaboración de publicacións científicas; participación en congresos; organización de xornadas divulgativas; promoción da aplicación práctica das melloras de propostas

Táboa 1. Fases do desenvolvemento do proxecto

3.1 Primeira fase

En primeiro lugar, levouse a cabo unha fase de revisión bibliográfica e documental, orientada á construción do marco teórico e conceptual do estudo. Nesta etapa analizouse literatura científica, normativa vixente e informes institucionais relacionados coa accesibilidade cognitiva, o deseño universal e o turismo accesible. Paralelamente, establecéronse contactos iniciais cos centros participantes e planificouse o traballo de campo.

3.2 Segunda fase

Nunha segunda fase desenvolveuse o traballo de campo, centrado na recollida de información nos equipamentos seleccionados. Nesta fase desenvóléronse diversas tarefas orientadas á organización e posta en marcha do proxecto. En primeiro lugar, establecéronse contactos coas persoas responsables dos tres balnearios propostos na solicitude inicial, que foron escollidos polo súa implicación en proxectos de índole

social, como o Balneario Laías Caldaria, o Hotel OCA Vila de Allariz de Allariz e o Balneario de Arnoia. Finalmente, e logo do contacto previo e da explicación en detalle do proxecto Ourense TermalAcces, o Hotel OCA Vila de Allariz e o de Laías Caldaria Hotel Balneario confirmaron a súa participación e aceptación da proposta.

Paralelamente, realizouse unha procura exhaustiva de entidades especializadas na elaboración de diagnósticos de accesibilidade cognitiva, co obxectivo de garantir a calidade técnica e a adecuación metodolóxica do proxecto. Tras este proceso, contactouse con FADEMGGA Plena inclusión Galicia, entidade que amosou interese na iniciativa, aceptou a proposta de colaboración e presentou un orzamento detallado para a colaboración na realización das diagnoses.

Durante esta fase, o equipo de traballo organizouse internamente, asignando responsabilidades e coordinando tarefas vinculadas á planificación económica, á xestión administrativa e á comunicación coas entidades colaboradoras. Leváronse a cabo diversas reunións de investigación, como múltiples chamadas telefónicas e intercambios de correos electrónicos. Estas accións realizáronse en coordinación tanto co persoal dos balnearios participantes coma co equipo encargado da realización dos diagnósticos de accesibilidade, co obxectivo de asegurar unha coordinación eficaz entre todas as partes implicadas e avanzar de maneira eficiente na execución da actividade. O conxunto de actividades estivo supervisado e coordinado pola investigadora principal do proxecto, que liderou as distintas accións de coordinación interna e externa.

3.3 Terceira fase

A terceira fase consistiu na elaboración da diagnose de accesibilidade cognitiva. Esta realizouse a partir da análise da información recadada, o que dá lugar a informes individualizados para cada centro e a unha diagnose global. Cómpre salientar que esta fase contou cunha dimensión participativa clave, en colaboración coa entidade FADEMGGA Plena inclusión Galicia,² incorporando a perspectiva directa de persoas con discapacidade intelectual mediante metodoloxía de observación participante. Isto permitiu identificar barreiras relacionadas coa comprensión da información, a orientación espacial e o uso autónomo dos servizos.

3.3.1 Realización da diagnose de accesibilidade

A metodoloxía empregada baséase nun enfoque participativo e centrado na experiencia das persoas usuarias, co obxectivo de avaliar a accesibilidade cognitiva dos espazos e

² As persoas pertencentes a entidade FADEMGGA que participaron na diagnose de accesibilidade foron: Pablo Quintela Quintela, Francisco Javier Carneiro Nogueiras, Irene Fandiño Parrado, Antía Portomeñe García e María Dolores Portela León.

determinar o seu grao de comprensión e *usabilidade* en condicións de autonomía. A avaliación concíbese como un proceso orientado á análise dos usos reais dos espazos, garantindo a continuidade da chamada cadea de accesibilidade, entendida como o conxunto de condicións que permiten un desprazamento coherente, sen interrupcións nin barreiras, ao longo de toda a experiencia de uso [7]. O método de traballo estrutúrase a partir da colaboración entre dous perfís principais:

- Persoas avaliadoras con discapacidade intelectual, formadas en accesibilidade cognitiva, que achegan unha perspectiva directa baseada na experiencia.
- Persoal técnico especializado, encargado da coordinación do proceso, da recollida de datos e da análise dos resultados.

Primeiramente, as profesionais da entidade levaron a cabo unha análise preliminar da accesibilidade das instalacións do balneario denominado *fase de identificación*, co obxectivo de identificar e rexistrar as características principais dos distintos espazos. Este labor inicial permitiu detectar posibles barreiras cognitivas e físicas, ademais de anticipar os elementos clave para o deseño posterior do plan de traballo que se desenvolvería na entidade coas persoas usuarias seleccionadas para participar na diagnose.



Figura 1. Fase de identificación no Laías Caldaria Hotel Balneario, 28/07/2025

En segundo lugar, desenvolveuse un traballo preparatorio na entidade coas persoas usuarias participantes na diagnose, explicándolles a dinámica da actividade e os obxectivos da intervención. Co fin de fomentar a súa implicación activa no proceso, deseñáronse unha serie de «misións» que, ademais de resultar atractivas e motivadoras, serviron para estruturar a posterior análise dos diferentes espazos do balneario de maneira clara e organizada.

Posteriormente, realizouse o traballo de campo no propio balneario, mediante unha metodoloxía baseada na *observación participante*. As técnicas da entidade acompañaron as dúas persoas usuarias ao longo dun percorrido polas distintas áreas das instalacións, rexistrando de forma sistemática as observacións mediante a toma de notas e a captación de imaxes fotográficas e de vídeo. Esta documentación incluíu tanto momentos significativos da actividade coma elementos relevantes da sinalización presente no espazo (carteis informativos, planos de evacuación, indicacións de emerxencia etc.). Tamén se lle realizaron pequenas entrevistas ao persoal profesional dos balnearios.



Figura 2. Realización do traballo de campo no Hotel OCA Vila de Allariz, 09/07/2025

Durante o percorrido, as técnicas formuláronlles diversas preguntas aos participantes co propósito de avaliar a súa capacidade de orientación e comprensión do espazo. As cuestións tratadas incluíron aspectos como o recoñecemento e o uso das saídas de emerxencia, a identificación de itinerarios internos, a interpretación de sinalizacións visuais e planos de evacuación, así como a toma de decisións ante hipotéticas situacións

de risco. Esta interacción permitiu recoller información cualitativa clave sobre a accesibilidade cognitiva do espazo desde a perspectiva das persoas con discapacidade intelectual.



Figura 3. Realización do traballo de campo no Hotel OCA Vila de Allariz, 09/07/2025

Por último, a partir da información recollida nas etapas de identificación e observación participante, o equipo avaliador da entidade FADEMGA analizou os datos co obxectivo de identificar elementos positivos, barreiras existentes e oportunidades de mellora. Os resultados plasmáronse nun informe no que se recompilou todo o proceso de avaliación, describindo os problemas de accesibilidade detectados nos balnearios e formulando propostas de intervención.

3.4 Cuarta fase

Finalmente, desenvolveuse unha fase de difusión e transferencia dos resultados, orientada á socialización do coñecemento xerado. Esta incluíu a elaboración de publicacións científicas, a participación en congresos e a organización dunha xornada divulgativa, co obxectivo de visibilizar e promover a aplicación práctica das melloras propostas e fomentar a accesibilidade cognitiva no ámbito do turismo termal.

4. Resultados

Os resultados do proxecto Ourense TermalAcces evidencian a existencia de múltiples barreiras de accesibilidade cognitiva nos equipamentos termais analizados, e confirman que esta dimensión continúa a ser unha das menos desenvolvidas dentro do ámbito da accesibilidade. A análise realizada, baseada nunha avaliación técnica e participativa, permitiu identificar padróns comúns de dificultade tanto no Hotel-Balneario Oca Vila de Allariz coma no Laías Caldaria Hotel-Balneario. Estas barreiras teñen un impacto directo na experiencia das persoas con discapacidade intelectual, xerando situacións de desorientación, inseguridade e dependencia do persoal e materialízanse en dificultades na comprensión da sinalización, na toma de decisións e na interpretación dos percorridos; factores que evidencian que o deseño dos espazos non responde ás necesidades de comprensión de todos os perfís de persoas usuarias.

Cómpre salientar, ademais, que estas limitacións non afectan exclusivamente ás persoas con discapacidade intelectual, senón tamén a outros colectivos, como persoas maiores ou persoas que se atopan nun contorno descoñecido. Isto reforza a idea de que a accesibilidade cognitiva ten un carácter universal e contribúe a mellorar a experiencia de uso para o conxunto da poboación.

4.1 Barreiras de accesibilidade cognitiva identificadas

Neste apartado e co propósito de estruturar os resultados obtidos de maneira ordenada e facilitar a súa comprensión, definíronse cinco apartados: (1) localización e identificación nos espazos exteriores; (2) acceso aos edificios; (3) orientación e desprazamento nos espazos interiores; (4) uso e identificación de servizos; (5) seguridade e emerxencias.

4.1.1 Localización e identificación dos espazos exteriores

En primeiro lugar, detectáronse importantes limitacións na localización e identificación dos espazos, especialmente no exterior dos complexos. A sinalización resulta insuficiente, pouco visible ou incoherente, empregándose en ocasións diferentes denominacións para referirse ao mesmo equipamento, o que xera confusión nas persoas usuarias. Ademais, a ausencia de información clara sobre a distribución dos espazos e a escasa presenza de elementos orientativos (como planos ou indicacións direccionais) dificultan a comprensión global dos recintos desde o primeiro contacto co contorno.

4.1.2 Acceso aos edificios

En relación cos accesos, identificáronse dificultades significativas na identificación das entradas aos edificios e na comprensión da información asociada. As portas non están claramente sinalizadas como puntos de acceso, a información dispoñible presenta unha linguaxe complexa ou pouco accesible, e en ocasións existe unha sobrecarga informativa que xera ruído visual. Así mesmo, observáronse contradicións ou ambigüidades na comunicación das normas e horarios, o que contribúe a incrementar a incerteza e a dificultade do uso autónomo dos espazos.



Figura 4. Traballo de campo no Laias Caldaria Hotel Balneario, 30/07/2025

4.1.3 Orientación e desprazamento nos espazos interiores

Un dos ámbitos onde se evidencian maiores dificultades é o relativo á orientación e desprazamento no interior dos edificios. A ausencia de directorios xerais, a falta de sinalización direccional clara e a utilización de nomenclaturas non homoxéneas dificultan a interpretación dos espazos e a toma de decisións. Detectáronse tamén problemas na organización da información, como numeracións pouco intuitivas, incoherencias na denominación dos espazos ou sinalizacións incompletas que non recollen todos os servizos dispoñibles. Estas limitacións repercuten directamente na capacidade das persoas para orientarse de maneira autónoma e segura.

4.1.4 Uso e identificación de servizos

No que respecta á identificación dos usos e servizos, observouse unha falta xeneralizada de claridade e coherencia. Moitos espazos non están correctamente identificados ou presentan denominacións confusas, cambiantes ou pouco intuitivas. Ademais, a ausencia de apoios visuais –como pictogramas– limita a accesibilidade da información, especialmente para persoas con dificultades de comprensión lectora. A disposición da información, en ocasións situada en lugares pouco visibles ou ocultada cando as portas están abertas, agrava estas dificultades.

4.1.5 Seguridade e emerxencias

Outro aspecto relevante é a accesibilidade da información relacionada coa seguridade e as emerxencias. Aínda que existen elementos básicos de seguridade, a súa comunicación non sempre é clara nin comprensible, o que pode comprometer a capacidade de resposta das persoas usuarias en situacións de risco. A falta de sinalización accesible e de información facilmente interpretable limita a percepción de seguridade e a autonomía no uso dos espazos.



Figura 5. Sinalización no caso de emerxencias no Hotel OCA Vila de Allariz

4.2 Elementos positivos

Xunto ás dificultades identificadas, os informes recollen tamén elementos positivos e boas prácticas nos balnearios analizados, como a disposición do persoal dos centros, a existencia de itinerarios fisicamente accesibles ou a presenza de espazos amplos e ben iluminados, que constitúen unha base adecuada para a posta en marcha de melloras. O feito de que ambos os balnearios colaboraran na realización da diagnose, mostra un interese específico na accesibilidade cognitiva e un compromiso pola mellora da inclusión social. As propostas formuladas nas diagnoses son, na súa maioría, actuacións de baixo custo económico e alto impacto social, orientadas a mellorar a comprensión, a orientación, a seguridade e a experiencia global das persoas usuarias.

4.3 Propostas de mellora

Finalmente, os resultados permitiron formular unha serie de propostas de mellora orientadas á simplificación da información, á homoxeneización da sinalización, á incorporación de pictogramas e apoios visuais e á mellora da organización espacial e comunicativa dos equipamentos, como se pode observar na táboa 2.

Ámbito de intervención	Descrición das propostas de mellora
Sinalización e identificación	Mellorar a visibilidade, coherencia e homoxeneidade da sinalización; incorporar pictogramas normalizados, textos en lectura fácil e frechas direccionais; garantir o contraste adecuado e o tamaño lexible; evitar duplicidades ou nomes distintos para un mesmo espazo
Organización da información	Reducir o ruído visual e dar prioridade á información relevante; empregar unha linguaxe clara e accesible; unificar a información en puntos estratégicos; evitar contradicións e ambigüidades nas normas e indicacións
Orientación e navegación	Instalar directorios xerais e planos sinxelos; mellorar a sinalización direccional nos itinerarios; facilitar a comprensión da estrutura dos espazos; establecer sistemas coherentes de numeración e organización
Accesos e entradas	Identificar claramente as entradas aos edificios e servizos; diferenciar portas e mellorar a súa comprensión; incorporar información accesible sobre horarios e normas; reducir barreiras físicas e cognitivas.
Identificación de usos e servizos	Sinalizar correctamente todos os espazos (baños, recepción, zonas comúns); incorporar apoios visuais; situar a información en lugares visibles e accesibles

Ámbito de intervención	Descrición das propostas de mellora
Seguridade e emerxencias	Adaptar a sinalización de emerxencia para facela comprensible; facilitar a identificación de saídas e itinerarios de evacuación; garantir información clara en situacións de risco
Deseño espacial e comprensión	Simplificar a organización dos espazos; evitar distribucións confusas; mellorar a iluminación e a visibilidade en zonas clave; favorecer percorridos intuitivos

Táboa 2. Resumo das propostas de mellora en accesibilidade cognitiva nos balnearios analizados

Como se pode observar, as liñas de intervención identificadas responden maioritariamente a actuacións de baixo custo e alto impacto, orientadas a mellorar a comprensión, a orientación e o uso autónomo dos espazos. Isto favorece unha experiencia máis accesible e inclusiva.

4.4 Transferencia dos resultados

Como peche do proxecto de investigación e como acción de transferencia e retorno social, desenvolveuse unha xornada de traballo específica do proxecto Ourense TermalAcces, que se levou a cabo o 14/10/2025 na Facultade de Educación e Traballo Social en Ourense. Esta xornada foi concibida como un espazo de intercambio entre persoal investigador, profesionais do ámbito social e entidades vinculadas á discapacidade. Así, participou todo o equipo investigador da Universidade de Vigo, o equipo de traballo de FADEMG, asistiu tamén persoal institucional da Deputación de Ourense e alumnado dos graos de Educación Social e de Traballo Social da citada facultade. Nesta xornada presentáronse os principais resultados do proxecto, reflexionouse sobre os retos pendentes en materia de accesibilidade cognitiva nos recursos termais e fomentouse o debate arredor da súa posta en práctica. O alumnado mostrou un interese específico na formación vinculada coa temática de accesibilidade cognitiva; unha formación que debe ser unha prioridade para o seu posterior desenvolvemento profesional, baseado na inclusión social e na defensa dos dereitos.



Figura 6. Xornada Ourense TermalAcces, 14/10/2025

Conclusións

O presente traballo permitiu analizar o grao de accesibilidade cognitiva en dous balnearios integrados no Programa de termalismo social da Deputación de Ourense, evidenciando que esta dimensión continúa a ser insuficientemente considerada no ámbito do turismo termal. Os resultados obtidos confirman a existencia de limitacións relevantes na sinalización, na organización da información e na estrutura dos percorridos, o que xera situacións de desorientación, inseguridade e dependencia do persoal. Neste sentido, o estudo evidencia que a accesibilidade cognitiva segue a ocupar un papel secundario nas intervencións en accesibilidade, a pesar do seu impacto directo na experiencia de uso e na inclusión social. A ausencia de criterios claros no deseño e na comunicación dos espazos manifesta a necesidade de incorporar esta dimensión de maneira sistemática nas políticas e prácticas do sector turístico.

Por outra banda, os dous balnearios seleccionados tamén mostraron boas prácticas neste eido, especificamente as vinculadas ao compromiso do seu persoal coa inclusión e a accesibilidade. En xeral, as propostas de mellora formuladas neste proxecto demostran que é posible avanzar cara a contornos máis comprensibles e inclusivos mediante actuacións de baixo custo e alto impacto, centradas fundamentalmente na simplificación da información, na homoxeneización da sinalización e na incorporación de apoios visuais. Isto reforza a viabilidade da súa implementación e o seu potencial para mellorar a autonomía das persoas usuarias. Neste contexto, resulta fundamental avanzar cara a modelos de deseño universal que integren a diversidade de necesidades desde a súa concepción para garantir unha experiencia accesible, autónoma e inclusiva para toda a poboación.

Referencias

- [1] International Organization for Standardization (2014). Guide for addressing accessibility in standards. Internet Engineering Task Force. <https://www.iso.org/standard/57385.html>
- [2] Boudeguer Simonetti, A., Prett Weber, P. e Squella Fernández, P. (2020). Manual de accesibilidad universal. Corporación Ciudad Accesible, Boudeguer & Squella ARQ. https://www.ciudadaccesible.cl/wpcontent/uploads/2012/06/manual_accesibilidad_universal1.pdf
- [3] Chamorro, M. e Silvero Arévalos, J. (2014). Enfoque de la Convención internacional sobre los derechos de las personas con discapacidad: las Tecnologías de la información y comunicación como elemento de inclusión social. Revista Internacional de Investigación En Ciencias Sociales, 10(2), 239–262. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4934380.pdf>.
- [4] Naciones Unidas. (2014). Convención de los Derechos de las Personas con Discapacidad. Publicaciones de las Naciones Unidas. <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210564694/read>
- [5] IMSERSO (2014). Accesibilidad cognitiva: Guía de recomendaciones para la comprensión de entornos, productos y servicios. <https://blogceadac.imserso.es/documents/20123/51352/accesibilidadcognitivaceapat.pdf/b173c62a-e888-a5e9-70c4-af7257d11aa2?t=1649172240192>
- [6] Plena Inclusión. (2018). Guía de evaluación de la accesibilidad cognitiva de entornos. Plena Inclusión España. <https://www.plenainclusion.org/publicaciones/buscador/posicionamiento-sobre-accesibilidad-cognitiva-lectura-facil/>
- [7] FADEMGA. (2025). Informe de avaliación da Accesibilidade Cognitiva do Hotel-Balneario Oca Vila de Allariz. FADEMGA Plena inclusión Galicia.
- [8] Vázquez, I., Riobóo, B., Grech, C. e Pérez-Martín, S. (2025). Ourense TermalAcces: promoción de la accesibilidad termal en la provincia de Ourense. En María del Mar Molero, África Martos, Silvia Fernández y Elena Martínez (comps.). Desafíos emergentes en la investigación en salud: nuevas perspectivas (pp. 157-163). Asociación Universitaria de Educación y Psicología (ASUNIVEP).
- [9] Gordziejczuk, M. A. e Lucero, P. I. (2019). Turismo y calidad de vida: un estudio

de autocorrelación espacial aplicado a la ciudad de Mar del Plata, provincia de Buenos Aires, Argentina. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 28(1), 23–42.

[10] Regalado, M. D. e Pulido, M. (2016). La discapacidad en el turismo de Cáceres. Papers de turisme, 59, (22-25).

[11] Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

[12] Comisión Europea. (2021). Estrategia Europea sobre Discapacidad 2021–2030 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/AUTO/?uri=celex:52021DC0101>

[13] Sardón, F. (2015). El turismo accessible visto por los usuarios. Estudios Turísticos, 203-204(2), 61-68.

[14] Fernández-Villarán, A. (2007). El acceso al turismo para las personas con discapacidad. En Desafíos y compromisos del turismo: hacia una visión más humana (pp. 47–59). Universidad de Deusto.

Estudo sobre a bioactividade de compostos polifenólicos en restos de uva dos subprodutos do viño na rexión galega

Hui Cao

Universidade de Vigo, Grupo de Nutrición e Bromatoloxía, Departamento de Química Analítica e Alimentaria, Facultade de Ciencias, Campus de Ourense, Universidade de Vigo.

Instituto de Agroecoloxía e Alimentación (IAA), Campus Auga, Universidade de Vigo.

hui.cao@uvigo.gal

hui_cao0830@yahoo.com

Shiye Lin

Universidade de Vigo, Grupo de Nutrición e Bromatoloxía, Departamento de Química Analítica e Alimentaria, Facultade de Ciencias, Campus de Ourense, Universidade de Vigo.

Instituto de Agroecoloxía e Alimentación (IAA), Campus Auga, Universidade de Vigo.

linshiye33@163.com

María Paz Otero Fuertes

Universidade de Vigo, Grupo de Nutrición e Bromatoloxía, Departamento de Química Analítica e Alimentaria, Facultade de Ciencias, Campus de Ourense, Universidade de Vigo.

Instituto de Agroecoloxía e Alimentación (IAA), Campus Auga, Universidade de Vigo.

paz.otero@uvigo.es

Juan Carlos Mejuto Fernández

Universidade de Vigo, Grupo de Nutrición e Bromatoloxía, Departamento de Química Analítica e Alimentaria, Facultade de Ciencias, Campus de Ourense, Universidade de Vigo.

Instituto de Agroecoloxía e Alimentación (IAA), Campus Auga, Universidade de Vigo.

xmejuto@uvigo.gal

Resumo

O bagazo de uva é un subproduto principal da industria vitivinícola galega e é rico en diversas substancias bioactivas. Co fin de promover a utilización sostible do bagazo de uva e apoiar o desenvolvemento da economía circular, este estudo investiga de maneira integral a extracción, a estabilidade térmica e a bioactividade dos compostos polifenólicos no bagazo de uva. Mediante a comparación entre a maceración tradicional e técnicas avanzadas como a extracción asistida por ultrasóns, microondas e solventes acelerados, aclarouse a eficiencia de extracción de diferentes compostos polifenólicos do bagazo de uva. Empregouse UPLC-ESI-MS/MS para identificar a composición e o contido dos distintos compostos fenólicos no bagazo de uva. Ademais, mediante a construción dunha rede produto-estrutura-actividade dependente do tempo, investigouse o mecanismo de degradación térmica da isoramnetina, un composto flavonoide representativo presente no bagazo de uva. Identificáronse un total de 12 produtos de degradación térmica, e elucidáronse as substancias responsables da actividade biolóxica dos flavonoides tras o quecemento. Desde unha perspectiva epixenética, este estudo explorou ademais o papel dos polifenóis dietéticos na actividade antioxidante, antiobesidade e antitumoral mediante a regulación da metilación do ADN. En resumo, este traballo proporciona unha base teórica para a utilización sostible e de alto valor engadido do bagazo de uva, ofrece estratexias específicas para a súa aplicación nas industrias de suplementos nutricionais e farmacéutica, e apoia o desenvolvemento dunha economía circular rexional.

Palabras clave: subprodutos da uva, métodos de extracción, compostos polifenólicos, estabilidade térmica, antiobesidade

Galicia é unha recoñecida rexión produtora de viño, pero o proceso de elaboración xera inevitablemente grandes cantidades de bagazo de uva. Aínda que adoita considerarse un residuo, o bagazo de uva é rico en compostos polifenólicos con potenciais beneficios para a saúde, pero non foi aproveitado de forma efectiva. Ao mesmo tempo, os residuos da industria alimentaria supoñen desafíos ambientais e económicos cada vez máis relevantes, o que manifesta a necesidade de estratexias de utilización sostible. Neste contexto, a recuperación e a aplicación eficientes dos compostos bioactivos do bagazo de uva son clave para promover o desenvolvemento dunha economía circular. Por tanto, este estudo ten como obxectivo optimizar métodos eficientes para a extracción de compostos bioactivos do bagazo de uva, esclarecer as transformacións estruturais dos polifenóis durante o procesamento, así como os mecanismos da súa bioactividade, proporcionando unha sólida base científica para a súa utilización sostible.

1. Extracción de polifenois de residuos de sementes de uva: análise quimiométrica

O bagazo de uva é rico en varios compostos polifenólicos bioactivos. A extracción eficiente destes compostos é crucial para a súa aplicación nos campos da alimentación e da saúde. Non obstante, a taxa de recuperación de polifenois vese afectada facilmente polo método de extracción, e a composición de polifenois no bagazo de uva é complexa, o que fai esencial unha caracterización analítica precisa. Polo tanto, este estudo tivo como obxectivo avaliar as recuperacións de diferentes métodos de extracción, caracterizar a composición de polifenois das sementes de uva e analizar máis a fondo a relación entre as técnicas de extracción e a composición de polifenois, para mellorar a utilización eficiente do bagazo de uva.⁷

1.1 Contido fenólico total na semente de uva

O contido fenólico total (CTP) dos extractos de sementes de uva mostrou unha variación significativa dependendo da tecnoloxía de extracción (táboa 1). Entre os métodos de extracción probados, a extracción asistida por microondas (MAE) alcanzou o CTP máis alto (38,99 mg EAG/g), seguida da extracción acelerada con solventes (ASE) (31,30 mg EAG/g), mentres que a maceración convencional (ME) e a extracción asistida por ultrasóns (UAE) produciron valores comparativamente máis baixos (22,32 e 22,75 mg EAG/g, respectivamente). A alta eficiencia da MAE pódese atribuír ao rápido quentamento inducido por microondas, que altera as paredes e as membranas celulares. Isto facilita a penetración do solvente e acelera a liberación dos compostos fenólicos unidos.⁷ Do mesmo xeito, a ASE mellora a eficiencia da extracción mediante a aplicación de presión e temperatura elevadas, o que mellora a difusividade do solvente e reduce a tensión superficial, permitindo unha penetración máis profunda nas matrices vexetais.⁷ Pola contra, a UAE e a ME dependen principalmente de procesos de difusión pasiva, que son menos eficaces para descompoñer as estruturas celulares, o que resulta en rendementos de extracción máis baixos. Ademais, tanto MAE coma ASE reduciron significativamente o tempo de extracción de 60 minutos a aproximadamente 10 minutos, o que demostra as súas vantaxes en termos de eficiencia e escalabilidade. En xeral, estes achados indican que as tecnoloxías de extracción avanzadas non só melloran o rendimento fenólico, senón que tamén ofrecen beneficios prácticos para aplicacións industriais que requiren un procesamento eficiente en termos de tempo e de alto rendimento (figura 1).

Extraction method	Total phenolic content
ME	22,32 ± 1,16 ^c
UAE	22,75 ± 0,95 ^c
MAE	38,99 ± 2,22 ^a
ASE	31,30 ± 2,26 ^b

Nota: os valores do contido total de fenólicos exprésanse como *mg* de equivalentes de ácido gálico (GAE) por *g*. Diferentes letras de superíndice (a, b, c, d) dentro da mesma columna indican diferenzas significativas ($P \leq 0,05$). Os datos preséntanse como media ± desviación estándar ($n = 3$).

Táboa 1. Contido fenólico total e capacidade antioxidante dos extractos de sementes de uva obtidos mediante diferentes métodos de extracción

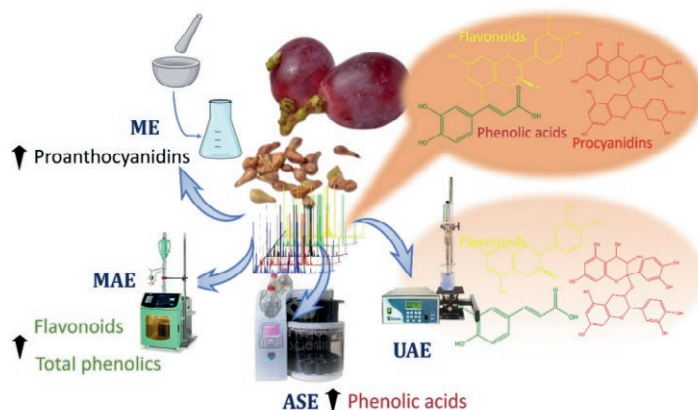


Figura 1. Diagrama de fluxo experimental para a extracción e a identificación de compostos polifenólicos a partir de sementes de uva

1.2 Identificación e análise cuantitativa de polifenois en sementes de uva

A elaboración de perfís exhaustivos de extractos de sementes de uva mediante UPLC-ESI-MS/MS levou á identificación de 24 compostos polifenólicos, que se clasificaron en ácidos fenólicos, flavonoides e proantocianidinas. A identificación conseguiuase mediante a comparación con mostras estándar, tempos de retención e patróns de fragmentación MS/MS, apoiadas por buscas en bases de datos (figura 2). Os ácidos fenólicos clave, como o ácido gálico, o ácido protocatéuico e o ácido sirínxico, detectáronse de forma consistente en todos os métodos de extracción. Os flavonoides, incluíndo a catequina, a epicatequina, a quercetina, a miricetina e os seus derivados glicosilados, representaron a clase máis abundante de polifenois. As proantocianidinas, como a procianidina B1, B2 e os seus derivados oligoméricos, tamén se identificaron como compoñentes principais.

A análise cuantitativa revelou as diferenzas entre os distintos métodos de extracción: o ASE mostrou a maior eficiencia para os ácidos fenólicos, particularmente o ácido gálico, mentres que o MAE demostrou un rendemento superior na extracción de flavonoides, co maior contido total de flavonoides. En contraste, o ME foi máis eficaz na extracción de proantocianidinas, probablemente debido ás súas condicións suaves que preservan estruturas poliméricas complexas. Cabe destacar que non se detectou resveratrol nas sementes de uva, o que coincide con informes previos que indican a súa presenza primaria nas peles da uva. Estes achados salientan a importancia de seleccionar o método de extracción axeitado para extraer tipos específicos de polifenóis e maximizar a taxa de recuperación.

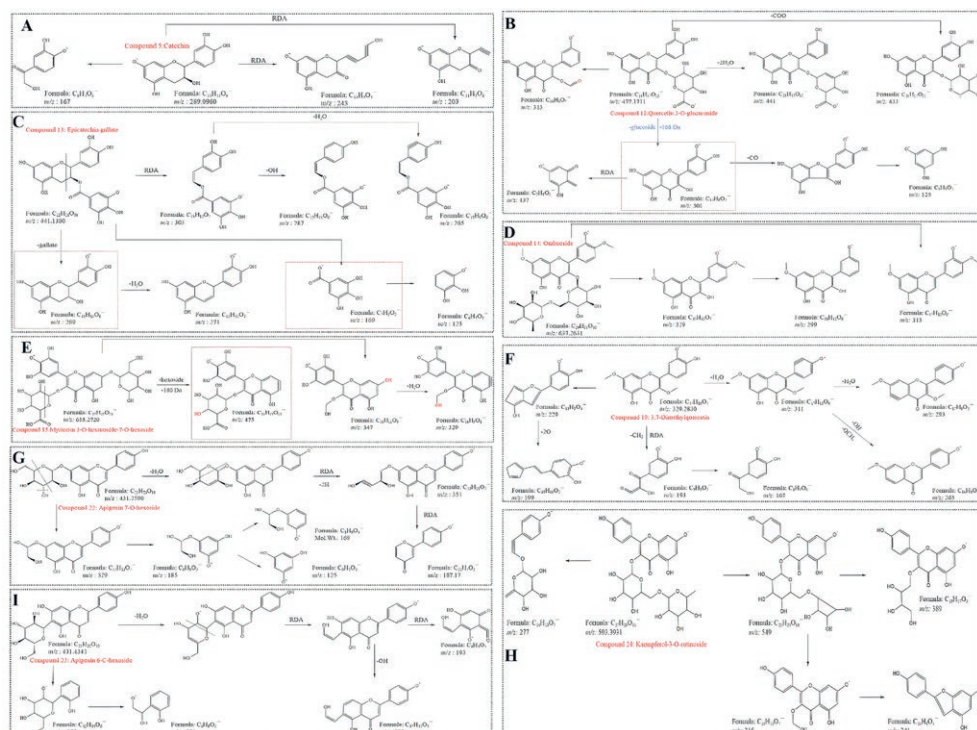


Figura 2. Espectros de fragmentación por espectrometría de masas dos compoñentes químicos nas sementes de uva

1.3 Análise de datos multivariantes de extractos de sementes de uva

A análise de datos multivariantes revelou correlacións significativas entre os polifenóis relacionados coa estrutura e os seus patróns de coextracción (figura 3). A visualización do mapa de color demostrou fortes correlacións positivas entre compostos estruturalmente

2. Degradación térmica da isorhamnetina en presenza de osíxeno

A isorhamnetina (ISO) é un composto polifenólico con actividade biolóxica significativa e abundante no bagazo de uva.⁴ Para mellorar aínda máis o procesamento práctico e a aplicación do bagazo de uva, é necesario investigar a estabilidade e os mecanismos de transformación dos polifenois en condicións de procesamento. En particular, o tratamento térmico, un método común no procesamento de alimentos, pode alterar significativamente a estrutura e a actividade biolóxica dos polifenois. Polo tanto, este estudo explora máis a fondo o comportamento de degradación térmica do composto flavonoide representativo da isorhamnetina e avalía a bioactividade dos seus produtos de degradación.⁵

2.1 A influencia do tratamento a alta temperatura na estabilidade da isorhamnetina

Para simular as condicións térmicas dun ambiente de cocción, quentáronse solucións de ISO nun baño de auga fervendo (figura 4).

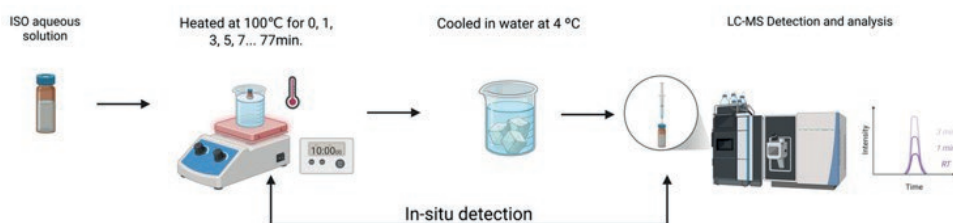


Figure 4. Uso da detección in situ por UPLC-MSMS para explorar a estabilidade térmica da ISO

Durante a incubación, comprobouse que a ISO era extremadamente inestable en auga fervendo. Despois de só 1 minuto de quentamento, a taxa de degradación da ISO alcanzou o 88,8 %. Despois de 18 minutos de quentamento, só quedaba o 20 % da ISO (figura 5A e B). Especúlase que a maior concentración de osíxeno na fase inicial de incubación fixo que a ISO se oxidase máis facilmente, o que finalmente levou á súa rápida degradación. Outros estudos demostraron que o aumento do osíxeno disolto na solución acelera a degradación dos polifenois. Para verificar esta hipótese, mediuse a taxa de retención das solucións de ISO a diferentes concentracións (10, 50, 100, 200 e 500 μM) e a diferentes volumes (500, 750 e 1000 μL) despois de 30 minutos de quentamento. Co aumento da concentración de ISO, a taxa de retención mostrou unha tendencia continua ascendente (11,81 %, 20,44 %, 41,56 %, 58,32 % e 89,65 %, respectivamente).

respectivamente) e, a concentracións máis baixas de 10 μM e 50 μM , a ISO degradouse completamente (figura 5C). Ademais, a unha concentración de 10 μM , un volume maior (1 mL) de ISO no vial de mostra tamén mostrou unha taxa de retención máis alta (1,23 %), o que indica que a taxa de degradación da ISO en auga fervendo está estreitamente relacionada co contido de osíxeno (figura 5D). A medida que a concentración de ISO diminuíu, o aumento do contido relativo de auga levou a un aumento do contido de osíxeno disolto, promovendo así a reacción de oxidación.

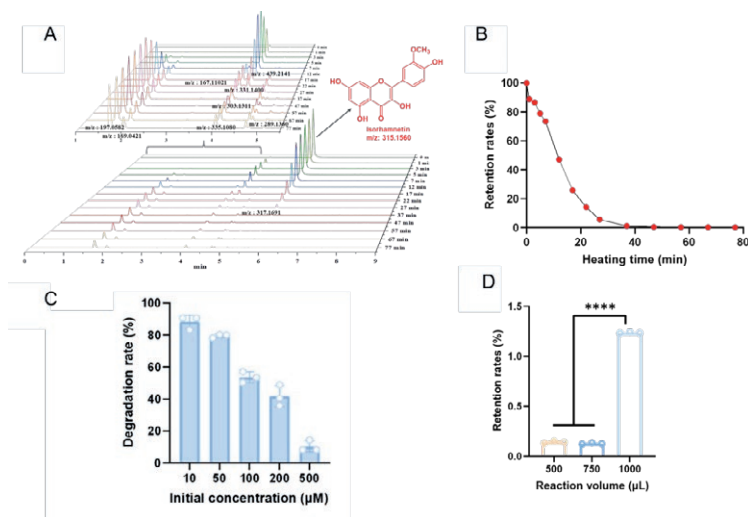


Figura 5. A ISO presenta inestabilidade en auga fervendo

2.2 Produtos de degradación térmica ISO e mecanismos de transformación estrutural

A degradación térmica da ISO en auga fervendo implica unha serie de reaccións de oxidación, hidroxilación, *clivaxe* e recombinación, que levan á formación de diversos produtos, incluíndo ácidos fenólicos, derivados hidroxilados e dímeros. Inicialmente, a ISO sofre autooxidación en condicións térmicas e oxidativas, formando un radical o-semiquinona mediante transferencia dun só electrón, que se converte posteriormente nun intermediario de quinona altamente inestable (figura 6). O ataque nucleofílico posterior na posición C2 xera intermediarios hidroxilados, que sofren rapidamente un rearranxo e unha *clivaxe* do anel C, un paso fortemente exergónico que impulsa o proceso xeral de degradación. Como resultado, fórmanse varios ácidos fenólicos de baixo peso molecular, incluíndo o 2,4,6-trihidroxi-2-oxo-2-fenilacetato, o ácido 2,4,6-trihidroxibenzoico, o ácido vanílico e o 2,4,6-trihidroxibenzaldehído, que se orixinan a partir da *clivaxe* dos aneis A e B e representan produtos finais relativamente

estables. Ademais, detectouse floroglucinol en concentracións máis altas, o que confirma o seu papel como produto típico da degradación do anel A. Ademais, identificáronse múltiples adutos e derivados hidroxilados. Un derivado ISO hidroxilado apareceu rapidamente pero diminuíu co tempo, o que indica a súa inestabilidade e o seu papel como un intermediario clave que sofre un maior rearranxo estrutural, incluíndo a apertura do anel C e a conversión a estruturas de tipo calcona. Outros derivados, como os produtos desmetilados e hidroxilados, mostraron unha acumulación gradual. Tamén se observaron reaccións secundarias, incluíndo a conxugación entre ISO e fragmentos fenólicos máis pequenos, así como transformacións que implican descarbonilación, desoxixenación e hidroxenación. Ademais, a concentracións máis altas e quecemento prolongado, as moléculas ISO poden formar dímeros a través de interaccións intermoleculares. É probable que estes dímeros se formen a través de enlaces C-C, que son máis estables termicamente ca os enlaces C-O-C, e a súa formación é promovida por un aumento da mobilidade molecular e da frecuencia de colisións a temperaturas elevadas.

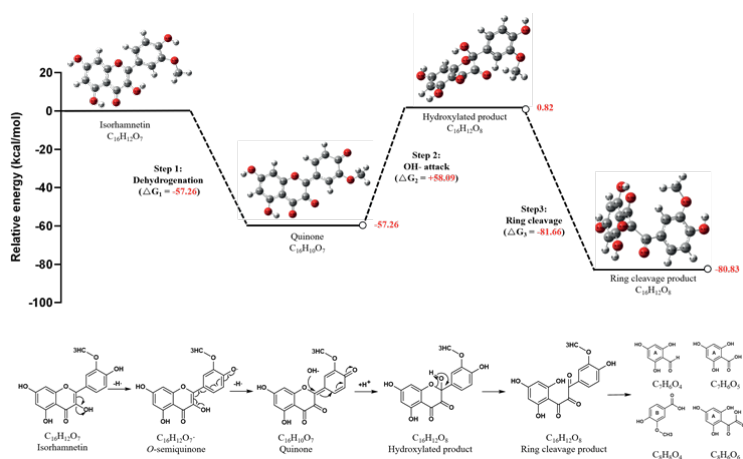


Figura 6. A formación de ácidos fenólicos durante a degradación térmica ISO

2.3 Actividade antiobesidade dos produtos de degradación da ISO

Para avaliar os efectos do quecemento na bioactividade da ISO, investigouse sistematicamente a actividade antiobesidade da ISO e os seus principais produtos de degradación, o floroglucinol (PG) e o ácido 2,4,6-trihidroxibenzoico (THBA). Os resultados mostraron que nun modelo de acumulación de lípidos inducida por glicosa en *C. elegans*, tanto a ISO coma os seus produtos de degradación mantiveron unha actividade significativa de redución dos lípidos (figura 7).

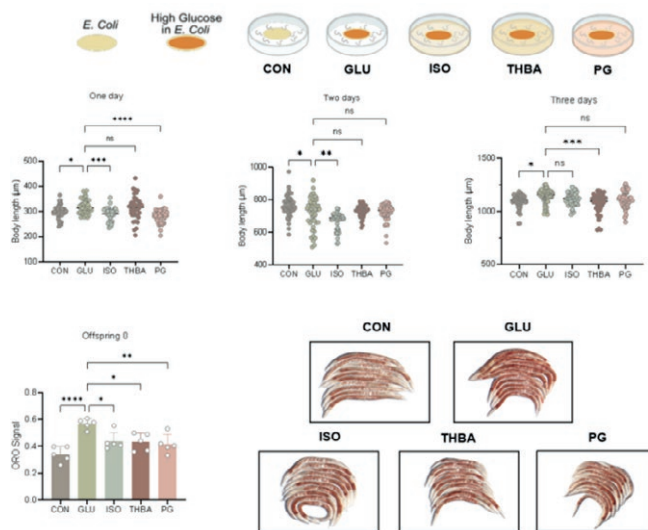


Figura 7. Efectos da ISO na actividade antiobesidade en *C. elegans*

Mecanicamente, a ISO e os seus produtos de degradación (THBA e PG) regulan o metabolismo lipídico a través de vías epixenéticas e metabólicas. Mediante experimentos con mutantes do xene diana *C. elegans*, o mecanismo central implicou a regulación da metilación das histonas, concretamente a regulación de H3K27me3 e H3K4me3. Estas modificacións das histonas están estreitamente relacionadas coa inhibición e activación transcricional, o que indica que a ISO e os seus produtos de degradación poden regular a expresión xénica relacionada coa acumulación de lípidos a través da modificación das histonas. Ademais, observouse que os efectos de redución de graxa inducidos por ISO, THBA e PG implican a participación de DAF-16 (figura 8). O DAF-16 é un factor regulador clave nas respostas ao estrés e na homeostase metabólica, e confirmouse que é un mediador crucial neste proceso.⁶

Ademais da regulación epixenética, a ISO e os seus produtos de degradación tamén influen no metabolismo celular ao alterar as vías metabólicas dun só carbono. Especificamente, demostrouse que tanto a ISO coma os seus produtos de degradación reducen os niveis intracelulares de S-adenosilmetionina (SAM), un doante de metilo primario necesario para as reaccións de metilación. A diminución da dispoñibilidade de SAM pode influir directamente nas modificacións epixenéticas, o que reforza aínda máis os efectos reguladores sobre a expresión xénica. Ademais, observouse unha redución nos niveis de acetil-CoA, que é un substrato clave para a síntese de ácidos graxos e o metabolismo enerxético. Unha menor dispoñibilidade de acetil-CoA limita a biosíntese de lípidos, o que contribúe á redución da acumulación de graxa.

139

3.1 O papel regulador da metilación do ADN

Esta revisión ofrece unha visión xeral completa e sistemática dos papeis reguladores dos compostos bioactivos da dieta na metilación do ADN, integrando coñecementos da ciencia da nutrición, a epixenética e a bioloxía das enfermidades (figura 9). Primeiro resume os mecanismos fundamentais da metilación do ADN, incluíndo o seu establecemento, mantemento, desmetilación e recoñecemento, destacando os papeis coordinados de encimas clave como as ADN metiltransferases (DNMT) e os enzimas de translocación dez-once (TET), así como as proteínas de unión a metil-CpG. Baseándose nesta base mecanicista, a revisión examina ademais a implicación crítica da metilación do ADN na patoxénese e progresión de diversas enfermidades, incluíndo trastornos metabólicos, enfermidades autoinmunes, trastornos neurolóxicos e cancro. É importante destacar que este traballo pon especial énfase no metabolismo dun carbono como un eixe regulador central que vincula a dieta coas modificacións epixenéticas. Desenvolve os papeis interconectados do ciclo do folato, o ciclo da metionina e a vía da transulfuración na xeración de SAM, o doante universal de metilo, e no mantemento do potencial de metilación celular. Ao aclarar como nutrientes esenciais, como o folato, a metionina, as vitaminas B2, B6 e B12, e outros cofactores, inflúen nestas vías metabólicas, este proxecto establece un marco teórico robusto que conecta a inxesta alimentaria, o estado metabólico, a regulación epixenética e os resultados das enfermidades. En xeral, destaca a importancia de considerar tanto as dimensións nutricionais coma as epixenéticas ao investigar os mecanismos da saúde e as enfermidades.

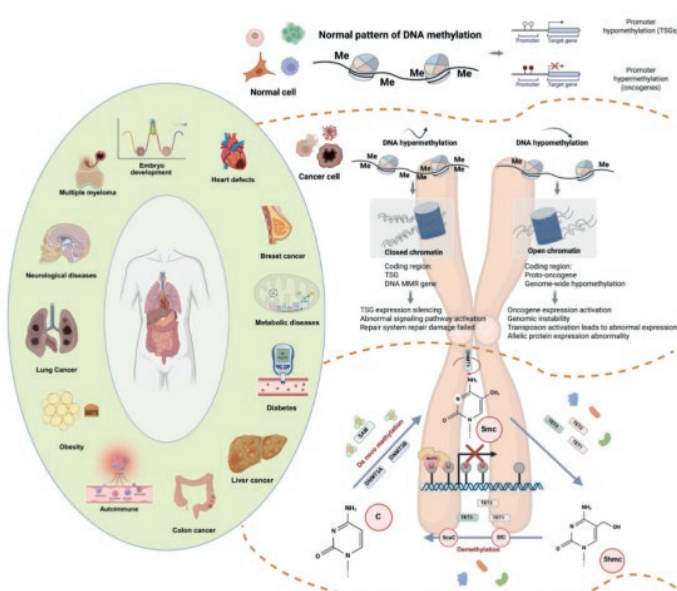


Figura 9. Metilación do ADN e enfermidades humanas

3.2 Substancias activas da dieta e metilación do ADN

Ademais, esta revisión resume sistematicamente os efectos regulatorios epixenéticos dunha ampla gama de compostos bioactivos da dieta, incluíndo polifenóis do té, isoflavonas de soia, flavonóis, estilbenos, curcumina, ácidos fenólicos, sulforafano, aminoácidos esenciais como a metionina, vitaminas, así como outros micronutrientes como a betaína e a coenzima Q10 (figura 10). Os achados indican que estes compostos poden modular a metilación do ADN a través de múltiples mecanismos, como a inhibición directa da actividade DNMT, a competencia por grupos metilo a través de reaccións dependentes de SAM, a alteración da proporción SAM/SAH intracelular e a regulación da metilación do promotor de xenes clave implicados no metabolismo, a inflamación e a tumorexéncese. A revisión tamén destaca as evidencias emerxentes de que os intermediarios metabólicos e as modificacións epixenéticas están estreitamente interconectados, o que suxire que os compoñentes da dieta poden exercer os seus efectos biolóxicos ao remodelar o metabolismo celular e as paisaxes epixenéticas. A revisión tamén destaca as evidencias emerxentes de que os intermediarios metabólicos e as modificacións epixenéticas están estreitamente interconectados, o que suxire que os compoñentes da dieta poden exercer os seus efectos biolóxicos ao remodelar o metabolismo celular e as paisaxes epixenéticas.

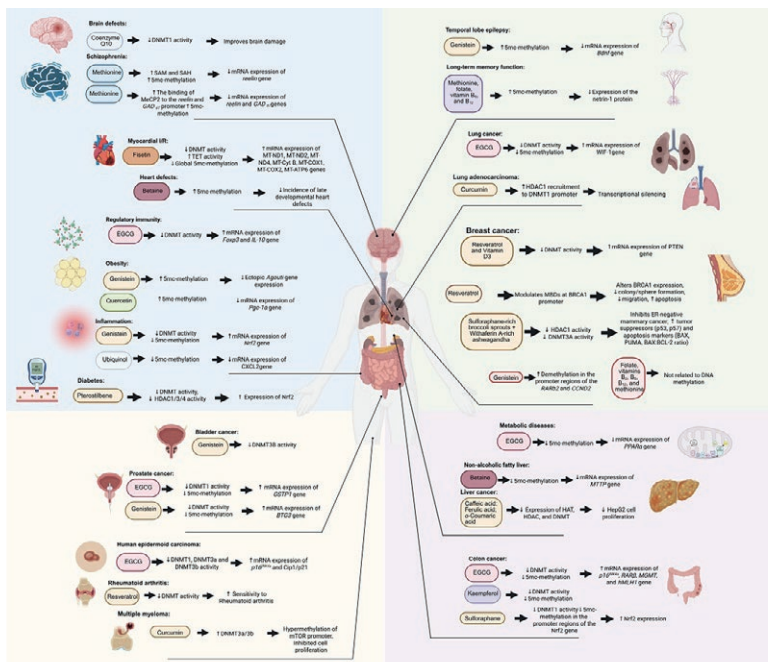


Figura 10. A maquinaria de metilación do ADN como diana de compostos bioactivos da dieta para a prevención e o tratamento de enfermidades

4. Conclusión

Este proxecto tratou sistematicamente os principais desafíos na utilización do bagazo de uva investigando a extracción, a estabilidade térmica e a bioactividade dos seus compostos polifenólicos. Avaliáronse diferentes métodos de extracción para mellorar a recuperación de polifenois, proporcionando unha base para optimizar os métodos de procesamento. Ademais, para comprender mellor como o procesamento afecta á súa estrutura e función, examinouse a estabilidade e a transformación dos polifenois en condicións térmicas. Por outra banda, exploráronse os mecanismos subxacentes da bioactividade dos polifenois desde unha perspectiva epixenética, centrándose na metilación do ADN como unha posible conexión entre os polifenois e os seus efectos biolóxicos.

En xeral, este estudo proporciona unha guía práctica para a súa utilización eficiente do bagazo de uva e contribúe a promover a economía circular na industria vitivinícola.

Referencias

1. Chen, S.; Yuan, Y.; Zhang, F.; Lin, S.; Zou, P.; Farag, M. A.; Simal-Gandara, J.; Cao, H.; Xiao, J., UPLC-ESI-MS/MS-based chemometric approach for investigating the effect of conventional versus modern extraction methods on polyphenols recovery from grape seed wastes. *Food Chemistry* **2025**, *487*, 144619.
2. Hofmann, T.; Visi-Rajczi, E.; Vaculciakova, S.; Guran, R.; Voberkova, S.; Vrsanska, M.; Zitka, O.; Albert, L., Direct microwave treatment enhances antioxidant and antibacterial properties of the seed extracts of Kékfrankos grapes. *Heliyon* **2023**, *9* (11), e21497.
3. Moreira, S. A.; Pinto, C. A.; Alexandre, E. M. d. C.; Pintado, M. E.; Saraiva, J. M. A., Chapter 5 - Assisted extraction of phenolic compounds by pressure-based technologies. In *Technologies to Recover Polyphenols from AgroFood By-products and Wastes*, Pintado, M. E.; Saraiva, J. M. A.; Alexandre, E. M. d. C., Eds. Academic Press: 2022; pp 113-135.
4. Karastergiou, A.; Gancel, A.-L.; Jourdes, M.; Teissedre, P.-L., Valorization of Grape Pomace: A Review of Phenolic Composition, Bioactivity, and Therapeutic Potential. *Antioxidants* **2024**, *13* (9), 1131.
5. Lin, S.; Huang, W.; Zhang, H.; Zhai, K.; Chen, S.; Wu, X.; Wu, H.; Zou, P.; Farag, M. A.; Simal-Gándara, J.; Xiao, J.; Cao, H., Oxygen-Driven Thermal

Degradation of Isorhamnetin in Boiling Water: Product Profiling, Energetics, and Antiobesity Mechanisms in *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **2026**, 74 (9), 7636-7651.

6. Li, A.-P.; Li, D.; Tan, X.; Xu, R.; Mao, L.-X.; Kang, J.-J.; Li, S.-H.; Liu, Y., Crocin extends lifespan by mitigating oxidative stress and regulating lipid metabolism through the DAF-16/FOXO pathway. *Food & Function* **2025**, 16 (9), 3369-3383.

7. Lin, S.; Huang, W.; Wu, X.; Fernández, J. C. M.; Farag, M. A.; Cao, H., The epigenetic regulation between dietary bioactives and DNA methylation via multiple pathways. *Phytochemistry Reviews* **2026**.

Rexistros meteorolóxicos históricos da provincia de Ourense: recuperación, dixitalización e posta a disposición pública

M. Des

*Environmental Physics Laboratory (EphysLab), Centro de Investigación Mariña,
Departamento de Física Aplicada. Campus de Ourense. Universidade de Vigo*

mdes@uvigo.gal

J. González-Cao

*Environmental Physics Laboratory (EphysLab), Centro de Investigación Mariña,
Departamento de Física Aplicada. Campus de Ourense. Universidade de Vigo*

jgcao@uvigo.gal

G. Alvarez-Socorro

*Environmental Physics Laboratory (EphysLab), Centro de Investigación Mariña,
Departamento de Física Aplicada. Campus de Ourense. Universidade de Vigo*

gleisis.alvarez.socorro@uvigo.gal

X. Costoya

*Environmental Physics Laboratory (EphysLab), Centro de Investigación Mariña,
Departamento de Física Aplicada. Campus de Ourense. Universidade de Vigo*

xurxocostoya@uvigo.gal

Os rexistros meteorolóxicos históricos constitúen unha fonte esencial para o estudo da variabilidade climática e para a comprensión dos procesos atmosféricos a escala local. Porén, boa parte desta información permanece historicamente dispersa en arquivos analóxicos, formatos obsoletos ou repositorios de acceso limitado, o que restrinxiu a súa utilización en investigacións climatolóxicas actuais. Neste capítulo preséntase o proceso de recuperación, dixitalización, estruturación e posta a disposición dos rexistros meteorolóxicos históricos da provincia de Ourense, un territorio caracterizado por unha elevada diversidade climática asociada á súa complexa orografía.

O traballo baséase na recompilación de fontes documentais procedentes fundamentalmente da Axencia Estatal de Meteoroloxía (AEMET) e doutros arquivos históricos, que abranguen observacións mensuais de 42 estacións meteorolóxicas no período comprendido entre 1887 e 1995. Os datos dixitalizáronse mediante procesos de escaneo e recoñecemento óptico de caracteres, revisados manualmente e estruturados en formatos estandarizados acompañados de metadatos descritivos. Aplicáronse procedementos de control de calidade e validación estatística para avaliar a coherencia interna das series.

Como resultado, xerouse un conxunto de datos homoxéneo e coherente, publicado a través dunha infraestrutura web de acceso aberto que cumpre cos principios FAIR, que facilitan a súa consulta e reutilización. A análise exploratoria inicial, baseada en estatística descritiva e diagramas de caixa, manifesta unha marcada variabilidade espacial das variables térmicas e pluviométricas, fortemente condicionada pola altitude e a localización das estacións.

Este traballo contribúe á preservación do patrimonio meteorolóxico da provincia de Ourense e fornece unha base robusta para futuros estudos de variabilidade e cambio climático a escala local, así como para aplicacións en planificación territorial e xestión ambiental.

Palabras clave: patrimonio climático, variabilidade climática e datos abertos

1. Introducción

O coñecemento do comportamento climático dun territorio depende en gran medida da existencia de series de observación longas homoxeneizadas e de alta calidade[1]. Os rexistros meteorolóxicos históricos constitúen a base empírica sobre a que se apoian as análises climáticas actuais, permitindo analizar cambios, anomalías e tendencias a distintas escalas temporais. Sen este legado, a comprensión dos procesos climáticos locais e a súa relación cos fenómenos a maior escala sería incompleta [2, 3, 4]. Na provincia de Ourense, estes rexistros teñen un valor particular debido á singular configuración xeográfica da zona. A súa orografía complexa, marcada por vales interiores, serras periféricas e diferenzas altitudinais notables, favorece a existencia dunha gran diversidade de microclimas [5]. Este mosaico climático fai que Ourense sexa un territorio idóneo para estudar as variacións espaciais e temporais dos parámetros meteorolóxicos, así como para avaliar os efectos do cambio climático a pequena escala. Porén, boa parte desta información permanece esquecida en arquivos analóxicos, dispersa en diferentes institucións, ou rexistrada en formatos obsoletos e de acceso limitado. Isto supón unha perda potencial dun patrimonio científico e histórico que, ademais de documentar o

clima, reflicte tamén os esforzos de observadores e institucións que, a través dos anos, contribuíron á construción do coñecemento meteorolóxico [6]. A preservación e a dixitalización destes rexistros non se debe entender unicamente como unha cuestión técnica, senón tamén como unha responsabilidade científica e patrimonial [7]. A recuperación de datos históricos permite ampliar as series temporais dispoñibles, validar modelos climáticos rexionais e mellorar as estratexias de adaptación fronte ás variacións do clima.

1.1 O legado meteorolóxico da provincia de Ourense

Ourense conta cunha longa tradición de observación meteorolóxica. Dende o século XIX existen rexistros de variables meteorolóxicas, sobre todo de temperatura, precipitación, recollidos por estacións situadas en distintos puntos da provincia. Nos inicios, as observacións realizábanse orientadas á comprensión das condicións atmosféricas determinantes na produtividade agrícola, e máis tarde ampliáronse a outros ámbitos como a hidrometeoroloxía ou a prevención de riscos naturais. Ao longo do século XX, as redes de observación foron diversificándose e estas medicións fóronse incorporando a redes nacionais, contribuíndo á construción dun coñecemento máis sistemático do clima galego. Así, xurdiron estacións vinculadas a organismos públicos, institucións educativas, centros de investigación e observadores afeccionados. A Axencia Estatal de Meteoroloxía (AEMET) e o Centro de Investigacións Forestais de Lourizán son dous exemplos de entidades que conservaron rexistros de temperatura, precipitación, vento e outros parámetros meteorolóxicos en distintas localizacións da provincia. A riqueza histórica e territorial destes rexistros é notable; en conxunto abranguen rexistros comprendidos entre 1887 e mediados da década de 1990, que permite reconstruír a evolución do clima local con alta resolución temporal e espacial que transcende o interese local. Esta información é clave para analizar fenómenos como a frecuencia das secas, as variacións térmicas estacionais ou a incidencia de episodios extremos.

Paralelamente, a especificidade do territorio ourensán fai que esta documentación sexa unha peza fundamental para comprender os retos actuais relacionados co cambio climático. As características interiores da provincia, a súa dependencia de sectores sensibles ao clima, como o agrícola e o forestal, e a súa exposición a episodios de calor, xeadas ou incendios, converten os datos meteorolóxicos nun recurso esencial para a planificación territorial e a sustentabilidade ambiental. A análise prolongada das series históricas permite detectar tendencias locais que, en moitos casos, non resultan evidentes en estudos de maior escala xeográfica. Así, os rexistros ourensáns contribúen á comprensión dos padróns climáticos da Galicia interior e ofrecen información valiosa para deseñar estratexias de adaptación ás condicións cambiantes, como a selección de

cultivos resistentes, a xestión dos recursos hídricos ou a prevención de riscos naturais. Deste xeito, o valor científico e social dos rexistros meteorolóxicos de Ourense transcende a simple acumulación de datos e constitúe unha fonte esencial para a investigación, a planificación e a sensibilización sobre a realidade climática contemporánea.

1.2 Problemática da dispersión e motivación da dixitalización

Os rexistros meteorolóxicos antigos adoitan atoparse fragmentados, tanto espacial coma institucionalmente. En moitos casos, a información aparece dispersa en volumes impresos, informes anuais, follas manuscritas ou documentos escaneados sen estrutura nin etiquetaxe estándar. Isto impide o seu tratamento automatizado e dificulta a comparabilidade entre estacións e períodos históricos. A falta de accesibilidade tradúcese tamén nun uso moito menor do que cabería esperar dun recurso con elevado potencial científico [8]. Moitos estudos limitan o seu ámbito temporal ás series instrumentais das últimas décadas unicamente porque os rexistros anteriores non están dispoñibles en formatos manexables.

A dixitalización resolve este problema mediante a conversión dos datos a formatos estruturados e interoperables, nos cales cada valor é acompañado de metadatos que describen a súa procedencia, localización, unidade e contexto. Deste modo, os rexistros antigos intégranse nas infraestruturas modernas de datos científicos, que permiten a súa consulta, visualización e análise automatizada. Ademais, o proceso de dixitalización contribúe a preservar a información ante a deterioración física dos soportes orixinais. A creación de copias dixitais de alta calidade garante a conservación a longo prazo e a posibilidade de revisión por parte da comunidade científica.

1.3 A ciencia aberta e os datos climatolóxicos

Nos últimos anos, o movemento pola ciencia aberta transformou a maneira de producir e compartir coñecemento. A apertura dos datos é hoxe un principio esencial que busca facer a información científica accesible, verificable e reutilizable. Os principios FAIR (siglas de *Findable, Accessible, Interoperable e Reusable*) fornecen un marco para xestionar e publicar datos científicos de maneira eficiente. Aplicados ao ámbito da meteoroloxía, estes principios permiten que os rexistros históricos, unha vez dixitalizados, poidan ser localizados facilmente, consultados por calquera investigador ou cidadán, combinados con outros conxuntos de datos e empregados en novas análises. A adopción deste enfoque non só incrementa o valor científico dos datos, senón que tamén favorece a súa aplicación en políticas públicas, educación ambiental e xestión de recursos naturais. Deste modo, a dixitalización de rexistros meteorolóxicos converte un arquivo pasivo nun instrumento vivo para o coñecemento e a acción climática.

A continuación, este capítulo trata de maneira detallada o proceso de recuperación e dixitalización dos rexistros meteorolóxicos históricos de Ourense. Na segunda sección descríbense os obxectivos e a metodoloxía empregada para recompilar, estruturar e estandarizar a información. A terceira presenta os principais resultados obtidos, mentres que a cuarta aborda unha discusión sobre o impacto científico, social e territorial desta iniciativa. Finalmente, fórmulanse as conclusións xerais, nas que se destacan as aprendizaxes e as perspectivas futuras para a conservación e apertura dos datos meteorolóxicos históricos.

2. Obxectivos

O obxectivo xeral deste traballo é recuperar, dixitalizar e organizar rexistros meteorolóxicos históricos da provincia de Ourense, asegurando a súa conservación a longo prazo e a súa posta a disposición pública mediante unha infraestrutura de acceso aberto.

Deste obxectivo derivan os seguintes obxectivos específicos:

- Identificar e compilar fontes documentais de rexistros meteorolóxicos históricos dispersos en diferentes institucións.
- Dixitalizar e estruturar os rexistros nun formato estandarizado e interoperable.
- Desenvolver unha infraestrutura de almacenamento e consulta en liña baixo os principios FAIR.
- Realizar unha análise exploratoria dos datos recompilados para avaliar a súa consistencia e identificar tendencias históricas.
- Difundir os resultados e promover a alfabetización científica arredor do uso dos datos climáticos abertos.

3. Metodoloxía

O desenvolvemento do traballo seguiu un enfoque iterativo e paralelo, no que as diferentes fases (recompilación, dixitalización, estruturación e validación) fóronse executando de forma simultánea e interdependente. Este deseño metodolóxico buscou optimizar o tempo de execución e permitiu a retroalimentación continua entre tarefas: mentres se incorporaban novos rexistros, avanzábase na súa dixitalización e revisión, o que facilitou a detección temperá de erros e a homoxeneización dos criterios de codificación.

A metodoloxía combinou tres liñas de traballo principais:

- Investigación documental: localización e avaliación de fontes primarias.
- Procesamento e dixitalización: conversión dos rexistros analóxicos a formatos estruturados dixitais.
- Análise e control de calidade: validación estatística, depuración de datos e comprobación de coherencia temporal e espacial.

3.1 Recompilación das fontes documentais

Os datos proceden fundamentalmente dos anuarios e resumos de observación editados pola Axencia Estatal de Meteoroloxía (AEMET) e dos arquivos do Centro de Investigacións Forestais de Lourizán [9].

Os rexistros procedentes do catálogo dixital da AEMET, dispoñible a través do Arquivo Climatolóxico e Meteorolóxico Institucional (Arcimis, <https://repositorio.aemet.es/>). Este repositorio reúne publicacións históricas de observación meteorolóxica, entre elas anuarios, boletíns e resumos de observación, que abranguen boa parte das estacións localizadas na provincia de Ourense. A utilización deste recurso permitiu acceder a copias dixitais de alta calidade en formatos JPEG (.jpg) e PDF (*Portable Document Format*) e garantir a trazabilidade e autenticidade das series orixinais, facilitando a súa integración no proceso de dixitalización e estruturación dos datos.

A selección das fontes baseouse na existencia de identificación clara da estación e localización verificable, en que os datos tivesen unha continuidade temporal mínima dun ano. Así, os rexistros dixitalizados cobren o período 1887-1995 e inclúen observacións mensuais de 42 estacións meteorolóxicas.

3.2 Dixitalización e estruturación dos rexistros

Os documentos analóxicos foron dixitalizados mediante escaneo a alta resolución (600 dpi) e almacenados con formato JPEG.

Os arquivos dixitais foron procesados por recoñecemento óptico de caracteres (OCR). A maiores realizouse unha revisión manual completa para corrixir erros de procesamento e garantir a integridade dos valores xa que, debido á variabilidade tipográfica dos documentos históricos, así como á calidade dos documentos os procesos de OCR, adoitan conter erros.

Os datos foron estruturados en ficheiros en formato CSV (*Comma-Separated Values*), escollidos pola súa compatibilidade con ferramentas de análise climatolóxica, mentres que os metadatos recolléronse en arquivos de texto plano (TXT). Durante o proceso

de carga incorporáronse elementos descritivos básicos, tales como: nome da estación, coordenadas xeográficas, altitude, variables dispoñibles e unidades de medida, nome da persoa responsable das medicións e os equipos utilizados. O nome das estacións mantívose seguindo a fonte orixinal.

3.3 Control de calidade e validación interna

A medida que se dixitalizaban novos rexistros, levouse a cabo un control de calidade. Para cada estación verificáronse valores extremos, consistencia temporal, presenza de duplicados e intervalos anómalos.

Aplicáronse procedementos de validación baseados en estatística descritiva (media, desviación estándar e percentís) e comprobouse a coherencia interna das variables térmicas ($T_{\max} \geq T_{\text{media}} \geq T_{\min}$). As revisións realizáronse con ferramentas de software libre, concretamente R (versión 4.3.2) (R Foundation for Statistical Computing, 2023), o que permitiu reproducir e documentar todos os pasos do procesamento.

3.4 Infraestrutura de datos abertos

Os datos dixitalizados foron organizados e publicados a través dunha infraestrutura web específica accesible na seguinte dirección <https://ephyslab.uvigo.es/dixiou/>. A plataforma funciona como un repositorio aberto de datos meteorolóxicos históricos destinados á consulta e descarga libre tanto pola comunidade científica coma polo público xeral. A interface web ofrece unha estrutura sinxela e intuitiva que permite visualizar a relación de estacións meteorolóxicas dispoñibles na provincia de Ourense, xunto coa súa localización xeográfica.

Cada estación conta cunha páxina de acceso individual, desde a que se poden descargar os arquivos correspondentes. Estes ficheiros conteñen as series de datos acompañadas dos metadatos. A web inclúe tamén unha sección descritiva do proxecto, onde se explica o proceso de recuperación e dixitalización dos rexistros, así como unha descrición básica da metodoloxía empregada. A actividade da plataforma responde aos principios FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*), priorizando o acceso libre, a transparencia e a reproducibilidade.

A aloxamento e o mantemento do sitio realízanse nos servidores institucionais da Universidade de Vigo, o que garante a estabilidade, durabilidade e seguridade da información. O acceso é libre e non require rexistro previo, e os datos publícanse baixo licenza Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), que permite o seu uso, modificación e redistribución, sempre que se cite a fonte orixinal.

3.5 Análise exploratoria dos datos

Unha vez consolidado o conxunto de datos validado, realizouse unha análise exploratoria inicial destinada a avaliar a súa coherencia interna e obter estatísticas descritivas básicas. O procesamento realizouse integramente con R (v. 4.3.2), utilizando os paquetes *tidyverse*, *lubridate*, *ggplot2* e *trend*. Para cada estación calculáronse medidas de tendencia central e dispersión (media, mediana, desviación típica, percentís 5-95) e avalíouse a continuidade temporal das series. Posteriormente, agregáronse as series a escala anual e decenal para estudar a evolución temporal. A representación gráfica elaborouse mediante diagramas de caixa (*boxplots*) e series temporais (*line plots*), utilizadas para identificar valores atípicos e variacións interanuais. Esta análise resulta útil para verificar a consistencia espacial dos datos e preparar as series para estudos posteriores de variabilidade e cambio climático a escala local.

4. Resultados

O proceso de recuperación, dixitalización e estruturación dos rexistros meteorolóxicos históricos da provincia de Ourense deu lugar á creación dun conxunto de datos homoxéneo, coherente e accesible, que constitúe unha base sólida para o estudo da variabilidade climática a escala local. Os resultados obtidos poden agruparse en catro bloques principais: (i) recuperación e cobertura dos datos, (ii) calidade e consistencia das series, (iii) implementación dunha infraestrutura de acceso aberto e (iv) primeiros resultados da análise exploratoria.

4.1 Recuperación e cobertura espacial e temporal dos rexistros

Como resultado da investigación documental e do proceso de dixitalización recompiláronse datos mensuais correspondentes a un total de 42 estacións meteorolóxicas situadas na provincia de Ourense, cunha cobertura temporal que se estende desde 1887 ata 1995. A duración das series é variable entre estacións, aínda que todas teñen unha resolución mensual, condicionada pola dispoñibilidade e continuidade dos rexistros orixinais.

A distribución espacial das estacións (figura 1) abrangue tanto vales interiores coma áreas de media e alta altitude, reflectindo a diversidade topográfica da provincia. Esta heteroxeneidade espacial incrementa o valor do conxunto de datos, xa que permite analizar diferenzas microclimáticas e contrastes térmicos e pluviométricos asociados á orografía.

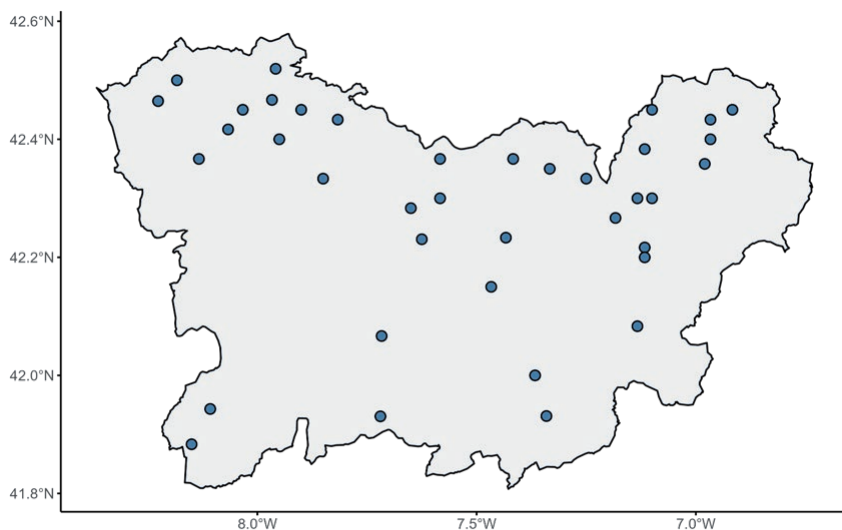


Figura 1. Mapa da provincia de Ourense coa localización das estacións meteorolóxicas para as que se recuperaron e dixitalizaron rexistros meteorolóxicos históricos. Os puntos representan a distribución espacial das estacións incluídas no repositorio

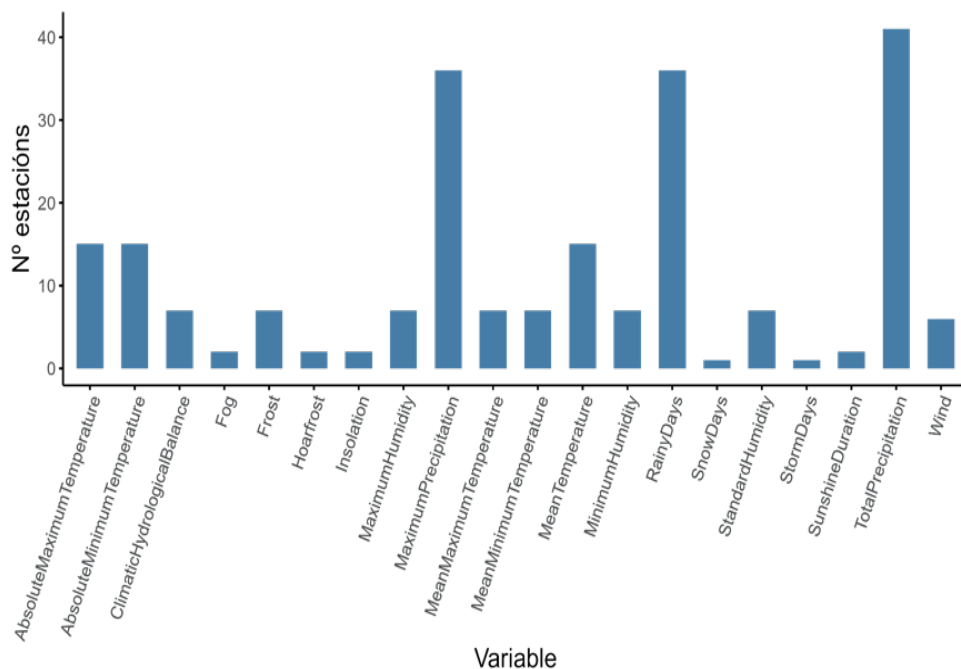


Figura 2. Distribución do número de estacións meteorolóxicas con datos dispoñíbles por variable meteorolóxica

A figura 2 amosa o número de estacións meteorolóxicas da provincia de Ourense que dispoñen de rexistros para cada unha das variables meteorolóxicas recuperadas durante o proceso de dixitalización. Esta representación permite avaliar de forma sintética a cobertura do conxunto de datos e identificar aquelas variables con maior e menor presenza nas series históricas. Tal e como se observa na figura, as variables con maior número de estacións dispoñibles son as relacionadas coa precipitación, precipitación total, a precipitación máxima e o número de días con chuvia. En segundo lugar destacan as relacionadas coa temperatura, como a temperatura máxima e mínima absolutas e a temperatura media. Este resultado é coherente coa orientación histórica das observacións meteorolóxicas na provincia, nas que a pluviosidade e a temperatura constitúen unha prioridade tanto desde o punto de vista agronómico coma climatolóxico. Pola contra, outras variables asociadas a fenómenos máis específicos, como a neve (días de neve, espesor ou número de días con xeadas), a néboa, o orballo, aparecen unicamente nun subconxunto reducido de estacións. Variables como a humidade (media, mínima ou máxima) e o vento presentan unha cobertura intermedia, reflectindo tanto a dispoñibilidade instrumental coma o interese variable por estes parámetros segundo a época e o tipo de estación. A presenza destas variables, aínda que menos frecuente, engade valor ao conxunto de datos ao permitir análises máis completas das condicións atmosféricas locais. En conxunto, a figura evidencia que o conxunto de datos dixitalizado presenta unha forte base pluviométrica e térmica, complementada por variables adicionais que, aínda que menos abundantes, permiten ampliar o espectro de estudos climatolóxicos posibles. Esta diversidade de variables, xunto coa amplitude temporal das series, reforza o potencial do repositorio para análises históricas da variabilidade climática e para estudos específicos sobre extremos e fenómenos meteorolóxicos particulares.

4.2 Calidade dos datos e validación das series históricas

O proceso de control de calidade permitiu identificar e corrixir erros derivados principalmente do recoñecemento óptico de caracteres (OCR), como confusións tipográficas, desprazamentos de columnas ou interpretación incorrecta de símbolos. A revisión manual sistemática resultou clave para asegurar a fidelidade dos datos fronte ás fontes orixinais.

As comprobacións de coherencia interna amosaron un alto grao de consistencia nas series térmicas, cumpríndose de maneira xeral a relación lóxica entre temperatura máxima, media e mínima. Os valores extremos identificados mediante análise estatística foron revisados individualmente, distinguindo entre erros de transcripción e episodios meteorolóxicos plausibles.

A análise da continuidade temporal revelou lagoas en determinadas estacións e períodos, especialmente en momentos de transición institucional ou cambios de observador, unha característica habitual dos rexistros históricos. Porén, estas interrupcións atópanse correctamente documentadas nos metadatos, permitindo a súa consideración en análises posteriores.

En termos xerais, os resultados da validación indican que o conxunto de datos presenta unha calidade adecuada para estudos climatolóxicos exploratorios e análises de longo prazo, sempre que se teñan en conta as limitacións inherentes ás observacións históricas.

4.3 Infraestrutura dixital e acceso aos datos

Un dos resultados principais deste traballo é a posta en funcionamento dunha infraestrutura web de acceso aberto, dispoñible en <https://ephyslab.uvigo.es/dixiou/>, que actúa como repositorio público dos rexistros meteorolóxicos históricos dixitalizados (figura 3). A plataforma permite visualizar a localización das estacións, acceder a páxinas individuais con metadatos e descargar os ficheiros de datos en formato CSV para a súa reutilización. O deseño da infraestrutura favorece a accesibilidade e a reutilización da información. A publicación baixo licenza CC BY 4.0 reforza o carácter aberto do proxecto e facilita a integración dos datos en estudos científicos, traballos académicos, iniciativas educativas e procesos de planificación territorial.

4.4 Análise exploratoria e interpretación espacial das principais variables meteorolóxicas

A análise exploratoria dos datos, baseada na representación mediante diagramas de caixa das principais variables meteorolóxicas, permitiu avaliar a variabilidade espacial das series e relacionar os padróns observados cos metadatos xeográficos das estacións, especialmente a súa altitude e localización. Co obxectivo de facilitar a interpretación territorial destes resultados, os diagramas de caixas foron analizados en combinación cos metadatos xeográficos das estacións e coa selección de estacións representativas recollida na táboa 1. Esta táboa resume estacións situadas en fondos de val, media montaña e alta montaña, permitindo relacionar os rangos observados nos diagramas estatísticos con contextos climáticos concretos. As variables térmicas amosan un gradiente altitudinal claro.

Estación	Altitude (m)	Tipo de localización	Variables principais	Representatividade climática
Ourense Instituto	141	Fondo de val interior	Temperatura, precipitación, extremos	Máximos térmicos absolutos
<u>Berán</u>	135	Fondo de val occidental	Precipitación	Alta pluviosidade a baixa altitude
<u>Graíces (A Peroxa)</u>	294	Val medio interior	Precipitación	Transición val-media montaña
Maceda	573	Media montaña interior	Temperatura, precipitación	Condições térmicas intermedias
Baltar	840	Media-alta montaña	Temperatura, xeadas, vento	Frecuencia de xeadas e descenso térmico
Parada de Sil	900	Montaña interior	Precipitación	Incremento pluviométrico orográfico
San Miguel de Manzaneda	870	Montaña	Precipitación	Clima frío e húmido
<u>Pedreirño</u>	760	Media montaña occidental	Temperatura, humidade, xeadas	Influencia atlántica e xeadas
Monte Medo	560	Media montaña	Conxunto completo de variables	Estación de referencia rexional
Castelo da Pena	740	Media montaña	Conxunto completo de variables	Caracterización integral do clima
Serra do Eixo	1290	Alta montaña occidental	Temperatura, neve, xeadas	Valores mínimos e elevada humidade
Serra de San Mamede 25	1600	Alta montaña	Precipitación	Extremos altitudinais e pluviométricos

Táboa 1. Estacións meteorolóxicas representativas da provincia de Ourense incluídas no repositorio dixital

O conxunto de estacións abrangue un amplo rango altitudinal, desde valores próximos aos 135 m (Berán) e 141 m (Ourense Instituto) en fondos de val ata estacións situadas por enriba dos 1200 m en áreas de montaña (1290 m na Serra do Eixo, 1600 m na Serra de San Mamede 25). Esta amplitude altitudinal reflíctese de maneira clara nos diagramas de caixas das variables térmicas, cun descenso progresivo das temperaturas medias e mínimas conforme aumenta a altitude. As temperaturas medias (figura 3a) e as temperaturas máximas e mínimas medias (figuras 3b e 3c, respectivamente) presentan

unha dispersión considerable, con medianas máis elevadas nas estacións de baixa altitude e valores progresivamente máis baixos en estacións situadas en zonas elevadas, evidenciando un gradiente térmico coherente coa orografía da provincia.

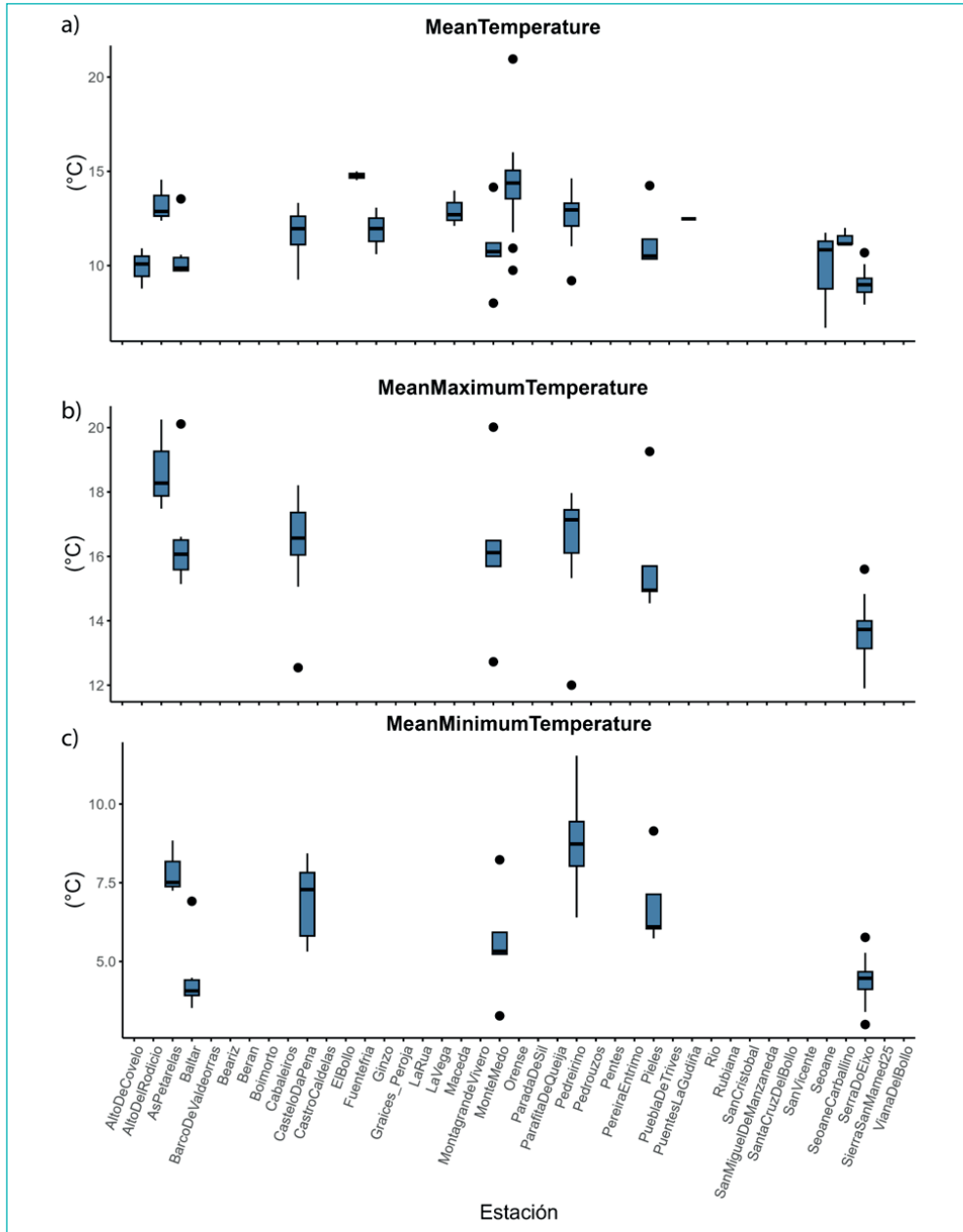


Figura 3. Diagrama de caixa da temperatura media (a), máxima (b) e mínima (c) mensual nas estacións meteorolóxicas da provincia de Ourense

As temperaturas máximas e mínimas absolutas (figuras 4a e 4b, respectivamente) amosan a maior dispersión de todo o conxunto de variables. Os valores máis extremos corresponden principalmente a estacións situadas en vales interiores e zonas abrigadas, onde son frecuentes episodios de calor intensa no verán, así como a estacións de altitude media e alta, nas que se rexistran mínimas absolutas moi baixas asociadas a xeadas severas. A presenza destes extremos resulta coherente coas características climáticas locais e co feito de que varias destas estacións dispoñen tamén de rexistros específicos de días de xeadas.

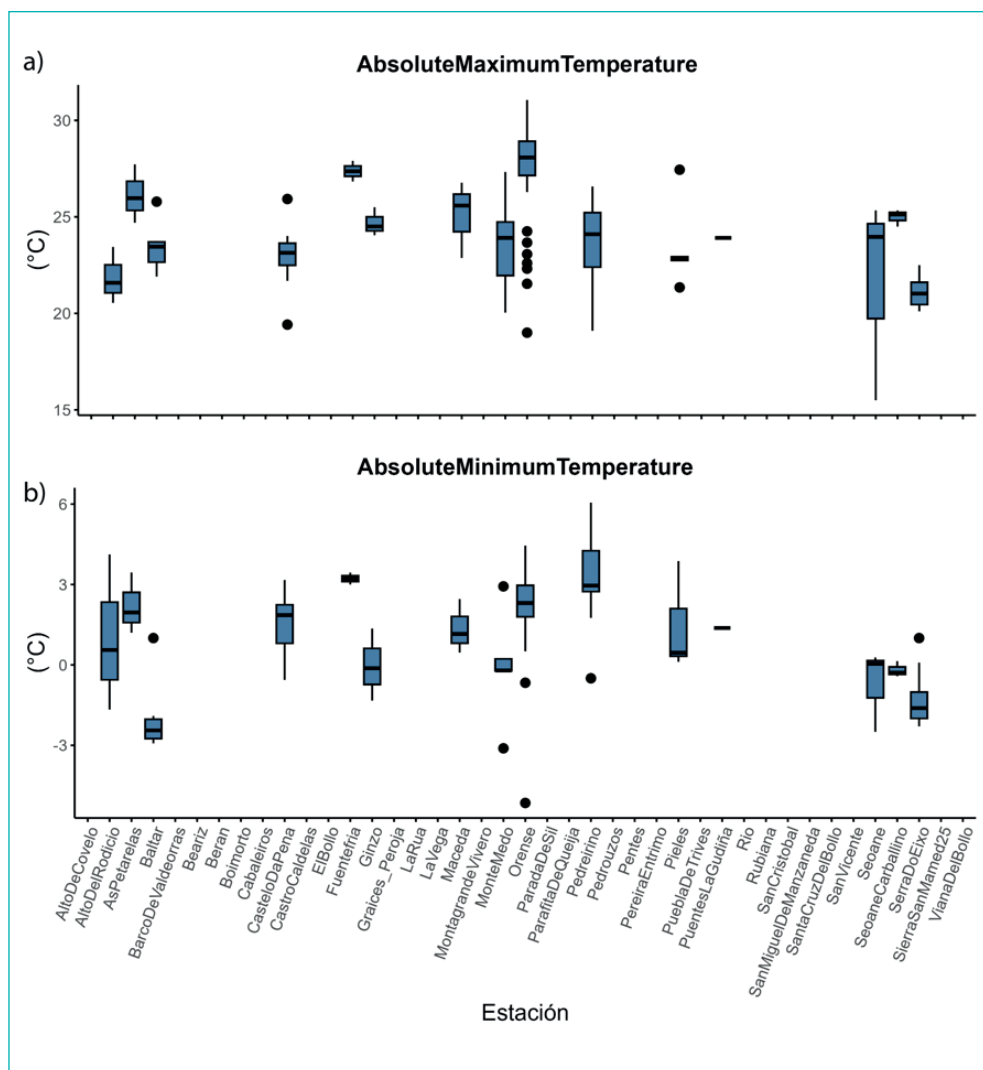


Figura 4. Diagrama de caixa da temperatura máxima (a) e mínima (b) absoluta mensual nas estacións meteorolóxicas da provincia de Ourense

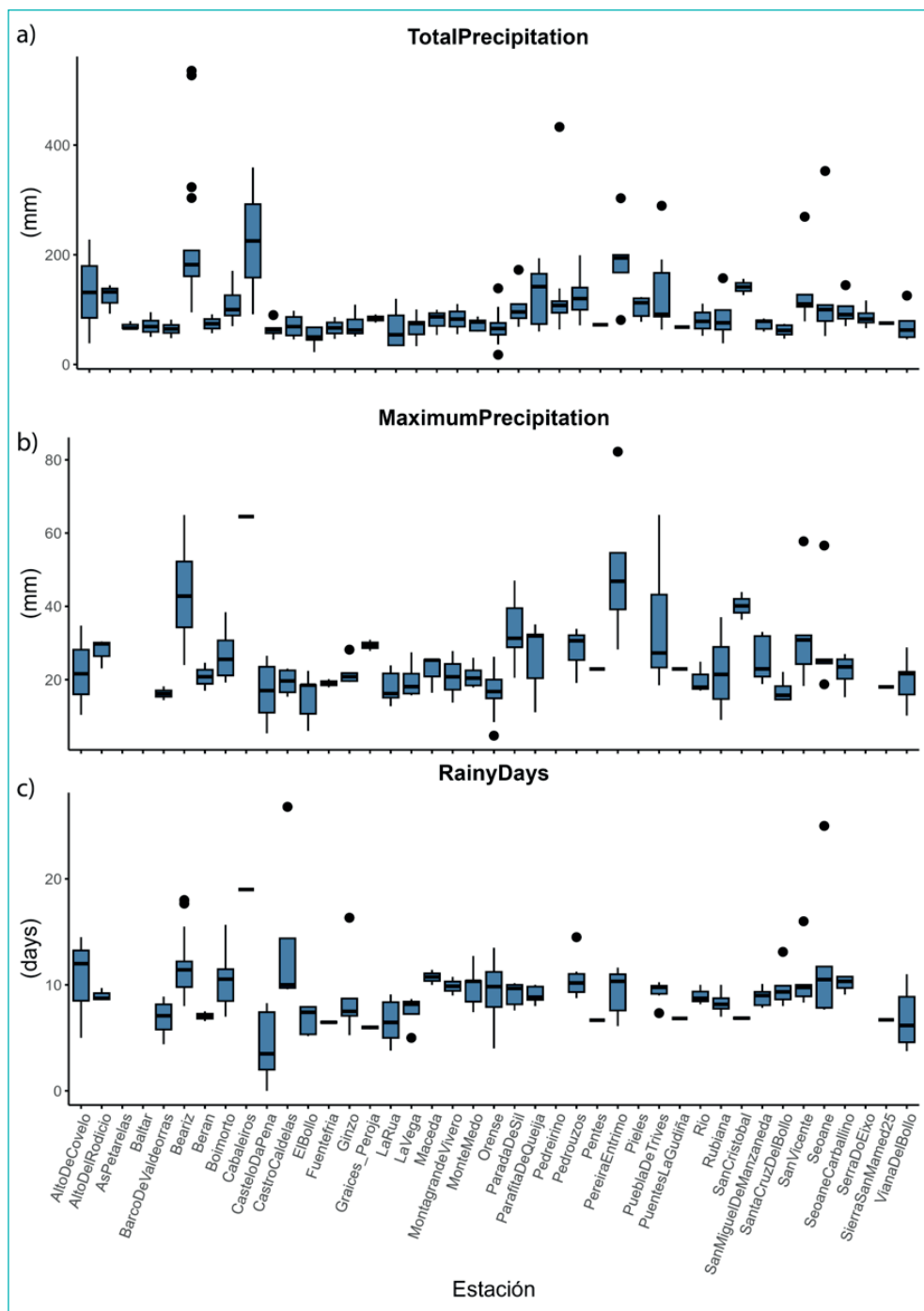


Figura 5. Diagrama de caixa da precipitación total mensual (a), precipitación máxima rexistrada nun día (b) e do número mensual de días con chuvia (c) nas estacións meteorolóxicas da provincia de Ourense

No caso da precipitación, os diagramas de caixas de precipitación total anual (figura 5a) amosan unha variabilidade espacial marcada, asociada tanto á altitude coma á exposición orográfica. As estacións de montaña e as situadas en áreas occidentais presentan acumulados máis elevados, mentres que os fondos de val interiores rexistran valores máis moderados (figura 5b). Pola contra, o número de días con chuvia (figura 5c) presenta unha dispersión máis contida, o que indica que as diferenzas na precipitación total responden en maior medida á intensidade dos episodios ca á súa frecuencia.

5. Referencias

[1] Nicholls, N. (1995). Long-term climate monitoring and extreme events. *Climatic Change*, 31(2), 231-245.

[2] Luterbacher, J., Allan, R., Wilkinson, C., Hawkins, E., Teleti, P., Lorrey, A., Brönnimann, S., Hechler, P., Velikou, K., & Xoplaki, E. (2024). The Importance and Scientific Value of Long Weather and Climate Records; Examples of Historical Marine Data Efforts across the Globe. *Climate*, 12(3), 39. <https://doi.org/10.3390/cli12030039>

[3] Grotjahn, R., Black, R., Leung, R., Wehner, M. F., Barlow, M., Bosilovich, M., ... & Prabhat. (2016). North American extreme temperature events and related large scale meteorological patterns: a review of statistical methods, dynamics, modeling, and trends. *Climate Dynamics*, 46(3), 1151-1184.

[4] Sigro, J., Cisneros, M., Perez-Luque, A. J., Perez-Martinez, C., & Vegas-Vilarrubia, T. (2024). Trends in temperature and precipitation at high and low elevations in the main mountain ranges of the Iberian Peninsula (1894–2020): The Sierra Nevada and the Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 44(9), 2897-2920.

[5] Couce-Casanova, A., de Dios Rodríguez-García, J., Lamas, M. I., & Orosa, J. A. (2022). A new way to obtain climate files in areas with the presence of microclimates by applying the Sandia method: a Galician case study. *Climate*, 10(10), 140.

[6] Kelly, J. A., Farrell, S. L., Hendrickson, L. G., Luby, J., & Mastel, K. L. (2022). A critical literature review of historic scientific analog data: uses, successes, and challenges. *Data Science Journal*, 21, 14-14.

[7] Brunet, M., & Jones, P. (2011). Data rescue initiatives: bringing historical climate data into the 21st century. *Climate Research*, 47, 29-40.

[8] Ashcroft, L., Coll, J. R., Gilabert, A., Domonkos, P., Brunet, M., Aguilar, E., ... & Jones, P. (2018). A rescued dataset of sub-daily meteorological observations for Europe and the southern Mediterranean region, 1877–2012. *Earth System Science Data*, 10(3), 1613-1635.

[9] Xunta de Galicia, Consellería de Agricultura, Gandería e Montes. (1995). *Resumo de datos climatolóxicos da rede das estacións do Centro de Investigacións Forestais de Lourizán. Período 1955–1994 (Investigación e desenvolvemento, nº 6)*. Servizo de Estudos e Publicacións.

Cara a un modelo ecolóxico– preditivo da calidade do pole apícola: integración de diversidade floral, nutrición e aprendizaxe automática

M. S. Rodríguez Flores¹

M. Míguez Bernárdez¹

E. M. Lorenzo Iglesias²

M. L. Borrajo Diz

S. Harbane

O. Escuredo

M. C. Seijo e

A. Seara Vieira²

¹*Grupo de Investigación en Sistemas Agroambientais (GISA), Facultade de Ciencias,
Universidade de Vigo, campus de Ourense, España*

²*Sistemas Informáticos de Nova Xeración (SING), Escola Superior de Enxeñaría
Informática, Universidade de Vigo, campus de Ourense, España*

mariasharodriguez@uvigo.gal

mmiguez@uvigo.gal

eva@uvigo.gal

lborrajo@uvigo.gal

sonia.harbane@uvigo.gal

oescuredo@uvigo.gal

mcoello@uvigo.gal

adrseara@uvigo.gal

Resumo

Este estudo avalía a relación entre a orixe botánica do pole apícola e a súa calidade nutricional combinando análise palinolóxica, caracterización química e técnicas de aprendizaxe automática. Analizáronse 97 mostras de pole apícola procedentes do noroeste da península ibérica, identificando a súa composición botánica, estrutura de dominancia e diversidade. Ademais, desenvolveuse un índice nutricional composto baseado en aminoácidos e ácidos graxos, así como unha clasificación funcional de estratexias tróficas que integrou dominancia, diversidade e calidade nutricional. Os resultados mostran unha elevada variabilidade na composición do pole, fortemente condicionada polo taxon dominante e pola súa combinación con outros recursos florais. As mostras biflorais presentaron, en xeral, mellor calidade nutricional, mentres que as monoflorais dependeron fortemente do taxon dominante. Destacou o papel do tipo polínico *Genista* como recurso funcional clave, asociado a perfís nutricionais máis equilibrados.

Paralelamente, aplicáronse modelos de aprendizaxe automática, que confirmaron que a calidade nutricional do pole estivo asociada principalmente á súa composición en aminoácidos e ácidos graxos, mentres que a estratexia trófica depende sobre todo da composición botánica, a dominancia e a diversidade floral, evidenciando a elevada complexidade ecolóxica do sistema.

Este estudo demostrou que o pole apícola debe interpretarse como un sistema dinámico no que a calidade nutricional resulta da interacción entre biodiversidade, dispoñibilidade de recursos e comportamento de forraxeamento das abellas, proporcionando unha base para o desenvolvemento de ferramentas aplicadas á xestión apícola e á conservación da biodiversidade.

Palabras clave: pole apícola, calidade nutricional, diversidade polínica, aprendizaxe automática, apicultura sustentable

1. Introducción

A apicultura en Galicia e, de forma concreta, na provincia de Ourense, experimentou un notable desenvolvemento nas últimas décadas, consolidándose como un sector de relevancia estratéxica tanto desde o punto de vista económico coma ecolóxico. Este desenvolvemento manifesta a forte dependencia das colonias de abellas respecto á dispoñibilidade e á calidade dos recursos florais. Neste contexto, o pole apícola constitúe un elemento clave para a saúde das abellas e para a estabilidade dos sistemas apícolas [1].

O pole apícola é unha das principais fontes de nutrientes das abellas, caracterizado por un elevado contido en proteínas, aminoácidos esenciais, lípidos, vitaminas e compostos bioactivos, entre os que destacan os polifenois e flavonoides [2, 3]. Ademais, este produto natural considérase un alimento funcional e un ingrediente nutracéutico de alto valor debido ás súas propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas e potencialmente anticancerxenas [4, 5].

A composición do pole varía de maneira significativa en función da súa orixe botánica e xeográfica [2, 6]. A análise melisopalinolóxica constitúe o método de referencia para determinar a orixe botánica, permitindo clasificar as mostras en monoflorais, biflorais ou poliflorais en función da dominancia dos taxons presentes [2]. Non obstante, mesmo en mostras monoflorais, a presenza de especies secundarias pode influír significativamente na composición química e nas propiedades funcionais do pole, contribuíndo á súa complexidade bioactiva [7, 8].

Desde unha perspectiva ecolóxica, cada mostra de pole representa un microecosistema funcional que integra a diversidade floral, a dispoñibilidade estacional de recursos e as estratexias adaptativas de forraxeamento das abellas. As abellas non recollen pole de maneira aleatoria, senón que optimizan a súa dieta combinando diferentes fontes florais para acadar un equilibrio nutricional. Este comportamento está en consonancia co concepto de resiliencia ecolóxica dos polinizadores, onde a diversidade funcional e a redundancia de recursos contribúen á estabilidade do sistema fronte a perturbacións ambientais [9, 10].

Neste contexto, os índices de biodiversidade constitúen ferramentas fundamentais para describir de forma cuantitativa a composición botánica do pole, integrando riqueza, equidade e dominancia. A súa utilización permite unha interpretación máis realista da variabilidade funcional do pole cos enfoques baseados unicamente en porcentaxes de dominancia, facilitando a integración da información ecolóxica coa composición química e funcional [2].

A relevancia funcional do pole está estreitamente ligada ao seu contido en compostos fenólicos e flavonoides, os cales son responsables en gran medida da súa capacidade antioxidante. Estes compostos actúan a través de múltiples mecanismos, como a neutralización de radicais libres, a quelación de metais ou a modulación de vías de sinalización celular [11]. Diversos estudos demostraron unha relación significativa entre o contido fenólico total, os flavonoides e a actividade antioxidante en pole apícola [6, 12].

A capacidade antioxidante adoita ser avaliada mediante ensaios in vitro como DPPH, ABTS e FRAP, que permiten caracterizar diferentes mecanismos de acción antioxidante [13-15]. Non obstante, a interpretación destes resultados de forma illada pode resultar limitada, polo que a integración de múltiples parámetros mediante índices compostos representa unha estratexia prometedora para avaliar a calidade funcional do pole de maneira máis completa e robusta [16].

Nos últimos anos, a incorporación de técnicas avanzadas de intelixencia artificial permitiu analizar sistemas ecolóxicos complexos desde unha perspectiva integradora. En particular, algoritmos de aprendizaxe automática como redes neuronais artificiais, máquinas de soporte vectorial, árbores de decisión e modelos de tipo Random Forest demostraron un alto potencial para modelizar relacións non lineais e multifactoriais. Estas ferramentas permiten analizar grandes volumes de datos heteroxéneos, identificar padróns ocultos e determinar a relevancia relativa das variables implicadas, facilitando o desenvolvemento de modelos predictivos da calidade do pole en función da súa composición botánica.

O enfoque adoptado neste traballo sustentouse nunha base multidisciplinar que integra bioloxía vexetal, nutrición e bromatoloxía, e informática aplicada. Desde a perspectiva botánica, analizouse a relación entre biodiversidade floral e composición do pole; desde o ámbito nutricional, tratouse a súa caracterización fisicoquímica e funcional; e desde a intelixencia artificial, desenvolvéronse modelos capaces de interpretar sistemas complexos.

Polo tanto, o presente estudo tivo como obxectivo xeral avaliar e predicir a calidade nutricional do pole apícola en función da súa orixe botánica, tratando esta problemática desde unha perspectiva integradora que combinou ecoloxía, análise química e técnicas de aprendizaxe automática. Este enfoque permitiu avanzar cara á construción de ferramentas capaces de interpretar e anticipar a calidade do pole, contribuíndo tanto á optimización da nutrición das abellas coma á mellora da calidade dos produtos apícolas destinados ao consumo humano. Polo tanto, este estudo contribuíu a sentar as bases para a promoción dun pole de maior calidade, con beneficios tanto para a saúde humana coma para o benestar das abellas. Ao mesmo tempo, reforzou a importancia da biodiversidade floral e da súa conservación como elementos fundamentais para a sustentabilidade dos agroecosistemas. O carácter multidisciplinar do enfoque adoptado, que integrou apicultura, ecoloxía, nutrición e intelixencia artificial, permitiu avanzar cara a unha visión máis completa e aplicada da calidade do pole apícola, en consonancia cos actuais retos ambientais e produtivos.

2. Material e métodos

O presente estudo baseouse na análise integrada dun conxunto amplo de mostras de pole apícola, combinando aproximacións palinolóxicas, fisicoquímicas, funcionais e estatísticas, así como técnicas de modelización mediante aprendizaxe automática, co obxectivo de caracterizar e predicir a súa calidade nutricional e funcional en relación coa súa orixe botánica.

2.1 Mostras e área de estudo

O presente estudo desenvolveuse sobre un conxunto total de 97 mostras de pole apícola procedentes de diferentes apiarios situados no noroeste da península ibérica. Este conxunto de datos permitiu cubrir unha ampla variabilidade ecolóxica e floral característica dos sistemas apícolas atlánticos e de transición, especialmente da provincia de Ourense, considerada unha área de transición bioclimática entre os ambientes atlánticos e mediterráneos. Esta situación favorece unha elevada heteroxeneidade da vexetación e da dispoñibilidade de recursos florais, convertendo a rexión nun escenario especialmente adecuado para o estudo da relación entre composición botánica e calidade nutricional do pole apícola.

2.2 Análise palinolóxica e caracterización botánica

A caracterización botánica das mostras de pole apícola realizouse mediante unha aproximación combinada colorimétrica e palinolóxica, baseada na separación por cor e na identificación microscópica dos grans de pole [17]. Cada mostra foi previamente homoxeneizada, e tomouse unha alícuota representativa de 2 g como unidade analítica. O material homoxeneizado foi separado manualmente en subunidades diferenciadas segundo a cor, baixo luz branca e fondo escuro, dado que as diferenzas cromáticas están asociadas a distintas orixes botánicas. Cada fracción foi pesada individualmente, e a súa contribución relativa foi expresada como porcentaxe respecto da masa total da mostra. Para a identificación palinolóxica, submostras de cada fracción foron moídas e suspendidas en auga destilada ata un volume final de 10 mL (ou 5 mL cando o número de pélets era reducido), seguidas de homoxeneización mediante axitación en vórtex. Posteriormente, tomouse unha alícuota de 100 μ L da suspensión, que foi depositada sobre unha lámina microscópica, seca a 45 °C e tinguida con xelatina glicerizada con fucsina.

A identificación dos grans de pole realizouse mediante microscopia óptica (Nikon Optiphot II) a aumentos de 400× e, cando foi necesario, de 1000×. Os tipos polínicos foron identificados ao nivel taxonómico máis preciso posible (especie, xénero, familia ou tipo polínico). A composición botánica final de cada mostra obtívose integrando a proporción relativa en peso de cada fracción cromática coa súa correspondente identificación polínica, expresándose os resultados como porcentaxes relativas do total da mostra (%).

2.3 Índices de diversidade e dominancia

A composición botánica das mostras de pole apícola avalíouse mediante o cálculo de índices de diversidade e dominancia a partir das abundancias relativas dos taxons identificados na análise palinolóxica. En particular, calculouse o índice de diversidade de Shannon (H'), empregado para estimar a heteroxeneidade taxonómica de cada mostra. Ademais, analizouse a dominancia mediante curvas de K-dominancia, baseadas nas abundancias acumuladas dos taxons ordenados por frecuencia decrecente. A partir destas curvas obtivéronse os valores de dominancia acumulada dos principais taxons (K_1 , K_2 , K_3), correspondentes ao primeiro, segundo e terceiro taxon máis abundantes, respectivamente. Os índices foron calculados empregando o software BioDiversity Pro (versión 2.0, Natural History Museum, Londres, Reino Unido), amplamente utilizado en estudos de diversidade ecolóxica [18].

En base a estes parámetros, as mostras clasificáronse segundo a súa estrutura floral mediante un enfoque combinado de dominancia e diversidade. Consideráronse mostras monoflorais aquelas nas que o taxon principal representou ≥ 70 % do contido total ($K_1 \geq 70$). As mostras biflorais definíronse cando dous taxons predominantes superaron conxuntamente o 70 % ($K_2 \geq 70$), sempre que o segundo taxon presentase unha contribución relevante ($K_2 - K_1 \geq 10$ %). De forma análoga, as mostras oligoflorais identificáronse cando tres taxons alcanzaron unha dominancia acumulada ≥ 70 % ($K_3 \geq 70$), cunha contribución significativa do terceiro taxon ($K_3 - K_2 \geq 10$ %). As mostras restantes foron consideradas poliflorais. Este enfoque proporcionou unha proposta de caracterización máis robusta e reproducíble da composición botánica das mostras, integrando tanto a dominancia dos taxons principais coma a diversidade global do pole. A diferenza das clasificacións tradicionais baseadas unicamente en limiares arbitrarios de porcentaxe para definir mostras monoflorais (80 % ou 90 %), este sistema incorpora índices ecolóxicos de diversidade e dominancia, reducindo as discrepancias existentes entre autores. Ademais, esta aproximación xa foi aplicada previamente polo noso grupo de investigación en estudos anteriores, demostrando a súa utilidade para describir de forma máis fiel a estrutura botánica e funcional do pole apícola [19].

2.4 Determinación de variables fisicoquímicas

As propiedades fisicoquímicas do pole apícola foron avaliadas mediante a determinación da humidade e do contido proteico, xunto coa caracterización do perfil nutricional. A humidade determinouse por método gravimétrico, mediante o secado de aproximadamente 2 g de mostra a 100 °C ata acadar peso constante, expresándose os resultados como porcentaxe de auga. Este parámetro constitúe un indicador clave da estabilidade e de conservación do pole.

Para determinar o contido proteico, preparáronse extractos de pole seguindo unha metodoloxía adaptada do método de Bradford [20]. Empregáronse aproximadamente 0,5 g de cada mostra, que foron homoxeneizados en NaOH 0,1 M co fin de favorecer a solubilización das proteínas. As mesturas mantivéronse en axitación suave a temperatura ambiente e posteriormente foron centrifugadas a 4500 rpm durante 10 minutos. Os sobrenadantes obtidos empregáronse para a cuantificación espectrofotométrica do contido proteico mediante o reactivo Coomassie Brilliant Blue G-250, utilizando albumina sérica bovina (BSA) como padrón de referencia. A absorbancia foi medida a 595 nm, e os resultados expresáronse como gramos equivalentes de proteína por 100 g de pole seco.

2.5 Índice nutricional composto

Co obxectivo de avaliar de maneira integrada a calidade nutricional do pole apícola, desenvolveuse un índice nutricional composto baseado na combinación de parámetros representativos da calidade proteica e lipídica.

O perfil de aminoácidos foi determinado mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), tras procesos de extracción, hidrólise ácida e derivatización previa para a súa detección [21, 22]. Analizáronse os seguintes aminoácidos: alanina (Ala), arxinina (Arg), asparaxina (Asn), ácido aspártico (Asp), citrulina (Cit), ácido glutámico (Glu), histidina (His), hidroxiprolina (Hyp), leucina/isoleucina (Leu + Iso), lisina (Lys), metionina (Met), fenilalanina (Phe), prolina (Pro), serina (Ser), treonina (Thr), triptófano (Trp), tirosina (Tyr) e valina (Val). Entre eles incluíronse aminoácidos esenciais de especial relevancia nutricional, como leucina/isoleucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptófano e valina. A partir destes datos calculouse adicionalmente un índice global de calidade de aminoácidos (AA), así como a súa versión normalizada mediante transformación mín-máx.

Paralelamente, o perfil de ácidos graxos foi determinado tras a extracción da fracción lipídica e posterior metilación dos lípidos. A análise realizouse mediante cromatografía de gases, permitindo a identificación e a cuantificación dos seguintes ácidos graxos:

ácido láurico ($C_{12:0}$), ácido mirístico ($C_{14:0}$), ácido pentadecanoico ($C_{15:0}$), ácido palmítico ($C_{16:0}$), ácido palmitoleico ($C_{16:1}$), ácido esteárico ($C_{18:0}$), ácido oleico ($C_{18:1}$), ácido linoleico ($C_{18:2}$ n-6), ácido γ -linolénico ($C_{18:3}$ n-6), ácido α -linolénico ($C_{18:3}$ n-3), ácido araquídico ($C_{20:0}$), ácido eicosatrienoico ($C_{20:3}$ n-3), ácido eicosapentaenoico (EPA, $C_{20:5}$ n-3), ácido behénico ($C_{22:0}$), ácido erúxico ($C_{22:1}$ n-9) e ácido nervónico ($C_{24:1}$). A identificación dos compostos baseouse na comparación dos tempos de retención con estándares comerciais de ésteres metílicos de ácidos graxos (EMAGs), seguindo metodoloxías descritas [23-25]. A partir destes datos calculáronse os contidos totais de ácidos graxos omega-3 ($\omega 3 = C_{18:3}$ n-3 + $C_{20:3}$ n-3 + $C_{20:5}$ n-3) e omega-6 ($\omega 6 = C_{18:2}$ n-6 + $C_{18:3}$ n-6), así como o cociente $\omega 6/\omega 3$ (ratio_omega), amplamente empregado como indicador da calidade lipídica do pole apícola. Ademais, obtivéronse as versións normalizadas das variables omega-3, omega-6 e razón $\omega 6/\omega 3$ mediante transformación mín-máx, co fin de facilitar a súa integración no índice nutricional composto. A partir destes parámetros definiuse un índice nutricional composto segundo a seguinte expresión:

$$\text{Índice nutricional} = 0,5 \times AA_{\text{norm}} + 0,3 \times \omega 3_{\text{norm}} + 0,2 \times (1 - \text{ratio}_{\omega}_{\text{norm}})$$

onde AA_{norm} representa o contido total en aminoácidos previamente normalizado, e a razón ω_{norm} corresponde ao cociente $\omega 6/\omega 3$ tamén normalizado. Os pesos asignados aos distintos compoñentes do índice (0,5 para aminoácidos, 0,3 para $\omega 3$ e 0,2 para o cociente $\omega 6/\omega 3$) foron definidos en función da súa relevancia nutricional relativa.

A fracción proteica considérase o principal determinante da calidade do pole, mentres que os ácidos graxos omega-3 representan un compoñente funcional positivo. Pola súa banda, o cociente $\omega 6/\omega 3$ foi incluído como factor corrector, cun menor peso relativo, ao actuar como indicador do equilibrio lipídico máis ca como contribuínte directo ao valor nutricional. Esta integración segue os principios de construción de indicadores compostos en ciencia dos alimentos, permitindo obter unha medida sintética, interpretable e comparable da calidade nutricional do pole apícola [19, 26].

2.6 Definición da estratexia trófica do pole

A estratexia trófica do pole foi definida como unha variable categórica obtida mediante a integración de tres dimensións ecolóxicas: o tipo funcional do taxon dominante (F1-F4), o grao de dominancia polínica, estimado a través do índice de K-dominancia, e a clasificación do valor nutricional do pole (baixo, medio, alto), derivada do índice nutricional composto.

A combinación destes tres compoñentes permitiu establecer un sistema de clasificación funcional que deu lugar a diferentes categorías de estratexia trófica (C1-C6), cada unha delas representando distintos escenarios ecolóxicos de utilización dos recursos florais por

parte das abellas. A asignación das categorías realizouse mediante regras condicionais baseadas na combinación de variables (tipo funcional, dominancia e valor nutricional), permitindo unha clasificación reproducible e interpretable ecoloxicamente (táboa 1). Esta integración permitiu interpretar o pole apícola non só en termos da súa composición botánica, senón tamén da súa funcionalidade nutricional e do contexto ecolóxico no que é recollido.

Código	Estratexia trófica	Clasificación botánica	Código	Valor nutricional	Dominancia	Interpretación ecolóxica
C1	Compensación nutricional óptima	Mono/Bifloral	F1-F2	Alto	Variable	Uso eficiente de recursos de alta calidade; optimización nutricional con poucos taxons
C1b	Compensación nutricional subóptima	Mono/Bifloral	F1-F2	Medio	Variable	Recurso funcional presente pero con limitacións
C2	Recurso abundante funcional	Mono/Bifloral	F2 ($\pm$ F1)	Medio-alto	Alta (>50-70 %)	Estratexia baseada na abundancia (floración masiva); alta dispoñibilidade pero posible desequilibrio nutricional
C3	Forraxeamento equilibrado	Oligo/Polifloral	F3	Alto	Baixa-media	Dieta diversa e equilibrada; alta estabilidade nutricional
C3b	Forraxeamento funcional	Oligo/Polifloral	F3	Medio	Baixa-media	Diversidade moderada con presenza de taxons funcionais, pero sen optimización completa
C4	Estrés trófico ou mixto	Calquera	F4 ($\pm$ outros)	Baixo	Variable	Baixa calidade global ou combinación subóptima de recursos; uso oportunista
C4b	Dilución nutricional	Polifloral	F3-F4	Baixo-medio	Baixa	Alta diversidade pero sen valor nutricional suficiente
C5	Dominancia non funcional	Mono/Bifloral	F2	Baixo-medio	Alta (>70 %)	Dominancia dun taxon pobre nutricionalmente
C6	Especialización desequilibrada	Monofloral	F1	Medio	Moi alta (>80-90 %)	Forte dependencia dun único recurso funcional pero incompleto nutricionalmente

Táboa 1. Sistema de clasificación das estratexias tróficas do pole apícola (C1-C6)

2.7 Análise estatística e modelización mediante aprendizaxe automática

Co obxectivo de explorar a estruturación funcional das mostras de pole apícola, realizouse unha análise bivariante representando o valor nutricional fronte á dominancia polínica (K-dominancia). Esta aproximación permitiu integrar a calidade nutricional co grao de dominancia botánica, facilitando a identificación de padróns ecolóxicos. Na análise consideráronse a estratexia trófica, o tipo de estrutura polínica e o taxon dominante, empregando gráficos de dispersión con codificación visual para diferenciar estes factores e detectar agrupamentos. Ademais, utilizáronse elipses de confianza (95 %) para identificar a concentración principal das mostras e distinguir valores extremos.

A modelización predictiva realizouse mediante algoritmos de aprendizaxe automática, empregando variables botánicas e índices ecolóxicos como predictores. Utilizouse principalmente o algoritmo Random Forest pola súa capacidade para modelizar relacións complexas e pola súa interpretabilidade.

Aplicáronse técnicas de validación e control de ruído para garantir a robustez dos modelos, así como métodos de interpretación como SHAP para analizar a contribución das variables. Este enfoque permitiu avaliar a capacidade da composición botánica para predicir a calidade nutricional e a estratexia trófica do pole.

3. Resultados

3.1 Orixe botánica das mostras

3.1.1 Principais tipos polínicos e distribución xeográfica das mostras de pole apícola

A análise palinolóxica permitiu identificar a súa composición botánica, así como identificar o taxon dominante, o grao de dominancia e os índices de diversidade floral. Este feito resultou fundamental para comprender o pole apícola, non só como un produto apícola, senón como un reflexo directo da paisaxe floral e do comportamento de forraxeamento das abellas.

A clasificación dos 87 tipos polínicos identificados revelou unha ampla diversidade taxonómica, distribuída en 55 familias botánicas (táboa 2). Entre elas, destacaron especialmente Fabaceae, Ericaceae, Asteraceae, Rosaceae e Fagaceae, que agrupan a maior parte dos taxons dominantes e de maior relevancia no pole apícola.

A familia Fabaceae (Leguminosae) presentou unha elevada diversidade e relevancia tanto en termos de frecuencia coma de abundancia media, incluíndo taxons como tipo *Genista*, tipo *Trifolium* e tipo *Lotus*. En particular, o tipo *Genista* destacou pola súa

elevada abundancia media (15,7 %) e valores máximos moi elevados (ata 91,4 %), o que indica a súa capacidade para dominar determinadas mostras.

Por outra banda, as familias Ericaceae (incluídas *Erica*, *Calluna vulgaris* e *Daboecia cantabrica*) e Fagaceae (*Castanea*, *Quercus*) estiveron asociadas a valores elevados tanto de frecuencia coma de abundancia. Así, *Castanea* presentou máximos próximos ao 95 %, que evidencian a súa forte capacidade de dominancia en determinadas mostras. Do mesmo xeito, *Erica* e o conxunto da familia Ericaceae mostraron unha ampla presenza (32,0 %) combinada con valores medios e máximos elevados, característicos de ecosistemas de matogueira atlántica.

A familia Rosaceae (*Rubus*, *Crataegus*, *Prunus*) destacou especialmente pola súa elevada contribución en termos de abundancia. En particular, *Rubus* acadou valores máximos moi elevados (ata 94,4 %), o que indica unha ampla distribución no territorio.

Entre os taxons arbóreos, ademais de *Castanea*, salientaron *Eucalyptus* e *Quercus*, que presentaron valores medios relevantes (7,1 % e 6,9 %, respectivamente) e máximos elevados (> 60 %), reflectindo a súa importancia no espectro polínico. Pola súa banda, a familia Cistaceae mostrou unha elevada variabilidade, con valores medios moderados pero máximos moi elevados, asociados a condicións ambientais máis secas e continentais. Xunto a estes, identificáronse numerosos taxons herbáceos, como tipo *Trifolium*, *Plantago*, *Echium* (media 3,24 %; máx. 52,4 %) e diversas Asteraceae, que contribuíron significativamente á diversidade estrutural das mostras.

Ademais, observáronse padróns diferenciados segundo a súa orixe xeográfica e atopáronse diferenzas entre as mostras da rexión atlántica e as áreas interiores da meseta. No conxunto de Galicia, o pole amosou unha forte influencia de especies arbóreas e arbustivas. En particular, *Castanea* adquiriu un papel central en zonas interiores e de montaña, onde alcanzou valores medios e máximos moi elevados, configurando mostras claramente monoflorais. Este padrón é especialmente representativo das áreas máis continentais do noroeste, onde os soutos de castiñeiro constitúen unha fonte dominante de pole. Xunto a *Castanea*, o xénero *Rubus* presentou unha elevada contribución global, e é un dos compoñentes máis abundantes do conxunto de datos. A súa combinación de alta media e máximos elevados, xunto coa súa ampla presenza, explica o seu papel dominante, especialmente en áreas de transición entre bosque e matogueira.

Nas zonas máis húmidas e atlánticas, particularmente nas áreas costeiras, observouse unha maior relevancia de leguminosas, especialmente do tipo *Genista*, que presenta valores medios e máximos moi elevados. Neste contexto, tamén destacan os taxons da familia Ericaceae, que combinaron unha alta frecuencia con valores de abundancia variables, contribuíndo á diversidade e heteroxeneidade das mostras.

Familia	Tipo polínico	(%)	Familia	Tipo polínico	(%)
Acanthaceae	<i>Acanthus</i>	1,0	Hypericaceae	<i>Hypericum</i>	3,1
Actinidiaceae	<i>Actinidia deliciosa</i>	4,1	Iridaceae	<i>Gladiolus</i>	4,1
Amaranthaceae	<i>Chenopodium</i>	2,1		<i>Iris</i>	3,1
Amoryllidaceae	<i>Amoryllidaceae</i>	21,6	Juglandaceae	<i>Juglans</i>	3,1
	<i>Allium</i>	1,0	Lamiaceae	<i>Lavandula</i>	2,1
Apiaceae	<i>T. Conium maculatum</i>	12,4		<i>T. Lamium</i>	1,0
	<i>T. Foeniculum vulgare</i>	10,3	Lauraceae	<i>Persea americana</i>	1,0
	<i>T. Daucus carota</i>	4,1	Linaceae	<i>Linum</i>	2,1
	<i>T. Ferula</i>	3,1	Lythraceae	<i>Lythrum</i>	10,3
Aquifoliaceae	<i>Ilex aquifolium</i>	5,2	Malvaceae	<i>T. Hibiscus</i>	2,1
Araliaceae	<i>Hedera helix</i>	3,1	Myrtaceae	<i>Eucalyptus</i>	49,5
Arecaceae	<i>Phoenix</i>	6,2	Oleaceae	<i>Olea europaea</i>	10,3
Asteraceae	<i>T. Taraxacum officinale</i>	24,7		<i>Ligustrum</i>	8,2
	<i>Centaurea</i>	5,2		<i>T. Fraxinus</i>	1,0
	<i>T. Anthemis</i>	6,2	Onagraceae	<i>T. Oenothera</i>	3,1
	<i>T. Carduus</i>	6,2	Oxalidaceae	<i>Oxalis</i>	2,1
	<i>Helianthus</i>	1,0	Papaveraceae	<i>Papaver</i>	22,7
	<i>Aster</i>	2,1	Passifloraceae	<i>Passiflora</i>	1,0
	<i>T. Onopordum</i>	2,1	Plantaginaceae	<i>Plantago</i>	28,9
Boraginaceae	<i>Echium</i>	55,7		<i>Anarrhinum</i>	2,1
Brassicaceae	<i>T. Brassica</i>	13,4	Platanaceae	<i>Platanus</i>	3,1
	<i>T. Raphanus</i>	7,2	Plumbaginaceae	<i>Armeria</i>	1,0
	<i>Brassicaceae</i>	2,1	Poaceae	<i>Poaceae</i>	24,7
Campanulaceae	<i>T. Campanula</i>	25,8		<i>Zea mays</i>	4,1
Caprifoliaceae	<i>Lonicera</i>	5,2	Polygonaceae	<i>Fallopia</i>	1,0
	<i>Sambucus</i>	2,1		<i>Rumex</i>	1,0
	<i>Abelia</i>	1,0	Ranunculaceae	<i>Ranunculus</i>	3,1
Caryophyllaceae	<i>T. Silene</i>	5,2	Resedaceae	<i>Reseda</i>	7,2
Cistaceae	<i>T. Cistus ladanifer</i>	7,2		<i>Sesamoides</i>	3,1
	<i>Cistaceae</i>	38,1	Rosaceae	<i>Rubus</i>	67
Commelinaceae	<i>Tradescantia</i>	3,1		<i>Potentilla</i>	2,1
Convolvulaceae	<i>Convolvulus</i>	1,0		<i>T. Crataegus monogyna</i>	23,7
Crassulaceae	<i>Sedum</i>	3,1		<i>T. Prunus</i>	4,1
Cucurbitaceae	<i>Bryonia</i>	3,1	Rutaceae	<i>Citrus</i>	2,1
Cyperaceae	<i>Cyperus</i>	1,0	Salicaceae	<i>Salix</i>	7,2
Ericaceae	<i>Calluna vulgaris</i>	3,1	Sapindaceae	<i>Aesculus</i>	1,0
	<i>Erica</i>	32,0	Scrophulariaceae	<i>Scrophularia</i>	5,2
	<i>Daboecia cantabrica</i>	1,0		<i>Verbascum</i>	2,1
Fagaceae	<i>Castanea</i>	47,4	Simaroubaceae	<i>Ailanthus</i>	1,0
	<i>Quercus</i>	25,8	Solanaceae	<i>Brugmansia</i>	3,1
Fabaceae	<i>T. Genista</i>	59,8		<i>Solanum</i>	1,0
	<i>T. Trifolium</i>	30,9			
	<i>T. Lotus</i>	7,2	Typhaceae	<i>Typha</i>	2,1
	<i>Acacia</i>	3,1			

Táboa 2. Clasificación dos tipos polínicos identificados segundo a familia botánica e a porcentaxe de presenza (%) nas mostras de pole apícola

Por outra banda, en zonas costeiras e de influencia antrópica, incrementase a presenza de *Eucalyptus*, que acada valores medios e máximos elevados, evidenciando o impacto da xestión forestal. De maneira similar, taxons como *Plantago* e o tipo *Taraxacum officinale* aparecen asociados a ambientes abertos e antropizados, que se caracterizan por unha elevada frecuencia pero cunha dominancia máis variable.

Nas mostras das rexións interiores da meseta, observouse unha maior representación de *Cistaceae*, con valores máximos moi elevados, reflectindo a importancia de matogueiras mediterráneas. Tamén destacan taxons como *Echium*, asociados a ambientes abertos e soleados, mentres que a presenza de *Ericaceae* é menor, marcando unha clara diferenza respecto das áreas atlánticas. Ademais, en certas zonas interiores incrementouse a presenza de *Olea europaea*, indicador de influencia mediterránea, así como doutros taxons adaptados a condicións máis secas, entre os que destacou o tipo *Cistus ladanifer*. En contraste, a presenza de especies arbóreas atlánticas como *Quercus* foi máis variable, dependendo da localización.

3.1.2 Índice de Shannon, valores de K-dominancia e estrutura de dominancia botánica das mostras de pole apícola

A análise conxunta dos índices de diversidade (Shannon H') e das curvas de K-dominancia revelou unha elevada variabilidade na estrutura botánica das mostras de pole apícola. Os valores de K-dominancia do taxon principal (K1) amosaron un amplo rango estrutural, reflectindo desde situacións de forte especialización ata perfís claramente diversos. As curvas de dominancia (figura 1) evidenciou diferentes padróns de acumulación, desde curvas abruptas, indicativas de dominancia marcada, ata perfís máis progresivos asociados a mostras diversas.

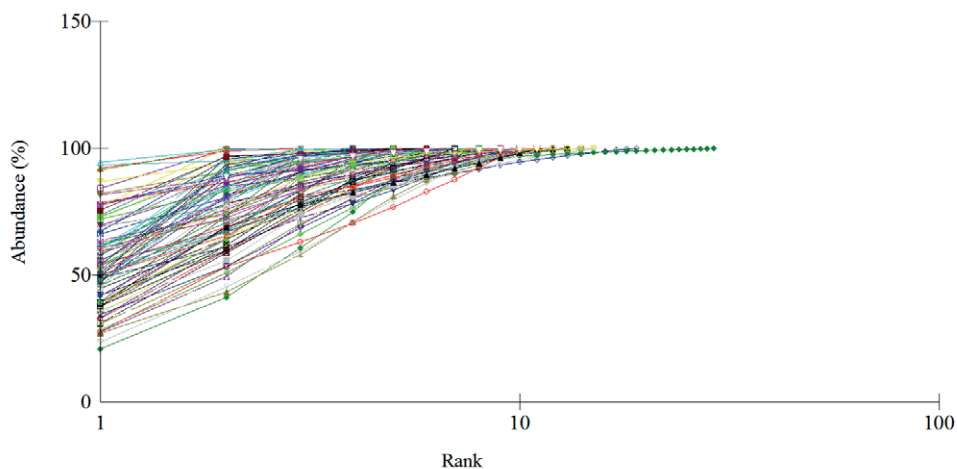


Figura 1. Curvas de K-dominancia das mostras de pole apícola segundo a súa composición polínica

Como amosa a táboa 3, as mostras monoflorais ($n = 19$) caracterizáronse por valores elevados de dominancia ($K1$ medio = 81,3 %), indicando unha forte dependencia dun único recurso floral. Dentro deste grupo, destacaron taxons como *Castanea* ($n = 9$; $K1 = 80,2$ %), *Rubus* ($n = 6$; $K1 = 82,5$ %) e *Calluna vulgaris* ($n = 1$; $K1 = 82,1$ %), así como o tipo *Genista* ($n = 3$; $K1 = 82,1$ %). Estes resultados poden reflectir episodios de floración intensa ou unha explotación altamente selectiva por parte das abellas, xerando perfís claramente dominados por un único taxon.

O grupo maioritario correspondeu ás mostras biflorais ($n = 43$), nas que dous taxons principais contribúen de forma dominante á composición polínica ($K1 = 55,4$ %; $K2 =$

Clasificación	N	K1	K2	K3
Monofloral	19	81,3		
<i>Calluna vulgaris</i>	1	82,1		
<i>Castanea</i>	9	80,2		
<i>Rubus</i>	6	82,5		
<i>T. Genista</i>	3	82,1		
Bifloral	43	55,4		
<i>Castanea + Rubus</i>	6	53,8	81,0	
<i>Castanea + Cistaceae</i>	1	50,7	92,0	
<i>Eucalyptus + T. Genista</i>	1	57,7	90,9	
<i>Quercus + Rubus</i>	2	50,6	76,4	
<i>Quercus + T. Crataegus monogyna</i>	1	47,7	84,9	
<i>Quercus + T. Foeniculum vulgare</i>	1	55,6	76,1	
<i>Rubus + Castanea</i>	7	55,1	86,7	
<i>Rubus + T. Brassica</i>	1	58,6	75,9	
<i>Rubus + T. Raphanus</i>	1	66,2	80,7	
<i>T. Cistus ladanifer + Echium</i>	2	58,6	83,7	
<i>T. Cistus ladanifer + Quercus</i>	1	55,5	77,7	
<i>T. Conium maculatum + Ilex aquifolium</i>	1	60,6	72,5	
<i>T. Taraxacum officinale + Plantago</i>	1	61,2	84,9	
<i>T. Genista + Castanea</i>	1	53,9	78,0	
<i>T. Genista + Eucalyptus</i>	10	56,3	88,8	
<i>T. Genista + Iris</i>	1	47,8	73,6	
<i>T. Genista + Quercus</i>	1	47,3	81,0	
<i>T. Genista + Rubus</i>	1	59,1	78,2	
<i>T. Genista + T. Brassica</i>	1	44,9	77,8	
<i>T. Genista + T. Daucus carota</i>	1	64,6	77,1	
<i>T. Genista + T. Raphanus</i>	1	61,2	79,7	
Oligofloral	20	40,2	62,5	79,2
Polifloral	15	39,5	58,0	69,9
Total	96			

Táboa 3. Clasificación das mostras de pole apícola segundo o valor de K-dominancia

70-90 %). Este padrón indicou unha codominancia de recursos florais. As combinacións máis frecuentes incluíron asociacións como *Rubus* + *Castanea* ($n = 7$), *Castanea* + *Rubus* ($n = 6$) e tipo *Genista* + *Eucalyptus* ($n = 10$). Tamén se observaron combinacións con taxons herbáceos e arbustivos, como tipo *T. officinale* + *Plantago* ou tipo *C. ladanifer* + *Echium*, que evidencian a coexistencia de estratos florais distintos.

As mostras oligoflorais ($n = 20$) presentaron unha estrutura máis distribuída, na que tres taxons principais explican a maior parte da composición. Este padrón reflectiu unha maior heteroxeneidade floral e unha explotación máis equilibrada dos recursos dispoñibles.

Finalmente, as mostras poliflorais ($n = 15$) caracterizáronse por valores baixos de dominancia ($K1 = 39,5 \%$) e unha acumulación máis progresiva ($K3 = 69,9 \%$), indicando unha elevada diversidade e unha distribución máis homoxénea das abundancias entre múltiples taxons. Estas mostras representan sistemas máis complexos e diversos, que poderían estar asociados a paisaxes con alta riqueza floral.

A análise da K-dominancia, apoiada polas curvas de rango-abundancia, confirmaron que o pole apícola presenta unha composición botánica dinámica e altamente dependente da dispoñibilidade floral. A transición entre mostras monoflorais, biflorais e poliflorais reflicte tanto a fenoloxía das especies coma a plasticidade no comportamento de forraxeamento das abellas, evidenciando que a composición do pole é un indicador sensible das condicións ecolóxicas das áreas de recollida.

3.2 Contido en auga

A humidade amosou unha variabilidade moderada entre as mostras analizadas, reflectindo a influencia das condicións ambientais, o momento de recollida e os procesos de conservación. A humidade media situouse en $19,9 \%$, cun rango amplo comprendido entre o $8,1 \%$ e o $37,6 \%$. Esta variabilidade indica a existencia de mostras con diferentes graos de deshidratación, probablemente asociadas ás condicións climáticas durante a recollida e ás prácticas de secado e almacenamento. En particular, as mostras con valores máis elevados de humidade poderían estar relacionadas con colleitas recentes ou cun secado incompleto. Este parámetro sitúase dentro dos rangos considerados adecuados para o pole apícola, o que garantiu a calidade das mostras e a súa idoneidade para as análises químicas e funcionais posteriores.

3.3 Variables nutricionais e índice nutricional composto

O contido nutricional do pole apícola foi avaliado mediante a integración do perfil proteico, a composición de aminoácidos e o perfil lipídico, co obxectivo de obter unha visión global da súa calidade funcional. Para iso, ademais da análise individual de cada

compoñente, aplicouse un índice nutricional composto, que permitiu sintetizar a información nun único parámetro integrador.

O contido proteico amosou unha elevada variabilidade entre mostras, cun valor medio de 16,4 g/100 g e un rango comprendido entre 1,7 e 41,7 g/100 g, que confirma a forte dependencia da orixe botánica. Esta variabilidade reflíctese tamén no perfil de aminoácidos, determinado en 36 mostras representativas. A prolina destacou como o aminoácido maioritario (26,1 mg/g), seguida de aminoácidos como a asparaxina (10,4 mg/g), evidenciando padróns característicos do pole apícola. Os aminoácidos esenciais (leucina/isoleucina, lisina, valina e fenilalanina) presentaron valores relativamente estables, aínda que con maior concentración nas mostras biflorais, o que suxire unha mellor calidade proteica asociada á combinación de fontes florais. Pola contra, as mostras monoflorais amosaron maior variabilidade, dependendo fortemente do taxon dominante (así, obtivéronse valores máis elevados en *Castanea* ou tipo *Genista*). As mostras poliflorais presentaron perfís máis equilibrados, asociados a unha maior diversidade botánica.

O perfil de ácidos graxos revelou unha composición dominada por ácidos graxos poliinsaturados, cun contido medio de 17,0 mg/g para omega-6 e 5,1 mg/g para omega-3, resultando nun cociente medio $\omega 6/\omega 3$ de 4,4. Esta razón, amplamente utilizada como indicador de calidade lipídica, mostrou variacións relevantes segundo a orixe botánica. Así, mostras dominadas por tipo *Genista* presentaron perfís máis favorables ($\omega 6/\omega 3 = 2,1$), mentres que mostras dominadas por *Castanea* amosaron razóns máis elevadas (ata 6,6-8,2), indicativas dun menor equilibrio nutricional.

Co fin de integrar a información procedente das principais dimensións nutricionais do pole apícola, desenvolveuse un índice nutricional continuo baseado na combinación ponderada do contido en aminoácidos e da fracción lipídica. Este índice sintetiza nun único valor a calidade nutricional do pole, facilitando a comparación entre mostras e permitindo unha interpretación máis robusta da súa variabilidade funcional.

Os valores obtidos situáronse nun intervalo comprendido entre aproximadamente 0,2 e 0,7 (cun valor medio total de 0,3) o que indica unha variabilidade moderada na calidade nutricional das mostras analizadas (táboa 5).

En función da súa orixe botánica, observáronse padróns diferenciados entre as distintas estruturas florais. As mostras monoflorais presentaron, en conxunto, valores baixos (0,3), evidenciando unha forte dependencia do taxon dominante. Neste grupo, *Castanea* (0,2) e *Rubus* (0,2) amosaron os valores máis baixos, mentres que o tipo *Genista* destacou como excepción funcional, acadando valores máis elevados (0,5), asociados a un perfil nutricional máis equilibrado.

As mostras biflorais presentaron os valores medios máis altos (0,4), aínda que cunha elevada variabilidade en función da combinación de taxons. Combinacións como *Rubus* + tipo *Brassica* (0,5) amosaron valores elevados, mentres que combinacións como

Clasificación	Taxon / Combinación	VN medio	Tipo VN
Monofloral		0,3	Baixo
	<i>Castanea</i>	0,2	Baixo
	<i>Rubus</i>	0,2	Baixo
	<i>T. Genista</i>	0,5	Medio-alto
Bifloral		0,4	Medio
	<i>Castanea + Rubus</i>	0,4	Medio
	<i>Rubus + Castanea</i>	0,4	Medio
	<i>Rubus + T. Brassica</i>	0,5	Alto
	<i>T. Conium maculatum + Ilex aquifolium</i>	0,3	Baixo
	<i>T. Genista + Eucalyptus</i>	0,4	Medio
	<i>T. Genista + Iris</i>	0,3	Medio
	<i>T. Genista + T. Brassica</i>	0,3	Baixo
Oligofloral		0,3	Baixo-medio
Polifloral		0,3	Baixo-medio
Total		0,3	Medio

Táboa 5. Clasificación do valor nutricional do pole segundo a súa orixe botánica

tipo *Conium maculatum + Ilex aquifolium* (0,3) ou tipo *Genista* + tipo *Brassica* (0,3) presentaron valores máis baixos, evidenciando que non todas as asociacións biflorais implican unha mellora nutricional. Por outra banda, as mostras oligoflorais (0,3) e poliflorais (0,3) situáronse en valores intermedios, cunha menor variabilidade global. Este padrón suxeriu que unha maior diversidade floral non implica necesariamente unha maior calidade nutricional.

Esta variable evidenciou que a calidade nutricional do pole apícola non depende exclusivamente do grao de diversidade, senón da identidade funcional dos taxons dominantes e das súas combinacións. Así, a integración do índice nutricional permite avanzar desde unha análise baseada en compoñentes individuais cara a unha interpretación máis global e ecoloxicamente relevante da calidade do pole, constituíndo unha ferramenta útil tanto para a caracterización das mostras coma para a súa integración en modelos predictivos.

3.4 Clasificación da estratexia trófica do pole apícola

A integración do índice nutricional composto, da dominancia polínica (K-dominancia) e da tipoloxía funcional dos taxons dominantes permitiu definir unha clasificación ecolóxica robusta das estratexias tróficas do pole apícola. Este enfoque permitiu interpretar cada mostra non só en termos de composición botánica, senón tamén en relación co seu papel funcional na nutrición das abellas, integrando simultaneamente a cantidade, a calidade e a dispoñibilidade dos recursos florais.

As mostras agrupáronse nun conxunto ampliado de estratexias tróficas, organizadas en diferentes niveis funcionais: compensación nutricional óptima (C1) e subóptima (C1b), recurso abundante funcional (C2), forraxeamento equilibrado (C3) e funcional (C3b), así como estratexias limitantes como o estrés trófico (C4), a dilución nutricional (C4b), a dominancia non funcional (C5) e a especialización desequilibrada (C6). Esta clasificación revelou un padrón estruturado no que a estratexia trófica está determinada principalmente pola combinación entre o tipo de taxon dominante (F) e o seu grao de dominancia, máis ca polo valor nutricional absoluto. En particular, evidénciase que a mesma especie pode dar lugar a distintas estratexias en función do contexto ecolóxico, o que reforza a necesidade dun enfoque integrador baseado na interacción entre calidade, dominancia e diversidade floral.

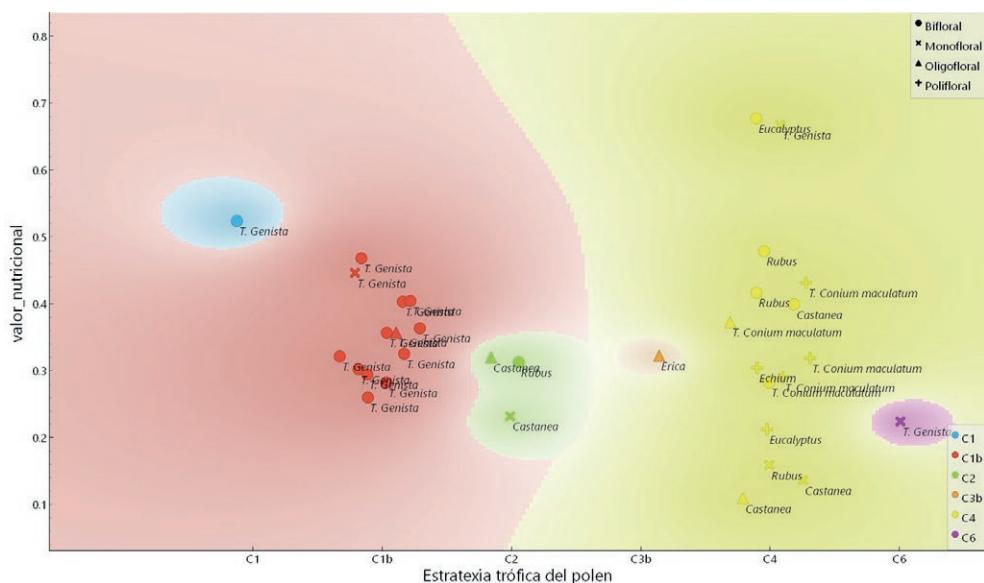


Figura 3. Gradiente funcional entre valor nutricional e estratexias tróficas do pole apícola segundo a súa estrutura floral e dominancia

A representación da relación entre o valor nutricional e a estratexia trófica evidenciou unha clara estruturación das mostras ao longo dun gradiente funcional (figura 3). As mostras asociadas ás estratexias de compensación (C1-C1b) concentráronse en valores intermedios de calidade nutricional e corresponderon maioritariamente a estruturas biflorais, destacando o papel dominante de tipo *Genista*, que aparece como un dos principais recursos funcionais do sistema. A presenza de tipo *Genista* aparece asociada de forma recorrente a perfís nutricionais máis favorables, independentemente da estrutura floral, aínda que este efecto parece especialmente evidente en combinacións biflorais.

Ademais, a súa presenza tamén se observou en determinadas mostras oligoflorais, reforzando a idea de que actúa como un taxon nutricional clave en distintos contextos estruturais, especialmente cando non acada dominancias extremas.

As estratexias de recurso abundante funcional (C2) situáronse nunha zona de transición e estiveron asociadas principalmente a mostras monoflorais ou biflorais con alta dominancia, nas que tipos polínicos como *Castanea*, *Rubus* ou combinacións co tipo *Genista* contribúen de maneira predominante. Nestes casos, a elevada dispoñibilidade do recurso tradúcese nunha forte dominancia, aínda que con valores nutricionais variables en función da súa composición.

Pola súa parte, as mostras de forraxeamento funcional (C3b) corresponderon fundamentalmente a estruturas oligoflorais e poliflorais, nas que participan taxons como *Erica* ou *Echium*, caracterizados por unha maior diversidade floral. Estas mostras ocuparon posicións intermedias no gradiente, reflectindo unha dieta máis diversificada pero non necesariamente de maior calidade nutricional.

As estratexias de estrés (C4) concentráronse en mostras tanto biflorais coma poliflorais, frecuentemente asociadas a taxons xeneralistas como *Eucalyptus* ou tipo *C. maculatum*, nos que a dispoñibilidade de recursos non se traduce nun perfil nutricional equilibrado. Pola súa banda, as estratexias de dominancia non funcional (C5) e especialización desequilibrada (C6) apareceron principalmente en mostras asociadas a *Castanea* ou casos extremos de tipo *Genista*, caracterizadas por valores elevados de dominancia pero cunha calidade nutricional limitada ou incompleta.

Polo tanto, o padrón observado confirma que a calidade nutricional do pole non depende unicamente do taxon dominante nin da súa estrutura floral, senón da interacción entre dominancia, diversidade e funcionalidade dos tipos polínicos, configurando un gradiente ecolóxico continuo de estratexias tróficas.

3.5 Modelización mediante aprendizaxe automática

A aplicación de modelos de aprendizaxe automática permitiu identificar que variables conteñen información relevante para a predición do valor nutricional (VN) e para a discriminación da estratexia trófica do pole apícola. Empregouse o algoritmo Random Forest, cunha variable aleatoria de referencia (*random probe*) co fin de distinguir o sinal informativo real de ruído estocástico.

No caso do valor nutricional, observouse que 23 de 66 preditores superaron o limiar definido polo *random probe* (0,009), o que indica a existencia dun subconxunto reducido de variables con capacidade explicativa real (figura 4). As variables máis relevantes foron principalmente aminoácidos individuais, como serina, metionina, lisina, arxinina, ácido aspártico e prolina, xunto con determinados ácidos graxos, especialmente o ácido

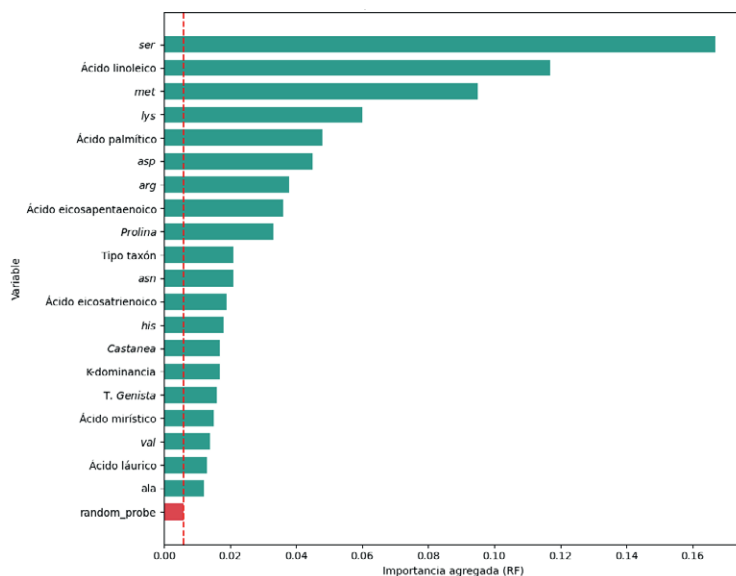


Figura 4. Importancia de variables na predición do valor nutricional (VN) mediante Random Forest, con referencia de ruído

linoleico, o ácido palmítico e o ácido eicosapentaenoico. Este padrón evidencia que o valor nutricional do pole está fortemente determinado pola súa composición bioquímica, concentrándose a maior parte do sinal en variables directamente relacionadas coa calidade proteica e lipídica.

Ademais, aínda que cunha menor contribución relativa, a presenza de determinados taxons botánicos como tipo *Genista* tamén aparece por enriba do nivel de ruído, o que reforza a súa relevancia funcional xa descrita ao longo do traballo. Este resultado suxire que *Genista* non só actúa como indicador ecolóxico, senón que tamén está asociado indirectamente a perfís nutricionais máis favorables, probablemente debido á súa composición en aminoácidos e ao equilibrio lipídico que caracteriza o seu pole. A clara separación entre as variables principais e o nivel de ruído reforza a robustez destas relacións.

Por outra banda, na clasificación da estratexia trófica identificáronse 30 de 68 preditores por enriba do limiar de ruído (*random probe* = 0,014), o que indica unha estrutura de sinal máis distribuída (figura 5). As variables máis relevantes estiveron relacionadas principalmente coa identidade botánica e coa estrutura ecolóxica das mostras, destacando o taxon dominante (taxon 1), a presenza de determinados tipos polínicos como *Genista* e *Castanea*, así como o segundo taxon máis abundante (taxon 2). Ademais, métricas de diversidade e dominancia, como o índice de Shannon e a K-dominancia, tamén mostraron unha contribución significativa. Xunto a estas

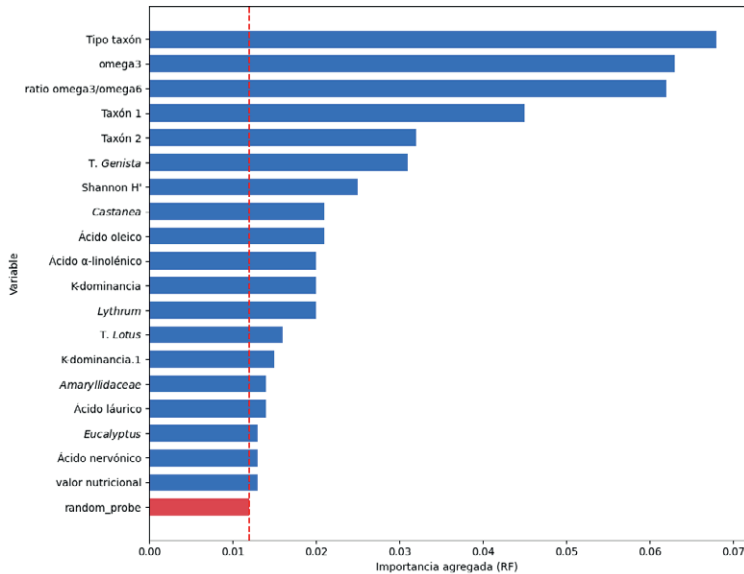


Figura 5. Importancia de variables na clasificación da estratexia trófica do pole apícola mediante Random Forest, con referencia de ruído

variables, determinados compoñentes lipídicos, como o ácido oleico, contribuíron de forma secundaria á discriminación das estratexias.

Os resultados amosan que o valor nutricional do pole apícola pode ser explicado principalmente por un conxunto reducido de variables bioquímicas clave, mentres que a estratexia trófica responde a un padrón multivariable máis complexo, no que interactúan a composición botánica, a estrutura de dominancia e a diversidade floral. Este contraste reforza a interpretación do pole como un sistema ecolóxico complexo no que converxen sinais de distinta natureza funcional, e confirma o papel central de determinados taxons clave, como *Genista*, na articulación entre calidade nutricional e funcionamento ecolóxico do sistema.

4. Discusión

Os resultados obtidos confirman que o pole apícola constitúe un excelente indicador da estrutura da paisaxe floral e do comportamento de forraxeamento das abellas, integrando información sobre diversidade, dominancia e calidade nutricional dos recursos dispoñibles. A elevada diversidade botánica observada sitúase en liña con estudos realizados en rexións con alta heteroxeneidade ambiental, onde a combinación de especies arbóreas, arbustivas e herbáceas favorece unha ampla oferta de recursos.

A clara diferenciación entre rexións atlánticas e interiores observada na análise PCA evidencia que a composición do pole está fortemente condicionada polo contexto bioclimático e pola estrutura da vexetación. As áreas costeiras, caracterizadas por condicións húmidas e unha maior continuidade floral, amosan unha estrutura máis diversa e equilibrada, asociada a taxons como *Erica* ou *Genista*. Este padrón é consistente co descrito para sistemas costeiros europeos, nos que as condicións climáticas locais favorecen comunidades vexetais máis ricas e heteroxéneas [27]. Esta maior diversidade tradúcese nunha estrutura polifloral do pole e suxire estratexias de forraxeamento por parte das abellas, que combinan múltiples recursos para optimizar a súa dieta en ambientes con alta dispoñibilidade e continuidade de floración. Pola contra, nas zonas interiores e máis continentais, a estrutura da vexetación está máis condicionada pola estacionalidade e por condicións climáticas máis restritivas, o que favorece a dominancia de determinados taxons. Neste contexto, obsérvase unha maior presenza de *Castanea* e *Rubus*, reflectindo sistemas máis especializados e dependentes de episodios de floración masiva. Este padrón encaixa co marco bioclimático clásico, no que o clima actúa como principal determinante da composición e estrutura das comunidades vexetais [28], condicionando indirectamente a dispoñibilidade de recursos para os polinizadores e, en consecuencia, as súas estratexias de forraxeamento. Así, o pole apícola reflicte non só a composición florística, senón tamén a organización funcional da paisaxe en función do contexto climático.

Este padrón estrutural vese reforzado pola análise da K-dominancia, que revela que a maior parte das mostras presentan estruturas biflorais ou poliflorais, fronte a un menor número de mostras estritamente monoflorais. Isto evidencia unha elevada plasticidade no comportamento de forraxeamento das abellas, que adaptan a súa estratexia en función da dispoñibilidade, distribución e calidade dos recursos florais, en lugar de depender exclusivamente dun único taxon dominante. Este comportamento é consistente co carácter polilético de moitas especies de abellas, capaces de explotar múltiples fontes florais e modificar as súas preferencias segundo o contexto ecolóxico [29]. Mesmo en especies con certa fidelidade floral, observouse que a selección de recursos pode variar en función da abundancia e accesibilidade, mantendo unha estratexia flexible que optimiza a adquisición de nutrientes [30]. Ademais, a partición de recursos dentro das comunidades de polinizadores permite a coexistencia de diferentes especies e unha explotación máis eficiente do espectro floral dispoñible, reforzando a importancia das interaccións xeneralistas nos sistemas naturais [31,32].

Desde o punto de vista nutricional, os resultados amosan que a calidade do pole está fortemente determinada pola súa orixe botánica, afectando tanto ao contido proteico coma ao perfil lipídico. A variabilidade observada no contido de proteína confirma

a importancia da composición floral como factor clave na nutrición das abellas [33-35]. Do mesmo xeito, o perfil de aminoácidos presenta diferenzas significativas entre os taxons, destacando a presenza de prolina e aminoácidos ácidos como compoñentes dominantes, especialmente en pole procedente de familias como *Fabaceae*, o que reforza o seu valor funcional [36,37]. Ademais, estudos previos confirman que tanto o contido en aminoácidos coma o perfil lipídico, incluíndo os ácidos graxos omega, dependen directamente da orixe botánica e xeográfica do pole [35, 38]. Neste contexto, as mostras biflorais amosaron perfís máis completos e equilibrados, o que suxire que a combinación de fontes florais pode optimizar a dispoñibilidade de aminoácidos esenciais e mellorar a calidade global do recurso. Pola contra, as mostras monoflorais presentaron unha maior dependencia do taxon dominante, o que pode condicionar o equilibrio nutricional, en liña co observado noutros estudos sobre produtos apícolas, nos que a composición polínica inflúe de forma variable no contido proteico [39, 40]. Estes resultados apoian a idea de que a diversidade funcional, máis ca a riqueza taxonómica por si soa, é determinante na calidade nutricional do pole, xa que a combinación de diferentes fontes vexetais permite compensar limitacións nutricionais individuais e mellorar o valor global do recurso.

En relación co perfil lipídico, os resultados confirman que o equilibrio entre ácidos graxos omega-6 e omega-3 varía significativamente segundo a composición botánica. As mostras con razóns máis baixas, como as asociadas a *Genista* ou a estruturas oligoflorais, presentan unha maior calidade lipídica, mentres que as dominadas por *Castanea* ou certas poliflorais amosan perfís menos equilibrados. Este padrón coincide con estudos que destacan a influencia da orixe floral na composición lipídica e na adecuación nutricional do pole [36].

A integración destas variables no proposto índice nutricional composto permitiu sintetizar a complexidade nutricional do pole nunha métrica única. A literatura indica que o contido proteico non é o único factor determinante na súa relevancia para as abellas, senón que a dispoñibilidade e a abundancia do recurso son igualmente clave [41]. Neste sentido, os taxons como *Castanea* actúan como recursos masivos altamente explotados, mentres que outros como *Genista*, cun perfil máis rico en proteína, poden desempeñar un papel de compensación nutricional, especialmente en contextos de menor dispoñibilidade doutros recursos, reforzando a súa función como fonte principal de pole. Neste contexto, a clasificación das estratexias tróficas evidencia que o comportamento funcional do pole non depende exclusivamente do valor nutricional absoluto, senón da interacción entre o tipo funcional do taxon dominante e a súa dominancia. Así, os taxons F1 (*Genista*) actúan como recursos compensatorios (C1), mentres que os taxons masivos F2 (*Castanea*, *Rubus*) asóciase a escenarios de abundancia (C2) ou estrés (C4) segundo

a súa dominancia. Pola súa banda, os taxons F3 (*Erica*, *Echium*) reflicten situacións de forraxeamento equilibrado (C3) e os F4 (*Eucalyptus*, *C. maculatum*) aparecen ligados a contextos máis oportunistas ou de limitación de recursos (C4). Ademais, a dimensión fenolóxica reforza este padrón dinámico: as fases iniciais e de transición están dominadas por estratexias de compensación e inestabilidade, mentres que o pico de floración concentra situacións de abundancia non sempre equilibradas.

Como conclusión, estes resultados evidencian que o pole apícola debe interpretarse como un sistema dinámico no que a interacción entre paisaxe floral, dispoñibilidade de recursos e comportamento de forraxeamento determina a súa calidade nutricional, máis alá da composición puntual de cada mostra.

5. Referencias

- [1] Di Pasquale, G., Alaux, C., Le Conte, Y., Odoux, J. F., Pioz, M., Vaissière, B. E., et al. (2016). Variations in the availability of pollen resources affect honey bee health. PLOS ONE, 11(9), e0162818.
- [2] Campos, M. G. R., Bogdanov, S., de Almeida-Muradian, L. B., Szczesna, T., Mancebo, Y., Frigerio, C., et al. (2008). Pollen composition and standardisation of analytical methods. Journal of Apicultural Research, 47(2), 154–161.
- [3] Martinello, M., Mutinelli, F. (2021). Antioxidant activity in bee products: A review. Antioxidants, 10(1), 71.
- [4] Barbieri, D., Gabriele, M., Summa, M., Colosimo, R., Leonardi, D., Domenici, V., et al. (2020). Antioxidant, nutraceutical properties, and fluorescence spectral profiles of bee pollen samples from different botanical origins. Antioxidants, 9(10), 1001.
- [5] Cavallero, A., Vidotto, F., Sbrana, C., Peres Fabbri, L., Petroni, G., Gabriele, M. (2025). Antioxidant-rich polyfloral bee pollen exerts antimicrobial activity and anti-inflammatory effect in A549 lung epithelial cells by modulating the NF-κB pathway. Foods, 14, 802.
- [6] Rojo, S., Escuredo, O., Rodríguez-Flores, M. S., Seijo, M. C. (2023). Botanical origin of Galician bee pollen (Northwest Spain) for the characterization of phenolic content and antioxidant activity. Foods, 12, 294.
- [7] Aylanc, V., Larbi, S., Calhelha, R., Barros, L., Rezouga, F., Rodríguez-Flores, M. S., et al. (2023). Evaluation of antioxidant and anticancer activity of mono- and polyfloral Moroccan bee pollen by characterizing phenolic and volatile compounds. Molecules, 28, 835.

[8] Rocchetti, G., Castiglioni, S., Maldarizzi, G., Carloni, P., Lucini, L. (2019). UHPLC-ESI-QTOF-MS phenolic profiling and antioxidant capacity of bee pollen from different botanical origins. *International Journal of Food Science & Technology*, 54, 335–346.

[9] Benvenuti, S., Mazzoncini, M. (2021). Entomogamy in wildflowers: What level of pollinator biodiversity is required? *Acta Oecologica*, 111, 103737.

[10] Xie, Z., Wang, Y., Cao, J., Wang, J., An, J. (2021). Ecological resilience of pollination in the face of pollinator decline: Content, mechanism and perspective. *Biodiversity Science*, 29, 980–994.

[11] Soobrattee, M. A., Neergheen, V. S., Luximon-Ramma, A., Aruoma, O. I., Bahorun, T. (2005). Phenolics as potential antioxidant therapeutic agents: Mechanism and actions. *Mutation Research*, 579, 200–213.

[12] Sawicki, T., Starowicz, M., Kłębukowska, L., Hanus, P. (2022). The profile of polyphenolic compounds, contents of total phenolics and flavonoids, antioxidant and antimicrobial properties of bee products. *Molecules*, 27, 1301.

[13] Benzie, I. F. F., Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239, 70–76.

[14] Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28, 25–30.

[15] Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26, 1231–1237.

[16] Gabriele, M., Parri, E., Felicioli, A., Sagona, S., Pozzo, L., Biondi, C., et al. (2015). Phytochemical composition and antioxidant activity of Tuscan bee pollen of different botanic origins. *Italian Journal of Food Science*, 27, 248–259.

[17] Barth, O. M., Freitas, A. S., Oliveira, É. S., Silva, R. A., Maester, F. M., Andrella, R. R. S., et al. (2010). Evaluation of the botanical origin of commercial dry bee pollen load batches using pollen analysis: A proposal for technical standardization. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 82, 893–902.

[18] McAleece, N., Lamshead, P. J. D., Paterson, G. L. J., Gage, J. D. (1997). *BioDiversity Pro: Free statistics software for ecology*. London: The Natural History Museum & The Scottish Association for Marine Science.

- [19] Rodríguez-Flores, M. S., Saker, Y., Seijo, M. C., Harbane, S., Escuredo, O. (2026). Functional antioxidant assessment of bee pollen based on phenolic composition, botanical origin and composite index validation. *Applied Sciences*, 16(5), 2574.
- [20] Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248–254.
- [21] Ares, A. M., Valverde, S., Bernal, J. L., Nozal, M. J., Bernal, J. (2017). Extraction and determination of bioactive compounds from bee pollen. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 147, 110–124.
- [22] González-Paramás, A. M., Gómez Bárez, J. A., Cordón Marcos, C., García-Villanova, R. J., Sánchez Sánchez, J. (2006). HPLC-fluorimetric method for analysis of amino acids in products of the hive (honey and bee pollen). *Food Chemistry*, 95, 148–156.
- [23] Human, H., Nicolson, S. W. (2006). Nutritional content of fresh, bee-collected and stored pollen of *Aloe greatheadii* var. *davyana*. *Phytochemistry*, 67, 1486–1492.
- [24] Genet, T., Labuschagne, M. T., Hugo, A. (2004). Capillary gas chromatography analysis of Ethiopian mustard to determine variability of fatty acid composition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 1663–1670.
- [25] Wang, X., Wang, H., Liu, Y., You, J., Suo, Y. (2009). Extraction of pollen lipids by SFE-CO₂ and determination of free fatty acids by HPLC. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 111, 155–163.
- [26] OECD, European Union, Joint Research Centre–European Commission. (2008). Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide. Paris: OECD.
- [27] Del Vecchio, S., Fantinato, E., Janssen, J., et al. (2018). Biogeographic variability of coastal perennial grasslands at the European scale. *Applied Vegetation Science*, 21, 312–323.
- [28] Larsen, J. A. (1989). Background and setting. In *The upland forests of the Lake States*. New York: Springer.
- [29] Davis, E. S., Reid, N., Paxton, R. J., et al. (2012). Quantifying forage specialisation in polyphagic insects: the polylectic and rare solitary bee *Colletes floralis* (Hymenoptera: Colletidae). *Insect Conservation and Diversity*, 5, 185–194.
- [30] Salvarrey, S., Arbulo, N., Santos, E., et al. (2020). Constancia floral en los abejorros nativos *Bombus pauloensis* y *Bombus bellicosus*.

- [31] Pigozzo, C. M., Viana, B. F. (2010). Estrutura da rede de interações entre flores e abelhas em ambiente de caatinga. *Oecologia Australis*, 14, 140–153.
- [32] Wang, Q. (2024). Floral resource partitioning of coexisting bumble bees: distinguishing species-, colony-, and individual-level effects. *Ecology*.
- [33] Alshallash, K. S., Abolaban, G. F., Elhamamsy, S. M., et al. (2023). Bee pollen as a functional product – chemical constituents and nutritional properties. *Journal of Ecological Engineering*, 24, 1–10.
- [34] Thakur, M., Nanda, V. (2020). Composition and functionality of bee pollen: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 98, 82–106.
- [35] Gardana, C., Del Bo, C., Quicazán, M. C., Correa, A. R., Simonetti, P. (2018). Nutrients, phytochemicals and botanical origin of commercial bee pollen from different geographical areas. *Journal of Food Composition and Analysis*, 73, 29–38.
- [36] Şimşek, A., Süzerer, V., Oskay, D. (2025). Determination of protein content and amino acid composition of bee pollen extracts. *Hayvansal Üretim*.
- [37] Végh, R., Csóka, M. (2024). Amino acids, peptides, and proteins of pollen. In *Pollen chemistry biotechnology* (pp. 17–49).
- [38] Bobiş, O., Urcan, A. C., De-Melo, A. A. M., de Almeida-Muradian, L. B. (2025). Chemical composition of bee pollen. In *Bee products: Chemical and biological properties* (pp. 339–390).
- [39] Almeida-Muradian, L. B., Pamplona, L. C., Coimbra, S., Barth, O. M. (2005). Chemical composition and botanical evaluation of dried bee pollen pellets. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18, 105–111.
- [40] Rodríguez-Castiñeira, J., Armesto-Baztán, S., de Sá-Otero, M. P. (2015). Origen botánico y contenido en proteína de mieles artesanales procedentes de Galicia (NO de España). *Botánica Complutensis*, 39, 105–114.
- [41] Liolios, V., Tananaki, C., Dimou, M., Kanelis, D., Goras, G., Karazafiris, E., Thrasyvoulou, A. (2015). Ranking pollen from bee plants according to their protein contribution to honey bees. *Journal of Apicultural Research*, 54, 582–592.

Avaliación de modelos zero-shot para a predición de niveis ambientais de pole na provincia de Ourense

M. Novo-Lourés^{1, 2, 4}

N. Vidal-Romero¹

M. Pérez-Pérez^{1, 2, 4}

K. C. Sánchez Espinosa^{3, 4}

R. Pavón^{1, 2, 4}

M. Reboiro-Jato^{1, 2, 4}

¹*Departamento de Informática, Escola Superior de Enxeñaría Informática (ESEI), campus de Ourense, Universidade de Vigo*

²*Grupo de Investigación SING, Instituto de Investigación Sanitaria Galicia Sur (IIS Galicia Sur), Servizo Galego de Saúde (Sergas)-Universidade de Vigo (UVigo), Ourense*

³*Departamento de Bioloxía Vexetal e Ciencias do Solo, Facultade de Ciencias, campus de Ourense, Universidade de Vigo*

⁴*Campus Auga, Edificio do Campus Auga, campus de Ourense, Universidade de Vigo*

manovo@uvigo.gal; vidalromeronicolas@gmail.com; martiperez@uvigo.gal; keniacaridad.sanchez@uvigo.gal; pavon@uvigo.gal; mrjato@uvigo.gal

Resumo

A predición de niveis atmosféricos de pole constitúe unha ferramenta fundamental para a prevención e a xestión das alerxias respiratorias, que afectan a un número crecente de persoas. Tradicionalmente, esta tarefa tratouse mediante modelos estatísticos ou de aprendizaxe automática que requiren un proceso previo de adestramento con datos específicos e, en moitos casos, a incorporación de variables meteorolóxicas. Porén, a

recente aparición de modelos fundacionais *zero-shot* para a predición de series temporais abriu novas posibilidades, ao permitir realizar predicións sen necesidade de adestramento previo con datos específicos do ámbito.

Neste traballo analízase o potencial destes modelos para a predición de niveis de pole atmosférico. Para iso, avaliáronse e comparáronse distintos modelos fundacionais con capacidades *zero-shot*, como Chronos e Moirai, fronte a modelos de referencia que requiren adestramento previo, como N-HiTS e N-BEATS. O estudo realizouse empregando datos diarios de concentración de pole recollidos na cidade de Ourense dende 1993, mediante a análise na predición das datas de inicio e fin da estación principal de pole do taxon *Alnus glutinosa*.

Para garantir unha comparación sistemática entre modelos, desenvolveuse unha infraestrutura experimental baseada nun *pipeline* común de preprocesamento, predición e avaliación. Os resultados obtidos amosan que determinados modelos fundacionais *zero-shot* son capaces de acadar un rendemento comparable ou incluso superior ao dos modelos tradicionais adestrados, mesmo cando estes empregan variables meteorolóxicas adicionais. Estes achados manifestan o potencial dos modelos *zero-shot* para simplificar o proceso de modelaxe na predición de pole atmosférico, reducindo a necesidade de adestramento específico e abrindo novas liñas de investigación na aplicación de modelos de intelixencia artificial de propósito xeral no ámbito ambiental.

Palabras clave: predición de pole, modelos fundacionais, *zero-shot* e series temporais

1. Introducción

A modificación dos ciclos de floración derivada do cambio climático prolongou a exposición ao pole e, en consecuencia, eleva o risco de padecer alerxias respiratorias (Berezhanskiy *et al.*, 2026; D'Amato *et al.*, 2023). Este feito manifesta a necesidade de dispoñer de mecanismos que permitan estimar, coa maior precisión posible, a concentración de pole presente na atmosfera, co obxectivo de proporcionar información fiable que permita alertar as persoas hipersensibilizadas, facilitar a adopción de medidas preventivas axeitadas e contribuír a reducir o impacto das alerxias respiratorias.

Tradicionalmente, na predición de niveis de pole adoitaban empregarse modelos estatísticos como regresións lineais (Rodríguez-Rajo *et al.*, 2011), aínda que nos últimos anos destacou a irrupción dos modelos baseados na aprendizaxe automática (ML, *Machine Learning*) como *Random Forest* (Astray *et al.*, 2025; Navares e Aznarte, 2016), *XGBoost* (Noorunnahar *et al.*, 2023) ou ANN (*Artificial Neural Networks*) (Astray *et al.*, 2016; Iglesias-Otero *et al.*, 2015; Valencia *et al.*, 2019), cos que se acadan rendementos similares ou superiores.

Dentro dos modelos de ML, destaca o recente crecemento da aprendizaxe profunda (DL, *Deep Learning*), que provocou unha verdadeira revolución en distintas áreas da IA (intelixencia artificial). Aínda que inicialmente o seu impacto foi máis evidente en campos como a visión artificial ou o procesamento da linguaxe natural, moitos outros ámbitos comezaron a beneficiarse, pouco a pouco, da aparición de novos modelos baseados en DL. Un destes ámbitos é a predición e series temporais, no cal se están a propoñer novas arquitecturas baseadas en redes neuronais profundas, CNN (*Convolutional Neural Networks*) (Lops *et al.*, 2020), LSTM (*Long Short-Term Memory*) (Makra *et al.*, 2024) e transformadores (Nayak *et al.*, 2024), así como modelos fundacionais (isto é, adestrados nun amplo número de conxuntos de datos de carácter xeral). Ademais, recentemente xurdiron varios modelos con capacidades *zero-shot*, é dicir, que, sen un adestramento previo, amosan un nivel de rendemento en ámbitos concretos similar ao de modelos adestrados ou axustados con datos específicos do ámbito (Ansari *et al.*, 2024; Dooley *et al.*, 2023).

Así mesmo, na predición de series temporais cabe distinguir os modelos univariantes dos multivariantes, en base ao número de variables obxectivo que son capaces de manexar. Así, modelos como regresións lineais (Rodríguez-Rajo *et al.*, 2011) considéranse univariantes, pois só traballan cunha variable obxectivo, mentres que outros modelos como VAR (*Vector AutoRegression*) (Zivot e Wang, 2003) ou VARMA (*Vector AutoRegressive Moving Average*) (Scherrer e Deistler, 2019) considéranse multivariantes, ao ser capaces de traballar con múltiples variables obxectivo. Por outra banda, tamén hai que diferenciar os modelos capaces de traballar con variables exógenas, que poden empregar información de variables non obxectivo para mellorar a predición das variables obxectivo. Neste grupo inclúense modelos como SARIMA (*Seasonal ARIMA with eXogenous variables*) ou modelos baseados en ML como TCN (*Temporal Convolutional Networks*) (Lea *et al.*, 2016) ou N-BEATS (*Neural Basis Expansion Analysis for Time Series Forecasting*) (Oreshkin *et al.*, 2020).

No contexto da predición de niveis atmosféricos de pole existe, polo xeral, unha única variable obxectivo (o nivel atmosférico de pole), polo que resultan de interese os modelos univariantes. Ademais, debido á influencia que variables atmosféricas, tales como a temperatura ou as precipitacións, poden ter na floración, tamén resultan de interese os modelos con soporte para variables exógenas que poidan sacar proveito delas.

Segundo isto, este traballo propón as hipóteses de que: (i) a recente creación de modelos *zero-shot* para a predición de series temporais fai innecesario o adestramento ou axuste de modelos para a predición de niveis atmosféricos de pole e (ii) as melloras na predición de series temporais acadadas polos modelos de DL recentemente creados fai innecesario o uso de variables atmosféricas para a predición de niveis atmosféricos de

pole. Porén, o obxectivo principal do presente traballo consiste en validar estas hipóteses sobre tres dos taxons de pole máis alerxénicos presentes na cidade de Ourense: *Alnus*, *Platanus* e *Urticaceae*.

2. Materiais e métodos

Este estudo levouse a cabo na cidade de Ourense, entre os anos 1993 e 2022. A recollida de datos de pole realizouse mediante un captador volumétrico Lanzoni VPPS-2000 situado na azotea do edificio Politécnico (campus de Ourense). Os datos de pole foron contabilizados seguindo o protocolo estandarizado da REA (Rede Española de Aerobiología).¹ Os resultados obtidos expresáronse como a integral estacional de pole (SPIn, *Seasonal Pollen Integral*) na forma de grans de pole totais da tempada, con valores medios diarios expresados como pole*día/m³ de aire (Galán *et al.*, 2017). Estes datos complementáronse coa información sobre as condicións meteorolóxicas obtida da Unidade de Observación Predición Meteorolóxica,² concretamente da estación ID 10148 «Ourense».

Para levar a cabo este estudo, utilizouse un conxunto de datos de niveis de pole diarios recompilados de maneira continuada dende o ano 1993. Aínda que este conxunto de datos inclúe información relativa a 70 taxa, o presente traballo centrouse só no taxon *Alnus*, por tratarse dun dos máis alerxénicos. Este conxunto de datos complementouse con información meteorolóxica detallada, incluíndo variables como a precipitación acumulada (mm), as temperaturas máxima, media e mínima (°C), a humidade relativa (%), sol (h), a velocidade do vento (km/h) e a temperatura de orballo (°C). A incorporación destas variables permite analizar a influencia das condicións meteorolóxicas na dinámica da concentración de pole na atmosfera e avaliar ata que punto a súa inclusión como variables exógenas contribúe a mellorar a capacidade predictiva dos modelos considerados.

Co fin de acadar o obxectivo proposto, comezouse por levar a cabo unha revisión exhaustiva do estado da arte dos modelos *zero-shot* aplicables na predición de series temporais. Esta revisión centrouse principalmente nos modelos orientados á análise de series univariantes e que, ademais, permitisen incorporar variables exógenas no proceso de predición, que poden resultar clave para mellorar a capacidade explicativa e predictiva dos modelos.

A partir desta revisión, seleccionáronse tanto os modelos *zero-shot* coma os modelos que requiren adestramento para empregalos como referencia (véxase a figura 1). No

¹ https://www.aerobiologia.com/app/download/5783625283/manual_cast.pdf

² <https://www.meteogalicia.gal/web/home>

caso dos modelos *zero-shot* seleccionáronse como opcións máis adecuadas os modelos Chronos (Ansari *et al.*, 2024) e Moirai (Liu *et al.*, 2024), debido á súa robustez e versatilidade en distintos contextos de predición de series temporais. Ademais, ambos modelos presentan un alto grao de difusión, así como unha arquitectura deseñada especificamente para facilitar a predición en escenarios *zero-shot*. Outro factor relevante na súa elección foi o feito de que están desenvolvidos e mantidos por dúas empresas tecnolóxicas de referencia, Amazon e Salesforce, respectivamente, o que garante unha certa estabilidade no desenvolvemento das ferramentas, actualizacións continuas e unha ampla documentación técnica dispoñible para a comunidade investigadora.

Este tipo de modelos adoitan presentarse en diferentes tamaños, dependendo do número de parámetros internos. Os tamaños máis pequenos requiren menos recursos computacionais e teñen tempos de inferencia menores, pero tamén teñen menos capacidade para identificar padróns complexos ou manexar grandes volumes de datos, mentres que os modelos máis grandes requiren máis recursos computacionais e teñen tempos de inferencia maiores que poden non compensar a posible mellora de rendemento obtida co seu uso. Por outra banda, os modelos Chronos e Moirai poden xerar múltiples traxectorias futuras posibles mediante mostraxe, e permiten controlar o grao de aleatoriedade na xeración (determinista, estocástica ou automática) a través dos seus parámetros. Ademais, o modelo Chronos ofrece varias variantes do modelo baseadas en arquitecturas de tipo *transformer*: unha baseada en T5 (Raffel *et al.*, 2020), máis potente, e outra optimizada (Bolt), máis eficiente. Dada a variación de rendemento que poden ter as diferentes configuracións destes modelos, neste traballo avaliáronse diferentes variantes deles para identificar as configuracións cun mellor rendemento no ámbito.

Como modelos de referencia que requiren un proceso previo de adestramento, optouse por N-HiTS (Neural Hierarchical Interpolation for Time Series) (Challu *et al.*, 2023) e N-BEATS (Oreshkin *et al.*, 2020). A elección destes modelos baséase, principalmente, no seu recoñecido rendemento no ámbito da predición de series temporais univariantes, onde teñen demostrado unha elevada capacidade para capturar padróns complexos, tendencias e compoñentes estacionais presentes nos datos. Ademais, trátase de arquitecturas baseadas en DL que acadaron resultados destacados en traballos previos realizados polos autores deste traballo, feito que reforza a súa idoneidade como modelos de referencia para avaliar de maneira rigorosa o comportamento das novas aproximacións analizadas neste proxecto. A súa inclusión permite, polo tanto, establecer unha base sólida de comparación fronte ás aproximacións *zero-shot* consideradas no estudo.

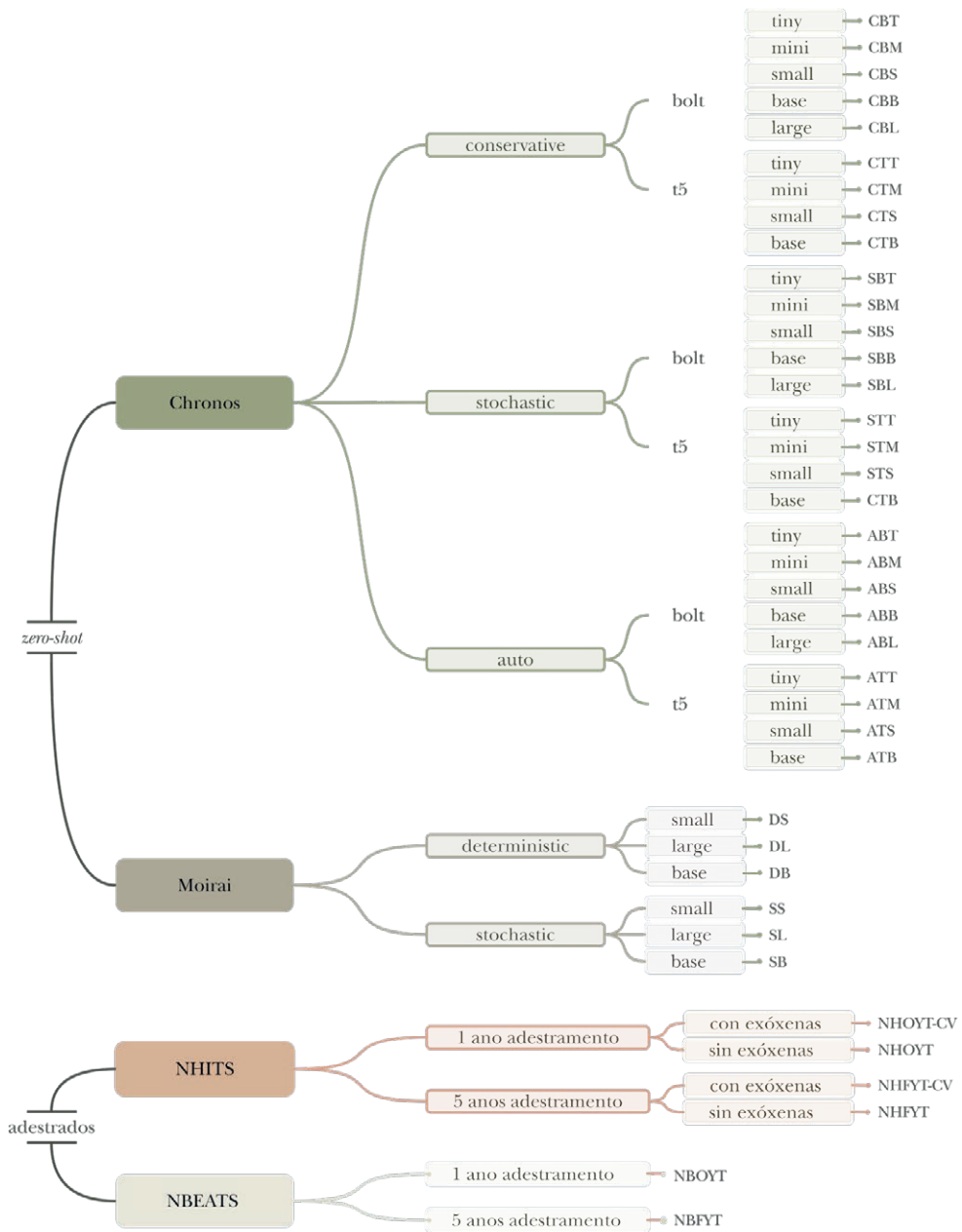


Figura 1. Modelos e configuracións avaliados

Co obxectivo de establecer un marco de traballo que permitise avaliar de maneira sistemática o comportamento de distintos modelos seleccionados, desenvolveuse unha infraestrutura *ad-hoc* orientada á predición de niveis atmosféricos de pole. En particular, esta infraestrutura foi deseñada arredor dun *pipeline* de avaliación común (figura 2) que facilitase a comparación sistemática e homoxénea entre modelos *zero-shot* e outros modelos de referencia que requiren adestramento previo, garantindo así que todos fosen avaliados baixo as mesmas condicións experimentais. Ademais, procurouse que esta infraestrutura fose suficientemente flexible para permitir a incorporación ou exclusión de variables exógenas no proceso de predición, de modo que se puidese analizar o impacto deste tipo de información adicional no rendemento dos diferentes modelos considerados.

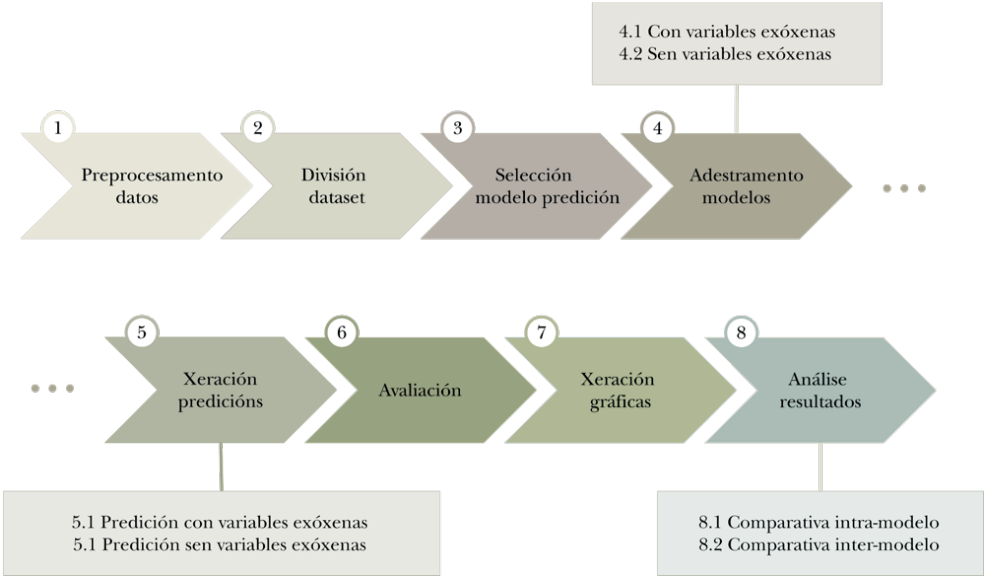


Figura 2. Esquema do *pipeline* de análise empregado para avaliar os modelos seleccionados

Na figura 2 represéntanse as distintas etapas do proceso, dende o procesamento de datos ata a avaliación dos resultados obtidos. En primeiro lugar, o *pipeline* executa unha fase de preprocesamento do conxunto de datos co obxectivo de garantir a súa consistencia e adecuación para o proceso de modelización. Esta prepara os datos para a súa división na fase seguinte en dous subconxuntos temporais ben diferenciados, destinados ao adestramento e avaliación dos modelos, respectivamente. O período de adestramento vai dende o ano 1993 ata o 1998, mentres que o período de avaliación comprende dende o ano 2000 ata o 2022.

Tras a preparación dos conxuntos de datos faise unha selección do modelo que se vai avaliar de entre as diferentes configuracións escollidas para estudo (véxase a figura 1). No caso de tratarse dun dos modelos de referencia (N-HITS ou N-BEATS), durante a fase de adestramento, axústanse empregando dúas configuracións temporais diferentes co fin de analizar a influencia da cantidade de datos dispoñibles no rendemento dos modelos. En concreto, realizáronse probas utilizando o conxunto de datos de adestramento completo (cinco anos, de 1993-1998) e só un único ano (1998). Esta estratexia permitiu avaliar en que medida a ampliación do histórico de datos contribúe á mellora da capacidade predictiva dos modelos. Cómpre sinalar que esta fase non resulta aplicable aos modelos *zero-shot*, xa que estes non requiren un proceso previo de adestramento para xerar as súas predicións.

A seguinte fase consiste na xeración de predicións a sete días vista empregando unha xanela corrediza de 365 días sobre o intervalo temporal reservado para a avaliación. Este procedemento permitiu simular un escenario de predición iterativa, no que en cada paso se emprega un ano completo de información histórica para xerar as estimacións correspondentes á semana seguinte. Deste xeito, púidose analizar o comportamento dos distintos modelos ao longo de todo o período de avaliación e baixo diferentes horizontes temporais (de 1 a 7 días).

No caso dos modelos *zero-shot*, avaliáronse varias configuracións de hiperparámetros co obxectivo de analizar a súa estabilidade e a súa sensibilidade fronte a cambios na parametrización do modelo. Cómpre indicar que, nestes modelos, non se incorporaron variables meteorolóxicas como información adicional, xa que as versións empregadas non permitían a súa inclusión sen realizar un proceso previo de axuste dos pesos do modelo.

Pola súa banda, no caso dos modelos de referencia xeráronse predicións baixo dúas configuracións diferentes: (i) empregando exclusivamente a serie temporal da variable obxectivo e (ii) empregando variables meteorolóxicas como variables exógenas. Esta comparación permitiu avaliar o posible impacto destas variables na capacidade predictiva dos modelos.

Na avaliación dos modelos empregouse como criterio principal a súa capacidade para identificar as datas de inicio e o fin da estación polínica principal (MPS, *Main Pollen Season*). Para a determinación da MPS, en xeral, existen dous métodos diferentes: (i) definir unha porcentaxe do índice de pole anual ou estacional como data de inicio ou fin e (ii) definir un limiar determinado, é dicir, unha concentración diaria de pole durante un período determinado. Neste traballo decidiuse utilizar como criterio o método baseado na porcentaxe acumulada do pole anual. En concreto, calculouse o pole acumulado ao longo do ano e determinouse como inicio da MPS o día no que se

alcanza o 2,5 % do total anual acumulado, mentres que a finalización se establece no momento no que se acada o 97,5 %. Esta aproximación, amplamente empregada en estudos aerobiolóxicos (Glick *et al.*, 2021; Tasioulis *et al.*, s. f.), permite delimitar de maneira obxectiva o período principal de emisión de pole, reducindo a influencia de valores illados ou episodios puntuais de baixa concentración. A partir desta definición, deriváronse varias métricas de rendemento destinadas a facilitar a comparación entre os distintos modelos avaliados. En particular, calculouse a desviación na data estimada de inicio da MPS respecto á observada e a desviación na data de finalización. Estas métricas permiten avaliar non só a precisión temporal das predicións, senón tamén a capacidade dos modelos para reproducir a extensión global da estación polínica.

Nunha fase posterior, xeráronse gráficos informativos a partir das predicións xeradas. Resultan especialmente relevantes os diagramas de caixa (*boxplots*), que permiten visualizar a mediana, a dispersión dos valores e a presenza de posibles valores atípicos para cada horizonte de predición e para cada modelo.

A fase final do *pipeline* é a de análise de resultados. Esta fase divídese en dúas etapas complementarias: a análise intramodelo e a análise intermodelo. Na primeira delas avalíase o rendemento das distintas configuracións de hiperparámetros consideradas para cada modelo co obxectivo de identificar as que presentaban o mellor comportamento predictivo. Esta análise permite examinar a sensibilidade de cada modelo fronte ás variacións nos seus parámetros de configuración e seleccionar, para cada enfoque, a combinación que ofrece os resultados máis favorables segundo as métricas definidas previamente.

Unha vez identificadas as configuracións óptimas, realízase unha análise intermodelo, na que se compara o rendemento das mellores configuracións de cada modelo a partir dos resultados da análise intramodelo. Esta comparación permite establecer unha valoración global do comportamento relativo dos distintos modelos, así como identificar posibles vantaxes ou limitacións de cada aproximación en termos de predición.

Co obxectivo de determinar se as diferenzas observadas entre modelos eran estatisticamente significativas, aplicáronse probas estatísticas non paramétricas sobre os días de desviación na predición da data de inicio e de fin da estación de pole en cada ano do conxunto de test. En primeiro lugar, empregouse a proba de Kruskal-Wallis (Kruskal e Wallis, 2012), que permite avaliar a existencia de diferenzas significativas entre varios grupos independentes sen asumir normalidade nas distribucións. Con ela avalíase se existían diferenzas significativas entre todo o conxunto de modelos. Posteriormente, realizouse unha análise de comparacións emparelladas entre modelos mediante a proba U de Mann-Whitney (Mann e Whitney, 1947), co propósito de identificar que pares de modelos presentaban diferenzas estatisticamente significativas no seu rendemento.

Co fin de controlar o incremento do risco de falsos positivos asociado á realización de múltiples comparacións, aplicouse a corrección de Holm-Bonferroni (Holm, 1979) aos valores obtidos nas probas emparelladas. Este procedemento permite controlar os falsos positivos derivados das comparacións múltiples, reducindo a probabilidade de identificar diferenzas estatisticamente significativas espurias e garantindo unha interpretación máis robusta dos resultados.

3. Resultados e discusión

Na comparación intramodelo, a proba de Kruskal-Wallis non detectou unha diferenza significativa ($p = 0,307$) na predición da data de inicio (DI) da MPS, mentres que na predición da data de finalización (DF) si que houbo diferenzas significativas ($p < 0,001$). Con base nisto, aplicouse a proba U de Mann-Whitney con corrección de Holm-Bonferroni para a comparación directa entre parellas de modelos, detectando diferenzas significativas de rendemento tanto para a predición da data de inicio coma para a data de finalización entre varios modelos.

Na táboa 1 preséntase un resumo dos resultados emparellados para as distintas configuracións do modelo Chronos. Para cada parella móstranse dúas iconas, a primeira relativa á predición da DI e a segunda relativa á predición da DF. As frechas indican se o rendemento do modelo da fila é significativamente superior (frecha cara arriba) ou inferior (frecha cara abaixo) ao modelo da columna e un guión para indicar que non hai diferenzas significativas. Como se poder ver, a configuración *auto t5* de Chronos é a que consegue unha mellor predición da DI, e é a variante *base* (ATB) a que mellores resultados consegue tamén na predición da DF. En contra do esperado, a variante *base* rendeu mellor ca a *large*. Isto pode deberse a que o modelo *large* é máis sensible ao ruído e pode tender a sobreaxustar cun contexto limitado dun ano, mentres que o modelo *base* xeneraliza mellor e capta a estacionalidade dominante do pole.

A táboa 2 presenta a comparativa para as distintas configuracións de Moirai. Como se pode ver, as variantes *deterministic large* (DL) e *stochastic large* (SL) son as que conseguen un rendemento significativamente superior nun maior número de casos, tanto para a predición da DI coma da DF, seguidas moi de preto pola configuración *deterministic small* (DS), e non hai diferenzas significativas entre as tres configuracións. Neste caso cómpre ter en conta que os modelos de maior tamaño presentan un mellor rendemento.

En canto aos modelos de referencia, as variantes veñen determinadas polo tamaño do conxunto de adestramento. Tal e como se pode comprobar na táboa 3, para N-BEATS non hai un gañador claro, pois a variante cun ano de adestramento (NBOYT) consegue predicir mellor a DF, mentres que a variante con cinco anos de adestramento (NBFYT) consegue predicir mellor a DI.

	ABB	ABM	ABS	ABT	ATB	ATL	ATM	ATS	ATT	CBB	CBM	CBS	CBT	CTB	CTL	CTM	CTS	CTT	SBB	SBM	SBS	SBT	STB	STL	STM	STS	STT	DI ↑	DI ↓	DF ↑	DF ↓	↑	↓
ABB		↑↑	—	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	—	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	—	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	3	0	3	15	6	15	
ABM	↓↓		↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	0	21	0	24	0	45		
ABS	—	↑↑	—	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	—	↑↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	—	↑↓	↓↓	↓↓	—	↓↓	3	0	6	14	9	14		
ABT	—	↑↑	↑↑		↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	↓↓	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	↓↓	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	0	1	3	18	3	19		
ATB	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑		↑↑	—	—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	17	0	23	0	40	0	
ATL	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓		—	—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	3	1	23	0	26	1	
ATM	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—		—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	7	0	22	0	29	0	
ATS	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—		↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	9	0	22	0	31	0	
ATT	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	—	—		↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	7	0	21	2	28	2	
CBB	—	↑↑	—	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓		↑↑	—	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	—	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	1	3	0	3	15	6	15	
CBM	↓↓	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓		↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	0	21	0	24	0	45		
CBS	—	↑↑	—	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑		↑↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	—	↑↓	↓↓	↓↓	—	↓↓	3	0	6	14	9	14		
CBT	—	↑↑	↓↓	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	↓↓		↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	↓↓	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	0	1	3	18	3	19		
CTB	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑		—	—	—	—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	3	1	12	5	15	6		
CTL	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—		—	—	—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	3	2	12	5	15	7		
CTM	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—		—	—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	3	4	12	5	15	9		
CTS	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—		—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	3	1	12	5	15	6		
CTT	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—		↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	3	1	12	4	15	5		
SBB	—	↑↑	—	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	—	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓		↑↑	—	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	3	0	3	15	6	15		
SBM	↓↓	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓		↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	0	21	0	24	0	45		
SBS	—	↑↑	—	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	—	↑↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑		↑↓	↓↓	↓↓	—	↓↓	3	0	6	14	9	14		
SBT	—	↑↑	↓↓	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	↓↓	—	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	—	↑↑	↓↓		↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	0	1	3	18	3	19		
STB	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	3	2	12	5	15	7		
STL	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	3	4	12	5	15	9		
STM	↑↑	↑↑	—	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑	↑↑	—	↑↑	—	—	—	—	—	↑↑	↑↑	—	↑↑	—	—	—	—	3	4	9	5	12	9		
STS	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	3	4	12	5	15	9		
STT	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	—	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	—	—	—	—	3	1	12	5	15	6		

Táboa 1. Comparativa do rendimento das variantes do modelo Chronos

	DB	DL	DS	SB	SL	SS	DI ↑	DI ↓	DF ↑	DF ↓	↑	↓
DB		↓ ↓	↓ ↓	— —	↓ ↓	↓ —	0	4	0	3	0	7
DL	↑ ↑		— —	↑ ↑	— —	— ↑	2	0	3	0	5	0
DS	↑ ↑	— —		↑ ↑	— —	— —	2	0	2	0	4	0
SB	— —	↓ ↓	↓ ↓		↓ ↓	— —	0	3	0	3	0	6
SL	↑ ↑	— —	— —	↑ ↑		— ↑	2	0	3	0	5	0
SS	↑ —	— ↓	— —	— —	— ↓		1	0	0	2	1	2

Táboa 2. Comparativa do rendimento das variantes do modelo Moirai

	NBFYT	NBOYT	DI ↑	DI ↓	DF ↑	DF ↓	↑	↓
NBFYT		↑ ↓	1	0	0	1	1	1
NBOYT	↓ ↑		0	1	1	0	1	1

Táboa 3. Comparativa do rendemento das variantes do modelo N-BEATS

Finalmente, a táboa 4 presenta os resultados das catro variantes do modelo N-HiTS, diferenciadas polo tamaño do conxunto de adestramento (un ou cinco anos) e pola incorporación de variables exóxenas. Neste modelo só se detectaron diferenzas significativas na predición da DF, sendo os modelos cun ano de adestramento e sen variables exóxenas (NHOYT) e o modelo con cinco anos de adestramento con variables exóxenas (NHFYT-CV) os que obtiveron un resultado significativamente superior. Estes resultados fan que non se poida determinar se o uso de variables exóxenas ou dun maior rango de adestramento resultan de utilidade, e son precisas probas máis amplas para poder determinalo.

	NHFYT	NHFYT-CV	NHOYT	NHOYT-CV	DI ↑	DI ↓	DF ↑	DF ↓	↑	↓
NHFYT		- ↓	- ↓	- -	0	0	0	2	0	2
NHFYT-CV	- ↑		- -	- ↑	0	0	2	0	2	0
NHOYT	- ↑	- -		- ↑	0	0	2	0	2	0
NHOYT-CV	- -	- ↓	- ↓		0	0	0	2	0	2

Táboa 4. Comparativa do rendemento das variantes do modelo N-HiTS

A táboa 5 presenta os resultados da comparativa emparellada intermodelo, na que se incluíron as configuracións de cada modelo que presentaron un mellor rendemento nas probas intramodelo.

O modelo Chronos, especialmente na variante *auto T5 base* (ATB), obtivo un rendemento superior ao resto de modelos, agás as variantes de N-HiTS (NHOYT e NHFYT-CV), coas que presenta un rendemento equivalente.

	ATB	ATL	ATM	ATS	ATT	DL	DS	NBFYT	NBOYT	NHFTT-CV	NHOYT	SL	DI ↑	DI ↓	DF ↑	DF ↓	↑	↓
ATB		↑ -	--	--	- ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ -	--	--	↑ ↑	6	0	5	0	11	0
ATL	↓ -		--	--	- ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ -	--	--	↑ ↑	5	1	5	0	10	1
ATM	--	--		--	--	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ -	--	--	↑ ↑	5	0	4	0	9	0
ATS	--	--	--		--	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ -	--	--	↑ ↑	5	0	4	0	9	0
ATT	- ↓	- ↓	--	--		↑ ↑	↑ ↑	↑ -	↑ -	--	--	↑ ↑	5	0	3	2	8	2
DL	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓		--	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	--	0	9	0	9	0	18
DS	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	--		↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	--	0	9	0	9	0	18
NBFYT	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ -	↑ ↑	↑ ↑		↑ -	↓ ↓	↓ -	↑ ↑	4	7	3	5	7	12
NBOYT	↓ -	↓ -	↓ -	↓ -	↓ -	↑ ↑	↑ ↑	↓ -		↓ -	↓ -	↑ ↑	3	8	3	0	6	8
NHFTT-CV	--	--	--	--	--	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ -		--	↑ ↑	5	0	4	0	9	0
NHOYT	--	--	--	--	--	↑ ↑	↑ ↑	↑ -	↑ -	--		↑ ↑	5	0	3	0	8	0
SL	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	--	--	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓		0	9	0	9	0	18

Táboa 5. Comparativa do rendemento dos mellores modelos avaliados

4. Conclusións e traballo futuro

Á vista dos resultados obtidos, pódese concluír que os modelos fundacionais *zero-shot* presentan un rendemento competitivo fronte aos modelos de referencia adestrados, alcanzando predicións fiables da MPS sen necesidade de axustes adicionais. Isto apoia a hipótese de partida de que a recente creación de modelos *zero-shot* para a predición de series temporais fai innecesario o adestramento ou axuste de modelos para a predición de niveis atmosféricos de pole.

Respecto á hipótese de que as melloras na predición de series temporais acadadas polos modelos de DL recentemente creados fai innecesario o uso de variables atmosféricas para a predición de niveis atmosféricos de pole, a conclusión que se obtivo é que os modelos *zero-shot* poden acadar un rendemento equivalente a modelos adestrados con variables exógenas. Non se puido avaliar se os propios modelos *zero-shot* se ven beneficiados polo uso deste tipo datos complementarios.

Este traballo constitúe tan só un primeiro paso na validación destas hipóteses, sendo preciso amplialo seguindo varias liñas de traballo que traten as súas limitacións. En primeiro lugar, debe terse en conta que neste traballo só se empregaron datos dun único taxon. Dado que o comportamento de polinización de cada taxa é diferente, as conclusións obtidas poden non ser extensibles a outros taxa. Deste modo, unha liña de traballo futuro sería estender a metodoloxía proposta aos outros taxa de pole, o que

permitiría comprobar a robustez e a capacidade de xeneralización dos modelos en distintos contextos aerobiolóxicos. O uso doutros taxa tamén permitiría traballar con modelos multivariados, capaces de predicir múltiples variables obxectivo simultaneamente, cos que se podería avaliar a influencia que os taxa de pole teñen entre si.

Neste traballo empregouse un único tamaño da xanela de contexto (un ano) para facer a predición. Porén, é posible que unha xanela de contexto maior poida achegar máis información útil para a predición, especialmente para os modelos *zero-shot*, ao permitir captar a variabilidade interanual. Deste xeito, outra liña de traballo futuro podería centrarse en determinar cal é o tamaño óptimo para a xanela de contexto.

De xeito similar, para os modelos adestrados empregáronse conxuntos de adestramentos de tamaño fixo (un e cinco anos) empregando só dos primeiros anos do conxunto de datos. En relación con isto, os resultados obtidos non foron concluíntes respecto á utilidade de usar un conxunto máis amplo ou máis curto. Ademais, fixar o conxunto de adestramento a só os anos iniciais pode resultar limitante, pois non capturaría unha posible deriva nas características das estacións polínicas debida a diversos factores (cambio climático, cambio da flora local etc.). A importancia destes factores poderíase estudar nunha liña que avalíase as variacións de rendemento a partir de distintos tamaños do conxunto de adestramento e ao uso dunha xanela corrediza para o conxunto de adestramento.

Tal e como se indicou previamente, no desenvolvemento do proxecto non foi posible a incorporación de variables exógenas nos modelos *zero-shot* empregados. Non obstante, a recente aparición de novas versións, como Chronos2 (Ansari *et al.*, 2025), que amplían as súas capacidades neste ámbito, abre a posibilidade de incorporar variables exógenas en futuros traballos, o que podería contribuír a mellorar o rendemento dos modelos e ampliar o alcance das análises realizadas.

Finalmente, outra posible liña de investigación futura consiste en avaliar o desempeño de modelos fundacionais preadestrados especificamente en dominios ambientais. A análise comparativa deste tipo de modelos con respecto aos enfoques empregados neste estudo podería achegar unha nova evidencia sobre o potencial dos modelos fundacionais especializados para a predición de fenómenos aerobiolóxicos.

5. Agradecementos

Este traballo foi financiado polo proxecto INOU25-10 da Deputación Provincial de Ourense e apoiado pola Consellería de Cultura, Educación e Universidade da Xunta de Galicia, no marco do programa de consolidación e estruturación de unidades de investigación competitivas do sistema universitario de Galicia (GRC-ED431C 2022/03).

6. Referencias

Ansari, A. F., Shchur, O., & Küken, J. (2025, octubre 20). *Introducing Chronos-2: From univariate to universal forecasting*. Amazon Science. <https://www.amazon.science/blog/introducing-chronos-2-from-univariate-to-universal-forecasting>

Ansari, A. F., Stella, L., Turkmen, C., Zhang, X., Mercado, P., Shen, H., Shchur, O., Rangapuram, S. S., Arango, S. P., Kapoor, S., Zschiegner, J., Maddix, D. C., Wang, H., Mahoney, M. W., Torkkola, K., Wilson, A. G., Bohlke-Schneider, M., & Wang, Y. (2024a). *Chronos: Learning the Language of Time Series* (arXiv:2403.07815). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.07815>

Astray, G., Amigo Fernandez, R., Fernandez Gonzalez, M., Dias-Lorenzo, D. A., Guada, G., & Rodriguez-Rajo, F. J. (2025). *Machine Learning to Forecast Airborne Parietaria Pollen in the North-West of the Iberian Peninsula*. <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/4/1528>

Astray, G., Fernández-González, M., Rodríguez-Rajo, F. J., López, D., & Mejuto, J. C. (2016). Airborne castanea pollen forecasting model for ecological and allergological implementation. *Science of The Total Environment*, 548-549, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.035>

Berezhanskiy, P. V., Mahmoudizheh, A., & Fakhri, Y. (2026). Pollen exposure and allergy risk: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Health Research*, 36(3), 554-568. <https://doi.org/10.1080/09603123.2025.2533354>

Challu, C., Olivares, K. G., Oreshkin, B. N., Ramirez, F. G., Canseco, M. M., & Dubrawski, A. (2023). NHITS: Neural Hierarchical Interpolation for Time Series Forecasting. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 37(6), 6989-6997. <https://doi.org/10.1609/aaai.v37i6.25854>

D'Amato, G., Murrieta-Aguttes, M., D'Amato, M., & Ansotegui, I. J. (2023). Pollen respiratory allergy: Is it really seasonal? *World Allergy Organization Journal*, 16(7), 100799. <https://doi.org/10.1016/j.waojou.2023.100799>

Dooley, S., Gurnoor, S. K., Mohapatra, C., Naidu, S., & White, C. (2023, noviembre 3). *ForecastPFN: Synthetically-Trained Zero-Shot Forecasting*. <https://arxiv.org/abs/2311.01933>

Galán, C., Ariatti, A., Bonini, M., Clot, B., Crouzy, B., Dahl, A., Fernandez-González, D., Frenguelli, G., Gehrig, R., Isard, S., Levetin, E., Li, D. W., Mandrioli, P., Rogers, C. A., Thibaudon, M., Sauliene, I., Skjoth, C., Smith, M., & Sofiev, M. (2017).

Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiologia*, 33(3), 293-295. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9496-0>

Glick, S., Gehrig, R., & Eeftens, M. (2021). Multi-decade changes in pollen season onset, duration, and intensity: A concern for public health? *Science of The Total Environment*, 781, 146382. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146382>

Holm, S. (1979). A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6(2), 65-70.

Iglesias-Otero, M. A., Fernández-González, M., Rodríguez-Caride, D., Astray, G., Mejuto, J. C., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2015). A model to forecast the risk periods of Plantago pollen allergy by using the ANN methodology. *Aerobiologia*, 31(2), 201-211. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9357-z>

Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (2012, abril 11). *Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis: Journal of the American Statistical Association: Vol 47, No 260*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1952.10483441>

Lea, C., Vidal, R., Reiter, A., & Hager, G. D. (2016). *Temporal Convolutional Networks: A Unified Approach to Action Segmentation* (arXiv:1608.08242). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1608.08242>

Liu, X., Liu, J., Woo, G., Aksu, T., Liang, Y., Zimmermann, R., Liu, C., Savarese, S., Xiong, C., & Sahoo, D. (2024). *Moirai-MoE: Empowering Time Series Foundation Models with Sparse Mixture of Experts* (arXiv:2410.10469). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.10469>

Lops, Y., Choi, Y., Eslami, E., & Sayeed, A. (2020). Real-time 7-day forecast of pollen counts using a deep convolutional neural network. *Neural Computing and Applications*, 32(15), 11827-11836. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04665-0>

Makra, L., Coviello, L., Gobbi, A., Jurman, G., Furlanello, C., Brunato, M., Ziska, L. H., Hess, J. J., Athanasios, D., García, M. P. P., Tusnády, G., Czibolya, L., Ihász, I., Deák, Á. J., Mikó, E., Dorner, Z., Harry, S. K., Bruffaerts, N., Packeu, A., ... Traidl-Hoffmann, C. (2024, julio 12). *Forecasting daily total pollen concentrations on a global scale—Makra—2024—Allergy—Wiley Online Library*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/all.16227>

Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). *On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other on JSTOR*. <https://www.jstor.org/stable/2236101?seq=1>

Navares, R., & Aznarte, J. L. (2016, septiembre 16). *Predicting the Poaceae pollen season: Six month-ahead forecasting and identification of relevant features* | *International Journal of Biometeorology* | Springer Nature Link. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-016-1242-8>

Nayak, G. H. H., Alam, M. W., Avinash, G., Kumar, R. R., Ray, M., Barman, S., Singh, K. N., Naik, B. S., Alam, N. M., Pal, P., Rathod, S., & Bisen, J. (2024). Transformer-based deep learning architecture for time series forecasting. *Software Impacts*, 22, 100716. <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2024.100716>

Noorunnahar, M., Chowdhury, A. H., & Mila, F. A. (2023, marzo 27). *A tree based eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) machine learning model to forecast the annual rice production in Bangladesh* | *PLOS One*. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0283452>

Oreshkin, B. N., Carпов, D., Chapados, N., & Bengio, Y. (2020). *N-BEATS: Neural basis expansion analysis for interpretable time series forecasting* (arXiv:1905.10437). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.10437>

Raffel, C., Shazeer, N., Roberts, A., Lee, K., Narang, S., Matena, M., Zhou, Y., Li, W., & Liu, P. J. (2020). Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer. *J. Mach. Learn. Res.*, 21(1), 140:5485-140:5551.

Rodríguez-Rajo, F. J., Aira, M. J., Fernández-González, M., Seijo, C., & Jato, V. (2011). Recent trends in airborne pollen for tree species in Galicia, NW Spain. *Climate Research*, 48, 281-291. <https://doi.org/10.3354/cr00966>

Scherrer, W., & Deistler. (2019). Vector autoregressive moving average models. En *Handbook of Statistics* (Vol. 41, pp. 145-191). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.host.2019.01.004>

Tasioulis, T., Karatzas, K., Charalampopoulos, A., Damialis, A., & Vokou, D. (s. f.). *Five ways to define a pollen season: Exploring congruence and disparity in its attributes and their long-term trends* | *Aerobiologia* | Springer Nature Link. Recuperado 31 de marzo de 2026, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10453-021-09735-2>

Valencia, J. A., Astray, G., Fernández-González, M., Aira, M. J., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2019). Assessment of neural networks and time series analysis to forecast airborne *Parietaria* pollen presence in the Atlantic coastal regions. *International Journal of Biometeorology*, 63(6), 735-745. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01688-z>

Zivot, E., & Wang, J. (2003). Vector Autoregressive Models for Multivariate Time Series. En E. Zivot & J. Wang (Eds.), *Modeling Financial Time Series with S-Plus®* (pp. 369-413). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-21763-5_11

Infraestrutura software para a reconstrución e exploración interactiva de imaxes de lámina completa a partir de capturas microscópicas manuais con artefactos estruturais

Iván Rodríguez-Conde

*Departamento de Informática, Escola Superior de Enxeñaría Informática (ESEI),
campus de Ourense. Universidade de Vigo*

ivarodriguez@uvigo.gal

Florentino Fernández-Riverola

*Departamento de Informática, Escola Superior de Enxeñaría Informática (ESEI),
campus de Ourense. Universidade de Vigo*

*Grupo de Investigación SING, Instituto de Investigación Sanitaria Galicia Sur
(IIS Galicia Sur), Sergas-UVigo*

riverola@uvigo.gal

Silvana Gómez-Meire

*Departamento de Informática, Escola Superior de Enxeñaría Informática (ESEI),
campus de Ourense. Universidade de Vigo*

*Grupo de Investigación SING, Instituto de Investigación Sanitaria Galicia Sur
(IIS Galicia Sur), Sergas-UVigo*

sgmeire@uvigo.gal

Rosalía Laza

*Departamento de Informática, Escola Superior de Enxeñaría Informática (ESEI),
campus de Ourense. Universidade de Vigo*

*Grupo de Investigación SING, Instituto de Investigación Sanitaria Galicia Sur
(IIS Galicia Sur), Sergas-UVigo*

rlaza@uvigo.gal

A adquisición de imaxes de lámina completa (WSI, do inglés *whole-slide imaging*) mediante escáneres dedicados continúa sendo inaccesible para numerosos laboratorios de investigación debido ao custo e á dependencia de hardware especializado. Aínda que a captura manual de teselas microscópicas constitúe unha alternativa viable fronte a esta barreira, reconstruír unha WSI coherente a partir destas adquisicións implica retos técnicos que as ferramentas abertas dispoñibles non son quen de resolver de forma integral: ausencia de metadatos espaciais, inconsistencias fotométricas e artefactos estruturais de grella que afectan ao rendemento dos algoritmos de aliñamento. Este traballo presenta unha infraestrutura software modular que trata eses retos como un fluxo único e automatizado, dende a captura das teselas en bruto ata a exploración interactiva da lámina reconstruída nun navegador estándar. O sistema articula a detección e a eliminación de artefactos de grella, o cosido mediante rexistro por correlación de fases, a xeración de pirámides multirresolución e a visualización web interactiva, todo iso con ferramentas de código aberto e sen requirimentos de hardware especializado. A validación sobre preparacións reais de hemocitómetro con mostras de mexillón confirma que o sistema produce reconstrucións con costuras imperceptibles e continuidade celular preservada ao longo de toda a lámina, cunha calidade suficiente tanto para a inspección visual coma para a análise computacional posterior.

Palabras clave: procesamento de imaxe biomédica, patoloxía dixital, imaxe de lámina completa, cosido de imaxes e artefactos de grella

1. Introducción

A dixitalización da microscopia histopatolóxica experimentou un crecemento notable durante a última década, impulsada polo desenvolvemento de tecnoloxías capaces de transformar preparacións histolóxicas tradicionais en imaxes dixitais de moi alta resolución. Este paradigma, coñecido como imaxe de lámina completa ou, polo seu termo en inglés máis estendido, *whole-slide imaging* (WSI), permite capturar a totalidade dun portaobxectos microscópico e almacenalo como unha imaxe navegable a múltiples niveis de aumento, transformando progresivamente o modo en que se adquire, almacena e analiza a información histolóxica [1]. Estudos de validación realizados en distintos contornos clínicos demostraron que a interpretación diagnóstica baseada nas WSI alcanza altos niveis de concordancia coa microscopia óptica convencional, superando o 95 % en moitos casos [2], o que apoiou a súa adopción progresiva en contornos clínicos e de investigación [3].

A dispoñibilidade destas imaxes dixitais de gran tamaño abriu a porta ao desenvolvemento da denominada patoloxía computacional, campo interdisciplinar que combina técnicas de visión por computador, aprendizaxe automática e análise de imaxes biomédicas co obxectivo de extraer información cuantitativa a partir de preparacións histolóxicas dixitalizadas [4, 5]. As WSI preservan tanto o contexto biolóxico global coma os detalles celulares a diferentes niveis de resolución espacial, o que as fai especialmente adecuadas para o desenvolvemento de ferramentas de detección, clasificación e caracterización de padróns histopatolóxicos. Plataformas de análise especializadas integran procesamentos en canle (máis coñecido polo termo inglés *pipelines*) para a extracción de teselas, procesamento automático e agregación de resultados a nivel de lámina completa, alcanzando niveis de rendemento comparables aos de expertos humanos en determinadas tarefas diagnósticas [6-8]. Con todo, estas ferramentas presupoñen como entradas WSI xa reconstruídas e en formato estándar, obviando o problema de como obter esa imaxe de partida cando non se dispón de escáner.

A maioría das WSI obtéñense mediante escáneres especializados. Estes sistemas automatizan a adquisición combinando óptica de alta precisión con mecanismos de posicionamento que capturan múltiples campos de visión e os ensamblan nunha única imaxe panorámica. Porén, non son tecnoloxicamente homoxéneos: a literatura documenta variacións substanciais entre plataformas en tempos de escaneo, taxas de erro e propiedades cromáticas das imaxes xeradas [9, 10], o que introduce dificultades adicionais para a interoperabilidade e para o desenvolvemento de *pipelines* robustos independentes do escáner. O custo elevado do hardware, a dependencia de solucións propietarias e as restricións asociadas aos seus ecosistemas software limitan, ademais, o acceso a este equipamento en numerosos contornos de investigación [5].

Como consecuencia, en moitos escenarios experimentais as imaxes microscópicas obtéñense mediante capturas manuais ou semiautomatizadas realizadas cun microscopio óptico convencional equipado cunha cámara dixital. Neste modelo de adquisición, cada captura corresponde a unha pequena rexión da preparación histolóxica, polo que é necesario adquirir múltiples imaxes parcialmente solapadas que posteriormente se combinan nun mosaico mediante técnicas de rexistro e ensamblado [11]. As capturas microscópicas manuais poden incorporar diferentes tipos de artefactos derivados do proceso de adquisición: variacións na iluminación, pequenas desviacións na posición do microscopio ou padróns estruturais superpostos á imaxe [9, 10]. A literatura sobre patoloxía dixital documenta de forma consistente problemas como rexións desenfocadas, pregaduras da mostra, inconsistencias cromáticas ou artefactos de escaneo como fontes relevantes de degradación da calidade das WSI [12-14]. A calidade da imaxe de partida determina a fiabilidade de todo o procesamento posterior.

Para tratar este problema, desenvolveuse unha infraestrutura software modular que resolve de forma integrada a reconstrución e exploración de imaxes de lámina completa a partir de coleccións de teselas microscópicas adquiridas manualmente. Concretamente, o sistema detecta e elimina os artefactos estruturais de grella antes do cosido, produce unha WSI coherente a partir das teselas corrixidas e fai o resultado accesible para a exploración interactiva desde un navegador estándar, sen requirir hardware especializado nin coñecementos de enxeñaría de software por parte do usuario.

O resto do capítulo desenvolve o problema e a solución en detalle. A sección 2 analiza os retos técnicos específicos que este problema presenta e as limitacións das ferramentas existentes. A sección 3 describe a arquitectura xeral da infraestrutura. As seccións 4, 5 e 6 detallan o *pipeline* de procesamento, a xeración e publicación da pirámide multirresolución e a exploración interactiva da WSI, respectivamente. A sección 7 presenta os resultados sobre datos reais e discute as limitacións do sistema. A sección 8 achega finalmente as conclusións e traza a axenda do traballo futuro.

2. Retos na reconstrución de lámina completa a partir de capturas manuais

A reconstrución dunha WSI a partir de capturas manuais non se reduce a un problema estándar de ensamblado de imaxes. Os algoritmos de rexistro explotan as correspondencias visuais entre rexións solapadas para estimar as transformacións que aliñan as teselas e xerar unha representación continua da lámina completa. Varios retos técnicos condicionan a calidade deste proceso.

O primeiro deriva da ausencia de metadatos espaciais explícitos nas capturas individuais: dado que o microscopio óptico convencional non rexistra a posición absoluta de cada campo de visión no plano da preparación, o sistema debe inferir as relacións espaciais entre teselas a partir da información visual contida nas imaxes. O enfoque habitual consiste en estimar o desprazamento relativo entre pares de capturas adxacentes mediante correlación de fases ou correlación cruzada normalizada sobre as rexións de solapamento [11]. A partir destas estimacións locais, algoritmos de optimización global (como os implementados en ferramentas de cosido especializadas como Ashlar [11]) calculan as transformacións de rexistro que minimizan o erro acumulado ao longo do mosaico completo e producen unha reconstrución espacialmente coherente.

Un segundo reto deriva das inconsistencias fotométricas entre capturas consecutivas. Variacións na iluminación do campo, desviacións na posición da lámpada ou flutuacións na exposición da cámara producen diferenzas de brillo e cromaticidade entre teselas

adxacentes que se manifestan como costuras visibles na imaxe reconstruída [9, 10]. Estas discontinuidades non só afectan á calidade visual da WSI, senón que tamén introducen variabilidade artificial nas características de cor que os modelos de análise computacional extraen das imaxes, o que pode degradar o rendemento de algoritmos de clasificación ou segmentación adestrados con datos adquiridos en condicións diferentes [13]. A corrección destas inconsistencias fotométricas, mediante técnicas de harmonización de cor ou normalización de intensidade aplicadas antes ou durante o proceso de cosido, constitúe polo tanto unha etapa relevante do *pipeline* de preprocesamento [12].

Un problema de natureza diferente, pero con consecuencias igualmente significativas para o proceso de reconstrución, é a presenza de padróns de grella superpostos á imaxe microscópica. En determinados sistemas de adquisición, retículas ou outros elementos de referencia do sistema óptico proxectan sobre o sensor estruturas lineais de alto contraste que se superpoñen á imaxe da mostra. Estas liñas, que forman un padrón regular de franxas horizontais e verticais cun período espacial determinado pola óptica do sistema, resultan especialmente visibles en rexións con baixo contido celular, onde o fondo claro da preparación amplifica o seu contraste aparente. Nalgúns zonas, o padrón artificial domina visualmente o sinal biolóxico subxacente, enmascarando as estruturas biolóxicas.

Os algoritmos de aliñamento baseados en correlación de fases identifican correspondencias entre imaxes mediante a detección de padróns visuais similares en rexións solapadas [11]. Cando as imaxes conteñen estruturas periódicas de alto contraste como as liñas dunha grella, a función de correlación presenta máximos espurios que o algoritmo pode interpretar como estimacións válidas do desprazamento entre teselas. O resultado son erros de aliñamento sistemáticos ou deriva espacial acumulada ao longo do mosaico, que se manifestan como discontinuidades abruptas ou deformacións na WSI reconstruída. Dependendo da densidade e do contraste da grella, estes erros poden afectar a rexións extensas da lámina, comprometendo a calidade da imaxe reconstruída [12, 15]. Este problema é máis pronunciado en preparacións con baixa densidade celular: nas rexións de solapamento onde o contido biolóxico é escaso, a correlación de fases opera en condicións próximas ás imaxes sen textura, nas que a relación entre o pico de sinal válido e os compoñentes espurios se degrada de forma significativa [16].

Ademais do seu impacto directo sobre o cosido, os artefactos de grella interfíren nas etapas posteriores de análise. Os sistemas de análise histopatolóxica dividen a WSI en teselas de tamaño fixo (habitualmente entre 256 e 512 píxeles) que se procesan por separado e se agregan para producir resultados para a lámina completa [7, 8]; calquera artefacto presente na imaxe reconstruída propágase así a múltiples teselas de análise.

Os modelos de visión por computador empregados en patoloxía dixital (tanto os baseados en características manuais coma os baseados en aprendizaxe profunda) están deseñados para identificar padróns morfolóxicos asociados a estruturas celulares e biolóxicas [8]. A presenza de liñas de alto contraste non relacionadas coa estrutura biolóxica actúa como ruído estruturado que pode activar detectores de bordo, orientación ou textura de forma espuria, degradando a precisión de tarefas como a segmentación de núcleos, a clasificación de áreas de interese ou a detección de mitoses [17]. Os estudos sobre control de calidade en patoloxía dixital mostran de forma reiterada que a presenza de artefactos degrada tanto a interpretación visual coma o rendemento de ferramentas de análise computacional, e que a súa detección e mitigación constitúe unha etapa necesaria dentro dos *pipelines* de procesamento de WSI [12, 15, 18-20].

A eliminación eficaz deste tipo de artefacto require resolver un problema de separación de sinal: distinguir as estruturas lineais artificiais das estruturas biolóxicas lineais reais presentes na mostra, como bordos celulares, fibras de coláxeno ou estruturas vasculares. Esta distinción resulta tecnicamente esixente, xa que ambos os tipos de estruturas comparten propiedades locais de orientación e contraste que os detectores de bordo ou de liñas convencionais non discriminan adecuadamente [12, 15]. As ferramentas de cosido dispoñibles, incluído Ashlar [11], non incorporan mecanismos nativos para este tipo de artefacto, e as plataformas de control de calidade existentes en patoloxía dixital, como HistoQC [18], están orientadas á exclusión de tiles problemáticos en WSI de escáner, non á corrección de padróns estruturais periódicos en mosaicos de adquisición manual.

Para tratar estes problemas de xeito conxunto, desenvolveuse unha infraestrutura software modular que implementa un *pipeline* completo de reconstrución e análise de imaxes de lámina completa a partir de teselas microscópicas adquiridas manualmente. As seccións seguintes describen a arquitectura desa infraestrutura e os seus compoñentes principais.

3. Arquitectura da infraestrutura

A infraestrutura organízase arredor dun núcleo de procesamento modular ao que se accede a través de dúas interfaces con roles distintos, tal e como mostra a figura 1. Esta separación entre núcleo e interfaces responde a unha decisión de deseño deliberada, orientada a facilitar a integración en contextos de uso distintos e garantir a reproducibilidade dos resultados.

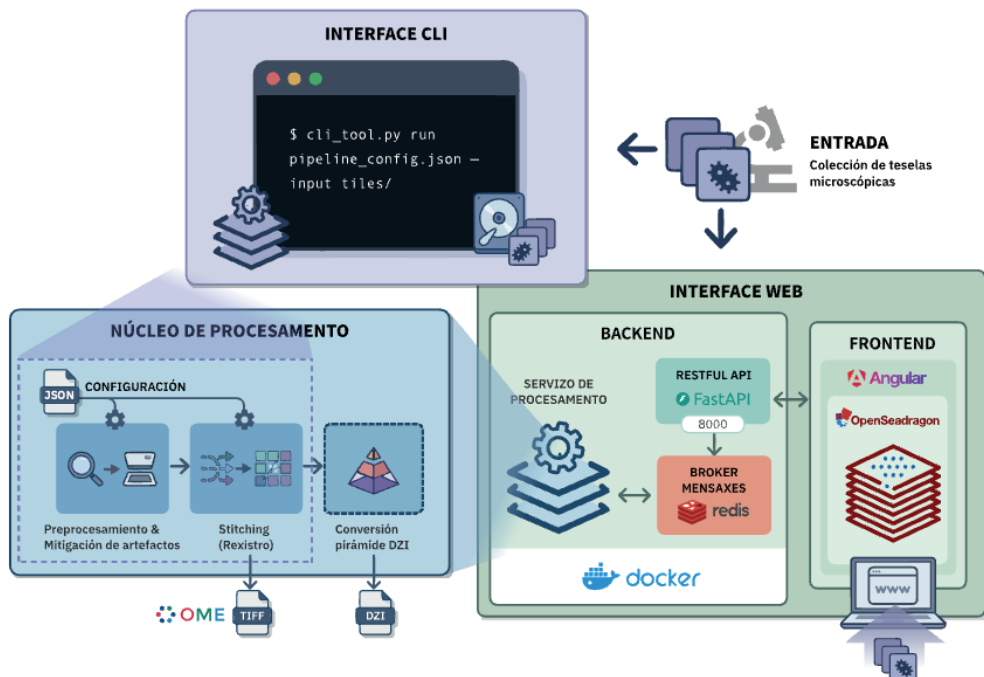


Figura 1. Diagrama arquitectónico da infraestrutura software, mostrando o núcleo de procesamento e as súas interfaces de acceso

3.1 O núcleo de procesamento

O núcleo é un *pipeline* configurable que transforma coleccións de teselas microscópicas en imaxes de lámina completa navegables. Estrutúrase como unha secuencia de pasos desacoplados que comparten un contexto de execución común, onde cada paso recibe datos, opera sobre eles e propaga os resultados ao seguinte. Esta arquitectura permite substituír ou estender calquera compoñente sen afectar ao resto, e fai que os resultados intermedios sexan inspeccionables en calquera punto do fluxo.

A primeira etapa realiza o preprocesamento e a mitigación de artefactos de grella; as teselas saneadas pasan á segunda etapa, o cosido, onde se ensamblan nunha única imaxe mediante un rexistro por correlación de fases. Isto produce un ficheiro OME-TIFF¹ que representa a lámina histolóxica completa. Dependendo da interface empregada, o *pipeline* pode continuar cunha terceira etapa de xeración da pirámide multirresolución DZI para a exploración web. As seccións 4 e 5 describen estas etapas en detalle.

¹ Open Microscopy Environment Tagged Image File Format: estándar aberto para o almacenamento de imaxes de microscopía multidimensional. Especificación dispoñible en <https://www.openmicroscopy.org>.

O comportamento do *pipeline* está determinado integramente por un ficheiro de configuración JSON que especifica os parámetros de cada etapa, entre eles as dimensións da grella, a taxa de solapamento, o tamaño de píxel e o método de binarización. Cambiar de microscopio ou de xeometría de adquisición non require modificar o código; é suficiente con editar ese único ficheiro. Esta capacidade garante que os resultados sexan reproducibles e que o *pipeline* se poida adaptar a novos escenarios sen coñecemento interno da implementación.

3.2 As interfaces de acceso

O núcleo de procesamento é accesible a través de dúas interfaces con propósitos distintos, unha orientada ao usuario final, a interface web, e outra á automatización e á interoperabilidade, a interface *headless*.

A interface web expón as capacidades do *pipeline* mediante unha arquitectura de tres capas. Un cliente Angular centraliza a carga de teselas e a visualización dos resultados, un *backend FastAPI* orquestra a submisión de traballos e o seguimento do seu estado, e un traballador Celery executa o *pipeline* en segundo plano de forma asíncrona. A elección deste modelo asíncrono responde á natureza do problema. O procesamento dunha WSI non se pode resolver dentro dun ciclo de petición web, polo que a única forma de manter o servidor responsivo baixo carga real é delegar a execución a un traballador en segundo plano. Desde a perspectiva do usuario, o fluxo resulta directo. O usuario carga as teselas, monitoriza o progreso e explora o resultado no visor unha vez o traballo conclúe. O cliente Angular, que integra o visor OpenSeadragon para a exploración interactiva da WSI, execútase de forma independente da pila Docker, mentres que o backend FastAPI, o traballador Celery e o broker Redis están empaquetados nun contedor, eliminando así a necesidade de intervención sobre as dependencias do sistema ao despregalo nun novo contorno.

A interface *headless*, á que nos referimos tamén como CLI (do inglés, *command-line interface*), expón o mesmo núcleo de procesamento a través da liña de comandos, o que permite integrar o *pipeline* en fluxos de traballo automatizados, executar procesamento por lotes sobre coleccións de datos, e incorporalo como compoñente dentro de infraestruturas de análise máis amplas. Neste modo, o sistema invoca o *pipeline* directamente, obtendo como saída o ficheiro OME-TIFF resultante en disco.

4. Pipeline de procesamento de imaxes

Transformar un conxunto de teselas microscópicas capturadas manualmente nunha lámina completa navegable implica resolver unha cadea de problemas interdependentes: estandarizar representacións heteroxéneas, detectar e eliminar artefactos estruturais sen degradar o contido biolóxico, estimar desprazamentos relativos con precisión subpíxel e xerar unha representación multirresolución eficiente para a exploración web. Esta sección describe como o *pipeline* trata cada un deses problemas, en orde de execución, detallando as decisións de deseño que xustifican a formulación de cada etapa e as dependencias que as conectan.

4.1 Preprocesamento inicial

Antes de calquera análise estrutural, as teselas convértense a escala de grises para normalizar a representación, reducir a dimensionalidade dos datos e satisfacer os requisitos de compatibilidade de formato de Ashlar [11]. As etapas posteriores de binarización e detección operan exclusivamente sobre a estrutura de luminancia, polo que esta conversión é un paso previo indispensable.

A binarización presenta, con todo, un reto de maior complexidade. A limiarización global estándar produce resultados inconsistentes cando o contido das teselas é heteroxéneo, dado que as rexións con alta densidade celular exhiben distribucións de intensidade distintas das rexións escasas ou baleiras, e un único limiar non segrega a estrutura da grella de forma fiable en todo o rango dinámico. O *pipeline* ofrece seis estratexias de binarización configurables para adaptarse a distintas condicións de adquisición: limiarización global con valor fixo, umbralización adaptativa baseada en estatísticas locais de veciñanza, multi-Otsu con partición en múltiples clases de intensidade, detección de estruturas lineais mediante *kernels* direccionais, refinamento morfolóxico posterior a Otsu, e o método combinado diferencial, que é a estratexia de produción. Este último aplica limiarización multi-Otsu [21] e explota as respostas diferenciais entre orientacións para realzar estruturas lineais e suprimir contido celular e textural. As estratexias alternativas permiten adaptar o *pipeline* a condicións de adquisición onde as propiedades fotométricas da grella ou da mostra difiran das asumidas polo método de produción.

4.2 Detección, refinamento e xeración de máscaras

A detección de liñas de grella baséase en *template matching* mediante a diferenza cuadrática normalizada, que mide o erro cadrado entre o *template* e cada rexión da imaxe, normalizado polo tamaño do *template*. Valores de resposta próximos a cero indican unha coincidencia alta co *template*, mentres que valores próximos a un indican non coincidencia. Un píxel detéctase como liña se o seu valor de resposta é inferior ao limiar configurado (por defecto 0,1 sobre o rango $[0,1]$). O *matching* execútase en paralelo sobre un conxunto de *templates*, un por ángulo de inclinación obxectivo (por defecto $\pm 2^\circ$), e os mapas de resposta combínanse tomando o mínimo píxel a píxel, de forma que se detectan liñas lixeiramente inclinadas sen requirir *templates* separados para cada variante angular. A detección opera de forma independente sobre as compoñentes horizontais e verticais da grella, xa que disociar ambos os eixes mellora a robusteza da localización.

O principal reto da detección é a discriminación entre os trazos artificiais da grella e os elementos biolóxicos lineais presentes na mostra, como membranas celulares, fibras de coláxeno ou estruturas vasculares. As propiedades xeométricas locais destes elementos son suficientemente similares ás das liñas de grella para que un detector baseado exclusivamente en características locais non poida distinguiilos con fiabilidade. O *pipeline* resolve esta ambigüidade mediante un proceso de refinamento en dúas fases.

Na primeira fase, aplícase un filtrado baseado en tres criterios: área mínima de contorno, restrición de zona de bordo segundo a estratexia de detección configurada, e clasificación mediante un modelo de aprendizaxe automática preadestrado que avalía cada contorno a partir de características xeométricas como área, razón de aspecto e proximidade a esquinas e bordos. Dos contornos que superan o limiar do clasificador, fixado por defecto en 0,5, só se conserva o de maior probabilidade. Na segunda fase, os contornos seleccionados reciben axustes xeométricos: o ángulo corríxese ao valor obxectivo configurado cando a desviación está dentro da tolerancia, e o grosor axústase de forma simétrica na estratexia xeral ou asimétrica nas estratexias de bordo, onde o 90 % do incremento se aplica cara ao bordo da tesela. Cando a estratexia xeral produce múltiples contornos, estes fúndense calculando o *convex hull* do conxunto de puntos combinado.

Das deteccións refinadas xérase unha máscara binaria que identifica a nivel de píxel as rexións ocupadas polo artefacto. Cada segmento dilátase para cubrir o grosor físico das liñas e engádese unha marxe de seguridade que compensa imprecisións residuais nas deteccións. Máscaras excesivamente amplas eroden contido celular adxacente, mentres que máscaras insuficientes deixan estrutura residual nos bordos das teselas, onde reaparece como artefacto na WSI cosida.

4.3 Eliminación de artefactos e cosido

Cunha máscara precisa para cada tesela, o *pipeline* aplica *inpainting* sobre as imaxes orixinais en cor mediante LaMa [22], un modelo xerativo baseado en convolucións no dominio de Fourier deseñado para a reconstrución de rexións de gran tamaño. As liñas de grella presentan un grosor aproximado de 21 píxeles á resolución de adquisición empregada e percorren a tesela na súa totalidade. Nesas condicións, a interpolación simple non reconstrúe textura biolóxica coherente, e as convolucións de LaMa no dominio de Fourier, ao capturar dependencias estruturais de longo alcance, producen reconstrucións que manteñen a continuidade textural a través das rexións suprimidas. O *inpainting* non ten como obxectivo a fidelidade histolóxica do contido reconstruído, senón a neutralización dos artefactos de alto contraste que perturbarían a estimación de desprazamentos por correlación de fases. Esta etapa opera sobre as imaxes orixinais en cor, preservando así a información cromática necesaria para a harmonización fotométrica durante o cosido e para a análise computacional posterior, dado que as etapas anteriores son auxiliares, orientadas exclusivamente á construción da máscara.

A reconstrución final delégase en Ashlar [11], que executa o proceso en dous pasos: estimación dos desprazamentos relativos entre pares de teselas adxacentes mediante correlación de fases, seguida dunha optimización global que minimiza o erro acumulado ao longo do mosaico. Así, obtense como resultado un ficheiro OME-TIFF que representa a lámina histolóxica completa. Ashlar presupón que as rexións de solapamento conteñen un sinal fiable para a correlación, e a estrutura periódica de alto contraste das liñas de grella xera, sen eliminación previa, picos de correlación falsos e teselas desaliñadas. O *pipeline* de preprocesamento ten como función garantir que esa presunción se satisfaga. Os parámetros de Ashlar forman parte do ficheiro de configuración JSON descrito na sección 3, suficiente para adaptar a xeometría de adquisición sen modificar o código.

5. Xeración e publicación de imaxes de lámina completa

O ficheiro OME-TIFF producido por Ashlar é unha imaxe de varios gigapíxeles, con dimensións que poden alcanzar decenas de miles de píxeles en cada eixe. A transmisión dese volume de datos a resolución completa é inviable nun contexto web de uso xeral, e a súa renderización íntegra requiriría recursos de memoria e procesamento gráfico fóra do alcance de calquera cliente web convencional. Os formatos propietarios dos escáneres comerciais resolven este problema mediante software cliente específico, pero ao custo de introducir unha dependencia tecnolóxica que comprometería a integración con *pipelines*

de procesamento abertos e trasladaría ao software de visualización as mesmas restricións que esta infraestrutura trata de evitar no hardware. A entrega eficiente require, polo tanto, unha estratexia de *streaming* de teselas multirresolución baseada en estándares abertos.

5.1 O formato Deep Zoom Image

O *pipeline* emprega o formato Deep Zoom Image (DZI) para a entrega progresiva da WSI ao navegador. DZI organiza a imaxe como unha pirámide de niveis de resolución, onde no nivel máis baixo a lámina completa represéntase cun número reducido de teselas e no nivel máis alto cada tesela corresponde a unha pequena rexión espacial da imaxe a resolución completa.

A estrutura dun ficheiro DZI é autosuficiente, composta por un documento XML que especifica as dimensións da imaxe, o tamaño das teselas e o número de niveis da pirámide, acompañado dunha xerarquía de directorios que contén as teselas organizadas por nivel e por posición. Esta organización fai que DZI sexa simple de xerar, servir e consumir nunha infraestrutura web estándar. A elección responde a tres criterios: é un formato aberto, non require software de servidor especializado, e está soportado nativamente por OpenSeadragon, o visor empregado na interface web descrita na sección 6.

5.2 Xeración, entrega e xestión de traballos

A conversión do OME-TIFF a DZI realízase mediante *libvips* [23], concretamente mediante o comando *vips dzsave*. Esta operación le a imaxe a resolución completa, reduce a mostraxe en niveis sucesivos, divide cada nivel en teselas de tamaño fixo e escribe a pirámide completa en disco. *libvips* procesa as imaxes en modo *streaming*, sen materializar o ficheiro completo en memoria, propiedade determinante cando se traballa con imaxes de varios gigabytes.

O traballador Celery desencadea a xeración DZI como último paso do *pipeline*, inmediatamente despois de que Ashlar complete o cosido. A pirámide resultante sérvese a través do backend FastAPI como un directorio de ficheiros estáticos accesibles mediante HTTP estándar. O cliente Angular constrúe a URL do descritor DZI e proporciónallaa ao visor, que se encarga de xestionar a solicitude de teselas segundo o nivel de zoom e a posición do *viewport*, sen necesidade de *middleware* propietario. O fluxo completo, desde a carga das teselas ata a apertura da WSI no navegador, non require ningún paso manual intermedio.

6. Exploración interactiva

A pirámide DZI xerada na etapa descrita na sección 5 sèrvese ao navegador a través do visor web, que constitúe o punto de acceso final ao resultado do *pipeline*. Un investigador que iniciou o proceso cunha colección de teselas microscópicas afectadas por artefactos de grella dispón, tras o procesamento automático, dunha imaxe de lámina completa navegable nun navegador estándar, sen dependencia de software propietario nin de licenzas especializadas. Esta capacidade ten implicacións directas para a análise: a un nivel de aumento baixo, a arquitectura da mostra é visible na súa globalidade, coa distribución de poboacións celulares, os límites entre rexións e a morfoloxía xeral; a un nivel de aumento elevado, as células individuais son resolubles, con morfoloxía nuclear, padróns de tinguidura e figuras mitóticas. A análise histopatolóxica require acceder a ambos os niveis de forma integrada [8, 17], e para aplicacións de microscopia cuantitativa como o recuento celular, a capacidade de navegar cara a rexións específicas a resolución completa e contrastar o detalle local coa estrutura global é un requisito funcional.

OpenSeadragon [24] é o compoñente que satisfai ese requisito. Trátase dun visor de código aberto baseado en JavaScript deseñado para a navegación profunda de imaxes de gran tamaño, que renderiza a pirámide DZI servida polo *backend* solicitando unicamente as teselas necesarias para o *viewport* actual ao nivel de resolución axeitado. As teselas teñen un tamaño fixo de 256×256 píxeles con 1 píxel de solapamento e son servidas en formato JPEG, parámetros establecidos durante a xeración da pirámide. A medida que o usuario se despraza ou cambia o zoom, o visor recupera as teselas visibles baixo demanda, mantendo ata 200 teselas en caché en memoria e renderizando progresivamente de baixa a alta resolución mediante transicións de 100 ms, o que mantén a coherencia visual da imaxe aínda que só unha fracción dela estea cargada en cada momento. O rendemento da navegación é independente do tamaño total da imaxe, xa que a abstracción de pirámide desacopla o rendemento de renderizado da escala da imaxe.

A integración entre o *frontend* Angular e OpenSeadragon realízase a través da URL do descriptor DZI, construída a partir do identificador do traballo e servida como ficheiro estático polo *backend* FastAPI. OpenSeadragon configúrase para axustar automaticamente a imaxe ao contedor ao cargar, garantindo que polo menos o 50 % da imaxe permaneza visible durante o desprazamento. O zoom mínimo impide que a imaxe se reduza a menos do 90 % do *viewport*, mentres que o zoom máximo non ten límite superior explícito, de forma que o usuario pode ampliar ata a resolución orixinal de adquisición.

Desde a perspectiva do usuario, a interface traduce ese comportamento técnico nunha experiencia de navegación continua. Tras a conclusión dun traballo, o visor cárgase automaticamente e presenta a WSI a nivel de visión xeral. O usuario pode desprazarse mediante clic e arrastre, ampliar con rato ou xesto de pinza, e alcanzar calquera rexión da lámina ata o máximo nivel de detalle dispoñible. A interface inclúe controis de zoom, transicións animadas entre niveis e unha miniatura de contexto que indica a rexión visible dentro da lámina completa, elemento especialmente útil cando o nivel de aumento é elevado, onde a rexión visible representa unha fracción mínima da área total. A entrega baseada en web permite ademais o acceso ao resultado por URL, de forma que un colaborador noutra institución pode explorar a mesma lámina no navegador sen necesidade de descargar ningún ficheiro, o que facilita a circulación dos resultados entre grupos de investigación.

7. Resultados e discusión

A validación do sistema realízase sobre preparacións reais de hemocitómetro de hemocitos de mexillón, condicións que combinan un padrón de grella de alto contraste cunha densidade celular variable, o que permite avaliar o comportamento do *pipeline* nun escenario representativo das dificultades descritas nas seccións anteriores.

7.1 Datos de adquisición

As mostras corresponden a hemocitos de mexillón (*Mytilus* sp.) en suspensión celular depositadas sobre unha cámara de reconto con retícula. As imaxes foron adquiridas nun microscopio de fluorescencia de campo amplo Leica DMI6000 (sistema AF 6000 LX) cunha cámara Hamamatsu ORCA-R2 e un obxectivo seco 10×/0.40, en modo de campo claro. Cada tesela ten 1344×1024 píxeles cun tamaño físico de píxel de 630 nm, o que sitúa o campo de visión de cada captura en aproximadamente 846×644 μm . A colección completa comprende 686 posicións de tesela distribuídas nunha grella de 14×49 campos, cunha fracción de solape do 10 % entre capturas adxacentes. A adquisición durou aproximadamente 91 minutos.

O patrón de grella da retícula proxéctase sobre as teselas como liñas de alto contraste dun grosor aproximado de 21 píxeles, cunha desviación angular de arredor de 2 graos respecto aos eixes da imaxe. A densidade celular é escasa en boa parte da preparación, o que amplifica o contraste aparente das liñas en rexións de fondo e agrava o seu impacto sobre os algoritmos de aliñamento baseados en correlación de fases.

7.2 Transformación paso a paso

Antes de calquera procesamento, as teselas presentan o padrón de grella da retícula como franxas horizontais e verticais de alto contraste que percorren a imaxe na súa totalidade, dominando as rexións con baixo contido celular e superpoñéndose ás estruturas biolóxicas nas rexións máis densas (figura 2). Baixo estas condicións, os algoritmos de aliñamento producen erros sistemáticos e deriva espacial acumulada ao longo do mosaico, o que motiva o preprocesamento descrito na sección 4.

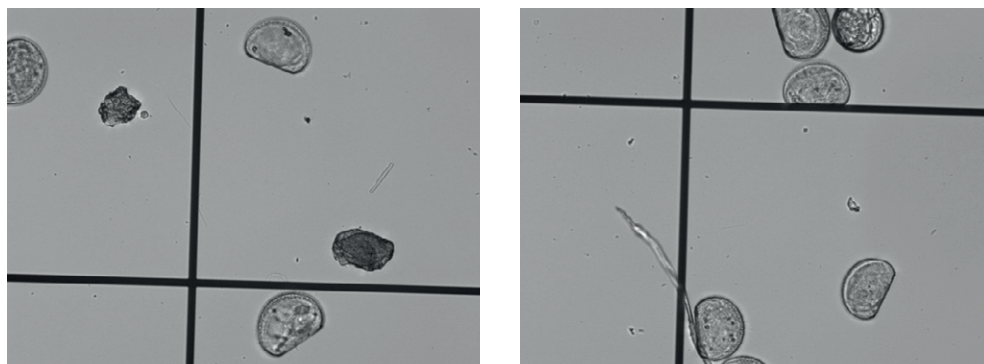


Figura 2. Teselas representativas da colección de entrada antes de calquera procesamento

O método combinado diferencial illa as liñas de grella como estruturas negras nítidas sobre fondo branco, suprimindo sistematicamente o contido celular e textural (figura 3). Esta representación binarizada constitúe a entrada do detector de liñas e reflicte a capacidade do método para separar o sinal artificial do contido biolóxico antes de calquera operación de localización.

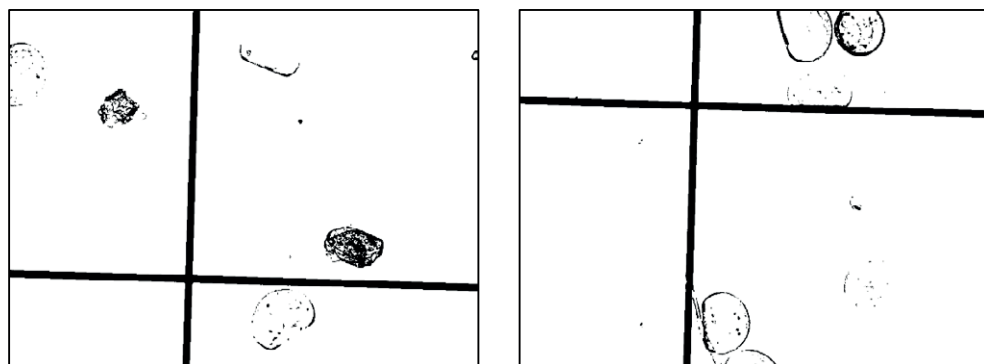


Figura 3. Resultado da binarización mediante o método combinado diferencial sobre as teselas da figura 2

A etapa de detección e refinamento produce segmentos que se axustan á posición real das estruturas artificiais detectadas, sen respostas espurias asociadas a bordos celulares ou fibras biolóxicas (figura 4). A ausencia de falsas deteccións confirma que o refinamento mediante o clasificador de aprendizaxe automática resolve con eficacia a ambigüidade xeométrica entre o artefacto e os elementos biolóxicos lineais descrita na sección 4.2.

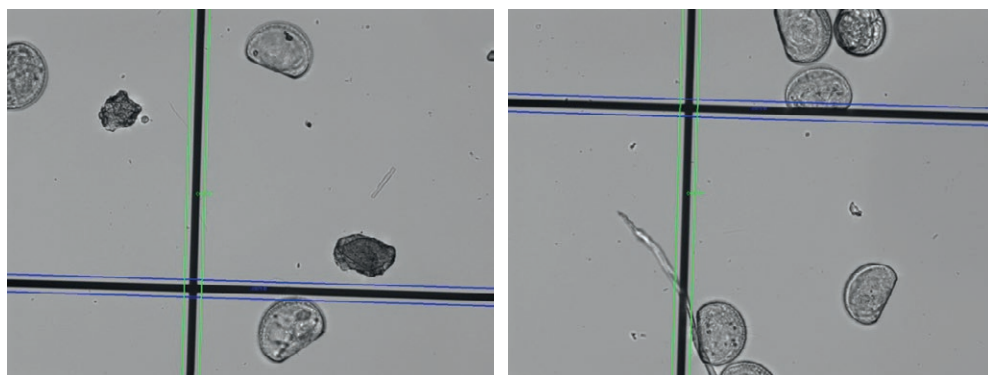


Figura 4. Saída da etapa de detección e refinamento superposta sobre as teselas orixinais. Os segmentos detectados localizan as liñas de grella sen respostas espurias asociadas a estruturas biolóxicas

A partir das deteccións refinadas xérase unha máscara binaria que identifica a nivel de píxel as rexións ocupadas polas liñas de grella, dilatadas para cubrir o seu grosor físico (figura 5). A máscara define con precisión onde o modelo xerativo debe reconstruír textura biolóxica e onde debe preservar o contido orixinal, e a súa calidade condiciona o resultado do *inpainting* e do cosido posterior.

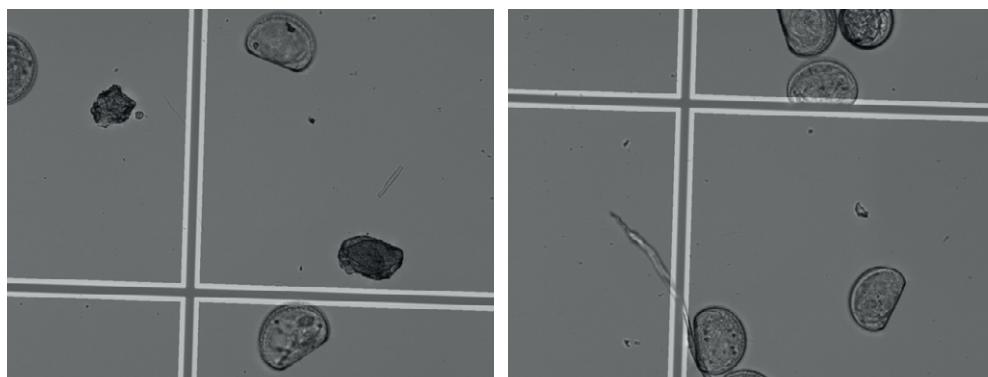


Figura 5. Máscaras binarias xeradas a partir das deteccións refinadas, superposta sobre as teselas orixinais

Nas rexións onde a grella dominaba o sinal, o *inpainting* mediante LaMa reconstrúe textura biolóxica plausible sen deixar artefactos de bordo nin discontinuidades visibles (figura 6). As liñas desaparecen e a tesela resultante non contén a estrutura periódica que perturbaba a correlación de fases nas rexións de solapamento. O criterio de éxito desta etapa non é a fidelidade histolóxica do contido reconstruído, senón a neutralización dos artefactos de alto contraste que comprometían o aliñamento.

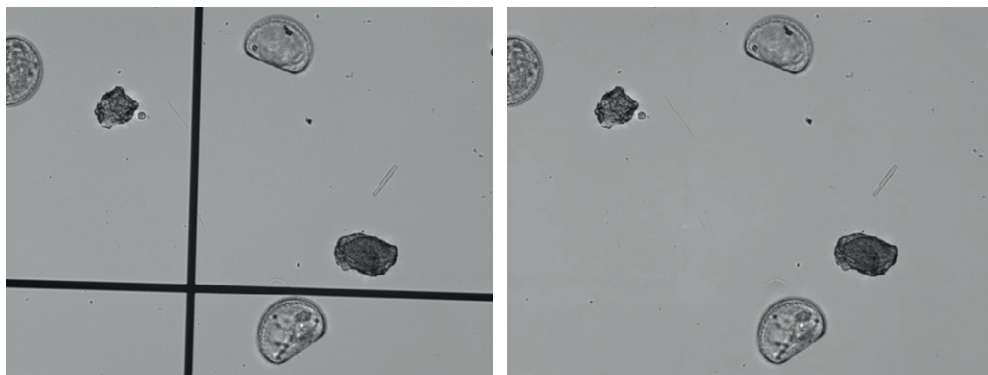


Figura 6. Tesela orixinal (esquerda) e tesela corrixida tras o inpainting mediante LaMa (dereita)

O cosido sobre as teselas corrixidas produce a WSI completa. A coherencia xeométrica é perceptible ao longo de toda a extensión do mosaico, onde as unións entre teselas non presentan discontinuidades abruptas nin deriva acumulada que deforme a estrutura da preparación. A continuidade da mostra e a consistencia fotométrica mantéñense ao longo de toda a lámina. A comparación cun cosido sen eliminación previa de artefactos, ilustrada na figura 7, fai explícita a contribución do preprocesamento, pois as unións entre teselas presentan desaliñamentos e artefactos de costura que comprometen a coherencia global, mentres que con eliminación de artefactos esas unións son imperceptibles en visión xeral e revelan unicamente a estrutura celular subxacente a un nivel de aumento elevado.

A WSI reconstruída é explorable no visor web a calquera escala, desde a visión xeral da lámina completa ata o detalle celular a alto aumento. En visión xeral, a distribución espacial das poboacións celulares e a coherencia xeométrica do mosaico son perceptibles na súa totalidade. A alto aumento, as estruturas celulares individuais son distinguibles con suficiente nitidez para a inspección visual e a análise computacional posterior

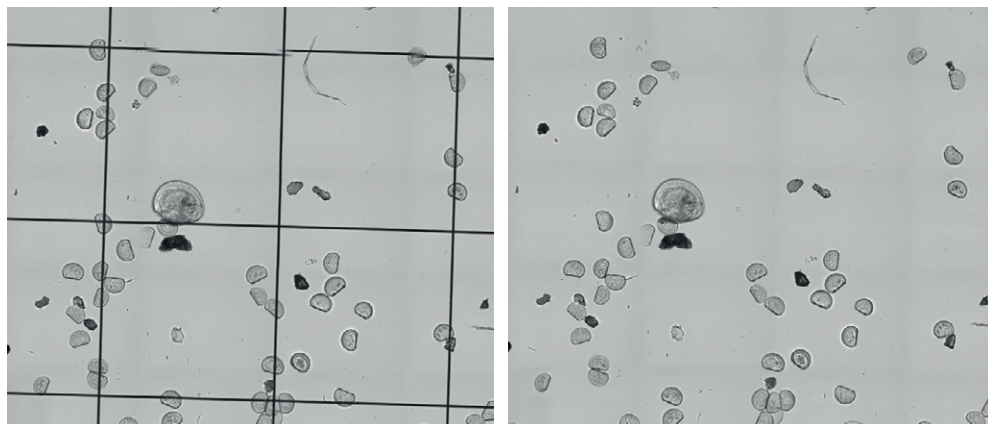


Figura 7. Fragmento representativo da WSI reconstruída (dereita) e cosido equivalente sen eliminación previa de artefactos (esquerda)

7.3 Limitacións

Tomados en conxunto, os resultados mostran que o sistema produce reconstrucións de calidade suficiente para as condicións de adquisición para as que foi desenvolvido. A eliminación de artefactos de grella é efectiva onde o padrón é claro e a desviación angular está dentro do rango esperado. O principal artefacto observable na WSI reconstruída é un efecto de *ghosting* nas rexións de solapamento entre teselas adxacentes, manifestado como bordos duplicados ou halos difusos ao redor das estruturas celulares (figura 8). Este efecto deriva dunha estimación de desprazamento subóptima por correlación de fases, atribuíble á insuficiente consistencia posicional do protocolo de captura empregado, e non a unha limitación intrínseca do algoritmo de cosido.



Figura 8. Efecto de *ghosting* na WSI reconstruída. Detalle a alto aumento dunha rexión de solapamento entre teselas adxacentes onde son visibles bordos duplicados e halos difusos ao redor das estruturas celulares, consecuencia dunha estimación de desprazamento subóptima por correlación de fases

Máis aló das condicións de adquisición, catro aspectos estruturais condicionan o ámbito de aplicación do sistema e marcan a fronteira entre o que xa resolve e o que permanece como traballo futuro.

O detector de grella foi desenvolvido e validado para un padrón específico (liñas dun grosor aproximado de 21 píxeles cunha desviación angular de arredor de 2 graos). Un investigador que traballe cun microscopio diferente, cunha retícula de período distinto ou cunha orientación máis pronunciada, pode obter resultados degradados sen que o sistema emita ningún aviso. A adaptación require reaxuste manual de parámetros e coñecemento interno do procesamento en canle empregado, sen ningún mecanismo que oriente o usuario nese proceso. O sistema asume que o padrón de grella é coñecido e estable, pero en condicións reais de laboratorio a grella pode variar entre sesións de adquisición, entre obxectivos ou mesmo entre rexións da mesma preparación se o plano focal non é uniforme.

O sistema require ademais que o usuario especifique explicitamente as dimensións da grella, a fracción de solapamento, a dirección de escaneo e o tamaño de píxel. Cando esa información é incorrecta ou incerta, o *pipeline* produce reconstrucións desaliñadas sen saída diagnóstica que axude a identificar a causa. Esta limitación reflicte que o sistema foi deseñado para usuarios con coñecemento técnico do seu equipamento. Para un investigador sen ese coñecemento, a relación entre os parámetros de configuración e a calidade do resultado non é directa sen experiencia previa.

O *pipeline* totalmente automático constitúe unha vantaxe na maioría dos casos, pero implica que un investigador que detecta costuras visibles, teselas desaliñadas ou artefactos residuais non pode intervir sobre os resultados intermedios. A única opción dispoñible é modificar parámetros e relanzar o *pipeline* completo, sen posibilidade de determinar se o problema deriva da detección, do *inpainting* ou do cosido. En coleccións grandes, onde o procesamento completo pode durar varios minutos, esta limitación ten un custo operativo significativo.

O ámbito de aplicación demostrado está igualmente circunscrito a preparacións de hemocítometro de hemocitos de mexillón adquiridas en condicións controladas, e non se coñece o grao en que os resultados se xeneralizan a outros tipos de espécimes, protocolos de tinguidura, densidades celulares ou configuracións de microscopio distintas das empregadas no desenvolvemento. A patoloxía dixital e a microscopia cuantitativa abranguen un espectro amplo de tipos de mostra como seccións de tecido embebido en parafina, preparacións en fresco, tinguiduras histoquímicas estándar e marcaxe fluorescente multicanal [1]. Cada combinación introduce propiedades de imaxe distintas que poden afectar tanto á visibilidade do artefacto de grella coma ao rendemento do *inpainting*.

8. Conclusións e traballo futuro

O sistema desenvolto demostra que a reconstrución de imaxes de lámina completa a partir de capturas microscópicas manuais con artefactos de grella é un problema resoluble con ferramentas abertas e sen hardware especializado. Os resultados sobre os datos de adquisición descritos na sección anterior confirman que a infraestrutura produce reconstrucións de calidade suficiente para a inspección visual e a análise computacional posterior. O traballo achega dúas contribucións complementarias: o tratamento da mitigación de artefactos de grella como un problema de separación de sinal que require métodos específicos, e a integración nun único fluxo automatizado de etapas que polo común se tratan por separado. O resultado, demostrado sobre datos reais, é unha WSI navegable sen dependencia de software propietario.

As limitacións descritas na sección 7.4 trazan a axenda do traballo futuro en catro fronteos concretos.

A robustez do detector requiriría un enfoque que estimase as propiedades do padrón de grella directamente a partir dos datos de cada sesión, sen presupor configuración previa. Un detector adaptativo debería funcionar en condicións onde o padrón é parcialmente visible, onde a densidade celular enmascara as liñas en rexións extensas, ou onde a rotación acumulada supera o rango para o que o sistema actual foi calibrado. A dirección máis xeneralizable pasaría por un enfoque de detección baseado na aprendizaxe adestrada sobre un conxunto diverso de configuracións de grella e tipos de mostra, o que requiriría construír previamente un corpus de datos anotados suficientemente representativo.

A accesibilidade para usuarios con menor experiencia técnica requiriría non só inferencia automática de parámetros de adquisición, senón tamén unha capa de validación que detectase configuracións probablemente incorrectas antes de lanzar o procesamento. O sistema precisaría unha capa de diagnóstico que traducise os erros de alíñamento en suxestións accionables, que informara o usuario de que parámetro é probablemente incorrecto e que rango de valores é razoable para o seu equipamento. Sen esa capa, a inferencia automática de parámetros reduciría a fricción pero non eliminaría a opacidade.

A capacidade de intervención melloraría cunha interface de curación integrada na plataforma web que permitise revisar resultados por etapa e desencadear reprocesamento selectivo antes do cosido final. O obxectivo non sería converter o sistema nun fluxo manual, senón ofrecer un nivel de transparencia que lle permitise ao usuario localizar rapidamente a orixe dun problema e corrixilo sen reexecutar etapas que xa produciron resultados correctos. Esa transparencia sería ademais un requisito para a mellora iterativa

do sistema, pois sen visibilidade sobre os resultados intermedios sería difícil identificar sistematicamente onde o *pipeline* falla e por que.

A transferibilidade entre tipos de mostra é a limitación de máis difícil cuantificación, precisamente porque depende de condicións que o sistema actual non foi deseñado para afrontar. As preparacións de hemocitómetro ofrecen un escenario favorable: fondo uniforme, densidade celular moderada e padrón de grella de alto contraste. Noutros contextos habituais na patoloxía dixital, como seccións de tecido embebido en parafina con tinguiduras de hematoxilina e eosina, o fondo é máis complexo, a densidade celular máis alta e as estruturas lineais biolóxicas máis prominentes. Tratar eses escenarios requiriría validar o sistema en condicións substancialmente distintas das empregadas no presente traballo. Caracterizar eses límites sistematicamente, máis aló dun exercicio de validación, sería o paso necesario para construír unha versión do sistema que respondese ás necesidades dun espectro máis amplo da comunidade de microscopia cuantitativa.

Agradecementos

Este traballo foi financiado pola Deputación Provincial de Ourense a través do proxecto INOU25-11 titulado *Ferramenta para o recuento celular en imaxes de microscopia baseado en aprendizaxe profunda, cun fluxo de traballo optimizado mediante cosido de imaxes automático e curación interactiva de resultados*.

Referencias

- [1] F. Ghaznavi, A. Evans, A. Madabhushi y M. Feldman. Digital imaging in pathology: whole-slide imaging and beyond. *Annu Rev Pathol*, 8:331–59, 2013. doi: 10.1146/annurev-pathol-011811-120902.
- [2] A. L. D. Araújo, L. P. A. Arboleda, N. R. Palmier, J. M. Fonsêca, M. De Pauli Paglioni, W. Gomes-Silva, A. C. P. Ribeiro, T. B. Brandão, L. E. Simonato, P. M. Speight, F. P. Fonseca, M. A. Lopes, O. P. De Almeida, P. A. Vargas, C. C. Madrid Troconis y A. R. Santos-Silva. The performance of digital microscopy for primary diagnosis in human pathology: a systematic review. *Virchows Arch*, 474(3):269–287, 2019. doi: 10.1007/s00428-018-02519-z.
- [3] A. J. Evans, R. W. Brown, M. M. Bui, E. A. Chlipala, C. Lacchetti, D. A. Milner, L. Pantanowitz, A. V. Parwani, K. Reid, M. W. Riben, V. E. Reuter, L. Stephens, R. L. Stewart y N. E. Thomas. Validating Whole Slide Imaging Systems for Diagnostic Purposes in Pathology. *Arch Pathol Lab Med*, 146(4):440–450, 2022. doi: 10.5858/arpa.2020-0723-CP.

[4] Z. E. Khene, S. F. Kammerer-Jacquet, P. Bigot, N. Rabilloud, L. Albiges, V. Margulis, R. De Crevoisier, O. Acosta, N. Rioux-Leclercq, Y. Lotan, M. Rouprêt y K. Bensalah. Clinical Application of Digital and Computational Pathology in Renal Cell Carcinoma: A Systematic Review. *Eur Urol Oncol*, 7(3):401–411, 2024. doi: 10.1016/j.euo.2023.10.018.

[5] P. J. Schüffler, L. Geneslaw, D. V. K. Yarlagadda, M. G. Hanna, J. Samboy, E. Stamelos, C. Vanderbilt, J. Philip, M. H. Jean, L. Corsale, A. Manzo, N. H. G. Paramasivam, J. S. Ziegler, J. Gao, J. C. Perin, Y. S. Kim, U. K. Bhanot, M. H. A. Roehrl, O. Ardon, S. Chiang, D. D. Giri, C. S. Sigel, L. K. Tan, M. Murray, C. Virgo, C. England, Y. Yagi, S. J. Sirintrapun, D. Klimstra, M. Hameed, V. E. Reuter y T. J. Fuchs. Integrated digital pathology at scale: A solution for clinical diagnostics and cancer research at a large academic medical center. *J Am Med Inform Assoc*, 28(9):1874–1884, 2021. doi: 10.1093/jamia/ocab085.

[6] P. Bankhead, M. B. Loughrey, J. A. Fernández, Y. Dombrowski, D. G. Mcart, P. D. Dunne, S. Mcquaid, R. T. Gray, L. J. Murray, H. G. Coleman, J. A. James, M. Salto-Tellez y P. W. Hamilton. QuPath: Open source software for digital pathology image analysis. *Sci Rep*, 7(1):16878, 2017. doi: 10.1038/s41598-017-17204-5.

[7] F. Pourakpour, Á. Szölgyén, R. Nateghi, D. A. Gutman, D. Manthey y L. a. D. Cooper. HistomicsTK: A Python toolkit for pathology image analysis algorithms. *SoftwareX*, 31:102318, 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2025.102318>.

[8] M. Y. Lu, D. F. K. Williamson, T. Y. Chen, R. J. Chen, M. Barbieri y F. Mahmood. Data-efficient and weakly supervised computational pathology on whole-slide images. *Nature Biomedical Engineering*, 5(6):555–570, 2021. doi: 10.1038/s41551-020-00682-w.

[9] O. Ardon, A. Manzo, J. Spencer, V. E. Reuter, M. Hameed y M. G. Hanna. Digital slide scanning at scale: Comparison of whole slide imaging devices in a clinical setting. *J Pathol Inform*, 18:100446, 2025. doi: 10.1016/j.jpi.2025.100446.

[10] S. R. Duenweg, S. A. Bobholz, A. K. Lowman, M. A. Stebbins, A. Winiarz, B. Nath, F. Kyereme, K. A. Iczkowski y P. S. Laviolette. Whole slide imaging (WSI) scanner differences influence optical and computed properties of digitized prostate cancer histology. *J Pathol Inform*, 14:100321, 2023. doi: 10.1016/j.jpi.2023.100321.

- [11] J. L. Muhlich, Y. A. Chen, C. Yapp, D. Russell, S. Santagata y P. K. Sorger. Stitching and registering highly multiplexed whole-slide images of tissues and tumors using ASHLAR. *Bioinformatics*, 38(19):4613–4621, 2022. doi: 10.1093/bioinformatics/btac544.
- [12] N. Kanwal, F. Pérez-Bueno, A. Schmidt, K. Engan y R. Molina. The Devil is in the Details: Whole Slide Image Acquisition and Processing for Artifacts Detection, Color Variation, and Data Augmentation: A Review. *IEEE Access*, 10:58821–58844, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3176091.
- [13] E. L. Clarke y D. Treanor. Colour in digital pathology: a review. *Histopathology*, 70(2):153–163, 2017. doi: 10.1111/his.13079.
- [14] T. Kohlberger, Y. Liu, M. Moran, P. C. Chen, T. Brown, J. D. Hipp, C. H. Mermel y M. C. Stumpe. Whole-Slide Image Focus Quality: Automatic Assessment and Impact on AI Cancer Detection. *J Pathol Inform*, 10:39, 2019. doi: 10.4103/jpi.jpi_11_19.
- [15] R. Brixtel, S. Bougleux, O. Lézoray, Y. Caillot, B. Lemoine, M. Fontaine, D. Nebati y A. Renouf. Whole Slide Image Quality in Digital Pathology: Review and Perspectives. *IEEE Access*, 10:131005–131035, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3227437.
- [16] J. Lentz, H. E. Sevil y D. Fries. Image preprocessing to enhance phase correlation of featureless images. *Scientific Reports*, 15(1):10287, 2025. doi: 10.1038/s41598-025-94176-x.
- [17] A. Janowczyk y A. Madabhushi. Deep learning for digital pathology image analysis: A comprehensive tutorial with selected use cases. *J Pathol Inform*, 7:29, 2016. doi: 10.4103/2153-3539.186902.
- [18] A. Janowczyk, R. Zuo, H. Gilmore, M. Feldman y A. Madabhushi. HistoQC: An Open-Source Quality Control Tool for Digital Pathology Slides. *JCO Clin Cancer Inform*, 3:1–7, 2019. doi: 10.1200/cci.18.00157.
- [19] B. A. Schreiber, J. Denholm, F. Jaekle, M. J. Arends, K. M. Branson, C. B. Schönlieb y E. J. Soilleux. Rapid artefact removal and H&E-stained tissue segmentation. *Scientific Reports*, 14(1):309, 2024. doi: 10.1038/s41598-023-50183-4.

- [20] N. Kanwal, F. Khoraminia, U. Kiraz, A. Mosquera-Zamudio, C. Monteagudo, E. a. M. Janssen, T. C. M. Zuiverloon, C. Rong y K. Engan. Equipping computational pathology systems with artifact processing pipelines: a showcase for computation and performance trade-offs. *BMC Med Inform Decis Mak*, 24(1):288, 2024. doi: 10.1186/s12911-024-02676-z.
- [21] N. Otsu. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1):62–66, 1979. doi: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [22] R. Suvorov, E. Logacheva, A. Mashikhin, A. Remizova, A. Ashukha, A. Silvestrov, N. Kong, H. Goka, K. Park y V. Lempitsky Resolution-robust Large Mask Inpainting with Fourier Convolutions. En *2022 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 3–8 Jan. 2022: doi: 10.1109/WACV51458.2022.00323.
- [23] J. Cupitt, K. Martinez, L. Fuller y K. Wolthuizen. The libvips Image Processing Library. *Electronic Imaging*, 37(12):178–1–178–7, 2025. doi: 10.2352/ei.2025.37.12.hpci-178.
- [24] I. Gilman, A. Kishore, C. Thatcher, M. Salsbery, A. Vandecreme, T. Pearce y J. Horák OpenSeadragon: An open-source, web-based viewer for high-resolution zoomable images. 2026 <https://openseadragon.github.io/>.

Proposta de creación dun club termal integrado de termas e balnearios na provincia de Ourense con financiamento parcial de tratamentos terapéuticos termais

M. M. Cruz-González

*Departamento de Organización de Empresas e Márketing,
Campus de Ourense, Universidade de Vigo
mcruz@uvigo.gal*

F. J. Sánchez-Sellero

*Departamento de Organización de Empresas e Márketing,
Campus de Ourense, Universidade de Vigo
javiss@uvigo.gal*

V. M. Suárez-Porto

*Departamento de Organización de Empresas e Márketing,
Campus de Ourense, Universidade de Vigo
vsuarez@uvigo.gal*

M. C. del Río-Rama

*Departamento de Organización de Empresas e Márketing,
Campus de Ourense, Universidade de Vigo
delrio@uvigo.gal*

Resumo

Comezaremos analizando o concepto de termalismo azul social en Europa, con particular énfase nos países que inclúen a terapia termal nos seus catálogos de servizos sanitarios públicos: Alemaña, Francia, Italia, Finlandia e Suíza. Analogamente constatamos que a provincia de Ourense é recoñecida pola súa riqueza termal, cunha ampla rede de instalacións que inclúe balnearios, termas públicas e establecementos privados. Na nosa investigación propomos a creación dun club termal integrado para Galicia, como paso intermedio cara á incorporación da terapia termal dentro do catálogo público de coberturas sanitarias. Unha iniciativa que busca potenciar o turismo de saúde, actualmente exento de cobertura ou financiamento, e de benestar, aproveitando os recursos naturais e a infraestrutura existente para crear unha oferta coordinada e atractiva, tanto para visitantes coma para a poboación local. Así, proporemos financiamentos, descontos, prezos regulados ou copagos parciais de tratamentos de saúde en balnearios e termas privadas, inversamente proporcionais á renda per cápita; así como o financiamento de desprazamentos ou estadías para o gozo de surxencias públicas. A metodoloxía baséase en reunións cos diferentes axentes e operadores para a creación en 2027 do Club Termal de Galicia. Buscaremos compromisos de adhesión e incorporación ao club, achegas e investimentos que potencien o turismo termal terapéutico en Ourense, en particular, e en Galicia, a nivel agregado. Finalmente centrarémonos en incentivos de operadores e administracións públicas da provincia de Ourense, respecto da mobilidade, acceso e servizos terapéuticos en surxencias públicas.

Palabras clave: club termal, Servizo Galego de Saúde e surxencias.

1. Introducción

O concepto de termalismo azul engade ao aproveitamento dos beneficios de augas mineromedicinais ou termais, a procura do benestar holístico (incorporando necesidades de carácter emocional e social, isto é, reflicte unha filosofía ampliada de benestar integral). Baixo esta nova perspectiva desde os balnearios propóñense terapias termais, pero tamén se incentiva e potencia o benestar emocional, hábitos de vida, alimentación e relación social saudables, convídase á desconexión e á integración coa natureza e o patrimonio local. Dentro do devandito concepto, propomos a creación dun club termal en Galicia, enfocado nas terapias funcionais e na mellora dos servizos e xestión pública das termas e pozas da provincia de Ourense.

O proxecto de creación de club termal en Galicia representa unha proposta innovadora e pioneira, combinando investigación científica, tecnoloxía avanzada e modelos de xestión sostibles para situar a Ourense como un referente en termalismo terapéutico, a nivel nacional e europeo. Pretendemos engadir valor á actividade turística termal en Ourense, de maneira exponencial, incentivando dinámicas de desenvolvemento endógeno e de carácter circular e sostible. Aínda cando existen balnearios nas catro provincias galegas, a presenza maioritaria de surxencias públicas ten lugar na provincia de Ourense, polo que o maior efecto transformador tería lugar nos seus límites territoriais.

A creación do Club Termal Integrado en Ourense require un enfoque multidisciplinar, xa que involucra diversas áreas de coñecemento e profesionais de distintos ámbitos para garantir unha xestión eficaz, sostible e innovadora. A integración de múltiples disciplinas permite optimizar os recursos termais, mellorar a experiencia das persoas usuarias e potenciar o impacto socioeconómico da iniciativa. Ademais, iniciativas similares noutros países demostraron a importancia de modelos de financiamento público-privado para a súa viabilidade e éxito. Así, a cidade de Ourense conta con varias fontes termais de gran calidade e unha oferta importante de termas e balnearios tradicionais. Aínda que a cidade goza dunha forte demanda no sector do termalismo, as instalacións privadas, en xeral, están máis orientadas ao tratamento de saúde específico e menos ao benestar xeral, á vez que as termas e surxencias públicas mostran máis un aspecto lúdico, de relaxación e benestar.

Con este proxecto, o Club Termal buscaría ampliar esta oferta, centrando a súa atención non só na mellora da saúde, senón tamén en ofrecer experiencias de relaxación e benestar, como actividades de meditación, ximnasio e tratamentos estéticos. O termalismo en Ourense está en constante evolución e este proxecto forma parte do proceso de modernización e diversificación do sector termal na cidade.

A modo de introdución conceptual, dedicaremos unhas liñas á distinción entre tipoloxías turísticas relacionadas, características e uso das augas. Así, seguindo o criterio proposto polo Instituto de Turismo de España, nun primeiro momento debemos distinguir entre dous tipos de ofertas de turismo de saúde: baseada na auga (balnearios, centros de talasoterapia e spas) e a non baseada na auga (centros de saúde e beleza, centros espirituais e oferta singular).

Dentro do turismo termal e o de balnearios, o elemento diferencial achámolo nas augas declaradas mineromedicinais ou termais; a estas dúas variantes podemos engadir o caso particular de pozas, termas ou surxencias públicas, onde tamén pode ter lugar o desenvolvemento de prácticas terapéuticas. O concepto de talasoterapia non é asimilable, por empregar augas tomadas directamente do mar, as cales tamén poderán ter capacidades terapéuticas; tampouco é substituíble nin semellante o concepto de turismo de spa, que emprega augas convencionais, sen propiedades curativas.

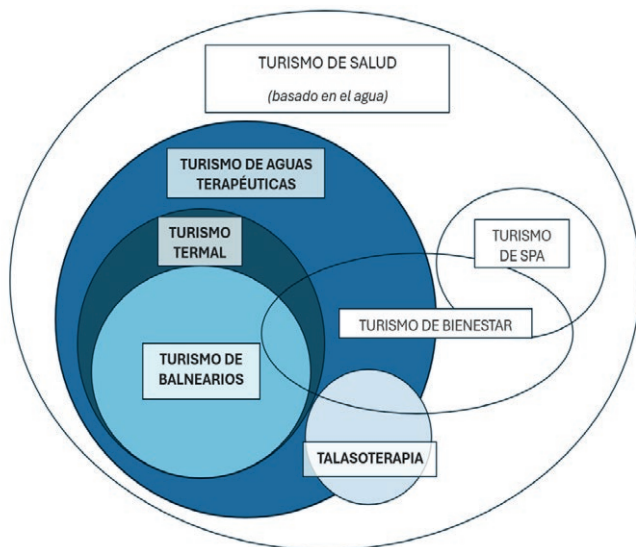


Figura 1. Relacións entre turismo termal, turismo de augas terapéuticas e outras modalidades turísticas relacionadas ou afíns. Fonte: Segittur, 2024

Segundo a Secretaría Xeral de Turismo (2007), o turismo de benestar ou *wellness* é un «subsegmento do turismo de saúde, no cal a motivación principal consiste en manter e/ou mellorar o equilibrio físico e psíquico do turista que o practica». Mentres que Bushell e Sheldon (2009) propoñen a seguinte definición: «modo holístico de viaxar que integra unha procura de saúde física, beleza ou lonxevidade, e/ou unha elevación da consciencia ou do coñecemento espiritual e unha conexión coa comunidade, a natureza ou o misterio divino. Abarca unha variedade de experiencias turísticas en destinos con produtos *wellness*, infraestruturas e instalacións apropiadas, e recursos naturais e de benestar».

Especial atención merece a caracterización dos espazos termais habilitados para a realización de tratamentos terapéuticos, os cales varían en función do tipo de auga e do centro que acolle o devandito recurso, como referimos na figura 2. Así, para o caso de augas mariñas, a denominación do establecemento refírese como centros de talasoterapia; mentres que para o caso de augas mineromedicinais ou termais a clasificación dependerá do tipo de aproveitamento e a adscrición a normativas propias de centros sanitarios.

Desta forma, denominaremos como recursos termais, a oferta de mananciais, fontes, pozas, baños, caldas ou termas, por posuír augas declaradas, sen estar rexidas por normativa sanitaria; mentres que identificaremos como centros termais, os balnearios, hoteis-balneario e complexos termais, os cales ofrecen tratamentos médicos e terapéuticos mediante augas mineromedicinais ou termais por prescrición médica,

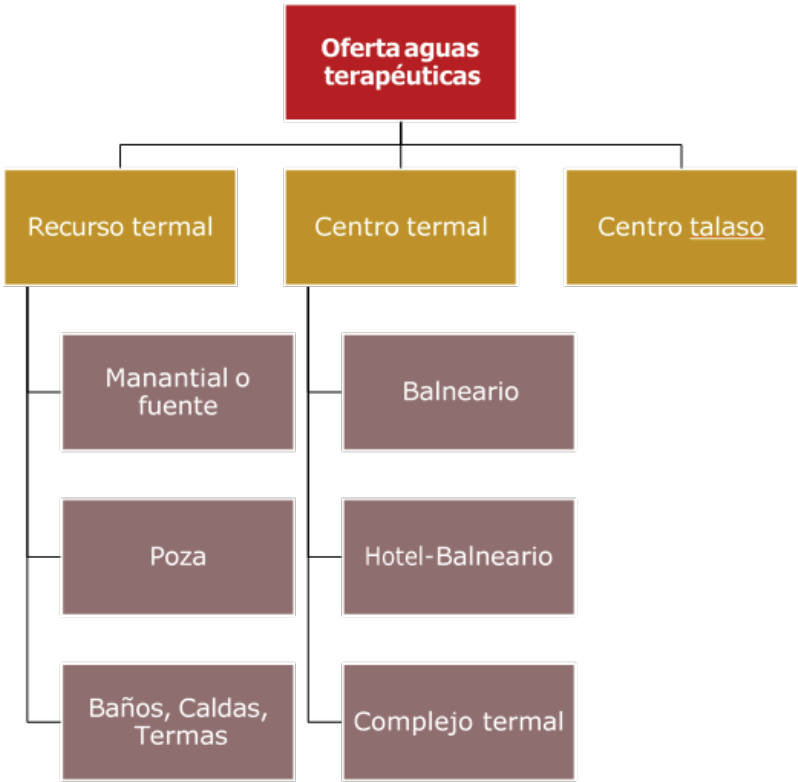
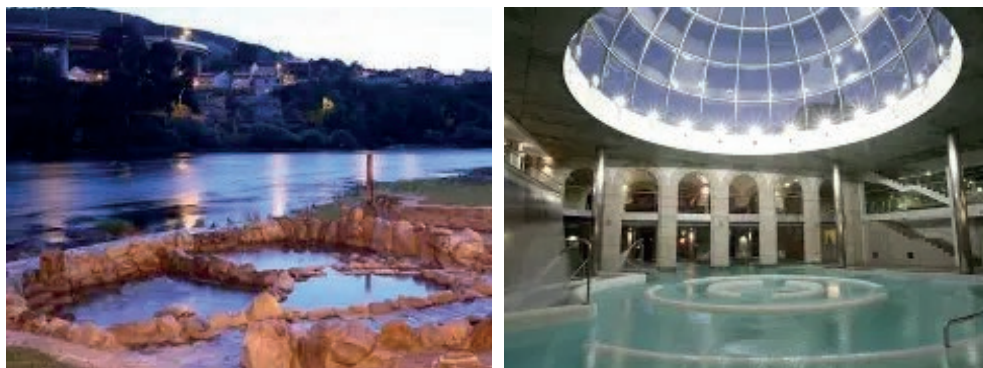


Figura 2. Tipoloxía de oferta de augas terapéuticas en España. Fonte: Segittur, 2024

dispondo diferencialmente dos recursos termais, dun servizo de asistencia médica. Os referidos como centros termais poderán presentar terapias moi variadas para as diferentes especialidades médicas

Tendo en conta a distinción comentada entre recursos termais e centros termais, debemos ter presente que ambas as categorías de establecementos empregan idéntica materia prima para a función terapéutica, as augas mineromedicinais ou termais; polo que as surxencias públicas asimilables a recursos termais tamén poderían acoller a cobertura médica asistencial pública. Neste caso, faltaríalles a contratación de persoal específico e a adscrición e seguimento da normativa sanitaria. O grao de aproveitamento dos recursos termais dependerá do interese e investimento que asuman os concellos, quizais en colaboración coas deputacións provinciais e as inspeccións, interese e grao de compromiso do Sergas para ampliar os establecementos adheridos, por riba dos centros termais existentes. O principal incentivo para o Servizo Galego de Saúde podería ser a redución do custo do tratamento en surxencias públicas respecto de balnearios, fronte ao custo do persoal médico que se debería incorporar a estas.



Figuras 3 e 4. Termas inundables en Ourense e centro termal. Fonte: ourense.gal; balneariosdegalicia.com

Na figura adxunta 3, observamos o detalle dunha das múltiples termas públicas e gratuítas existentes en Ourense (A Chavasqueira), situadas na canle do río Miño e de superficie inundable, circunstancia que limita gravemente o aproveitamento e gozo das augas terapéuticas. Ademais do malgasto de recursos termais, imposibilita o desenvolvemento de tratamentos terapéuticos de forma continuada no tempo. Fronte á devandita imaxe presentamos un centro termal habilitado de forma específica para tratamentos terapéuticos, con espazos separados e fins concretos, por especialidades médicas.

Entre os obxectivos específicos da creación do club termal atópase a mellora do acceso aos tratamentos termais. Nesta liña argumental, pretendemos desenvolver un sistema de subvencións e bonificacións para pacientes con prescricións médicas de tratamentos termais, garantindo que persoas maiores e colectivos vulnerables poidan acceder a terapias termais, con apoio financeiro; como paso intermedio cara á incorporación dos tratamentos termais no sistema público de saúde.

Outro dos obxectivos da proposta consiste en impulsar a creación dunha rede de termas e balnearios integrados, mediante a sintura de convenios de colaboración entre termas públicas, privadas e balnearios da provincia para ofrecer servizos estandarizados e interconectados. En termos específicos e baixo a supervisión do Servizo Galego de Saúde, consideramos imprescindible o desenvolvemento dunha plataforma dixital que permita reservar tratamentos e xestionar o financiamento e cobertura de tratamentos entre centros termais e a inspección pública sanitaria.

Dentro dos obxectivos intermedios da consolidación do club termal atópase a configuración dun inventario de tratamentos terapéuticos por especialidades médicas, que deberá estar apoiado pola evidencia científica e sanitaria do termalismo, respecto á análise clínica dos beneficios das augas mineromedicinais ou termais de Ourense. Dentro deste traballo documental, deberán definirse protocolos de certificación de

centros termais e tratamentos terapéuticos que se integrarán nas diferentes especialidades médicas de saúde pública, mediante a colaboración co Sergas.

A creación do club termal permitirá impulsar e revitalizar o turismo de saúde en Ourense e as súas actividades complementarias; así unha prioridade estratéxica deste consistirá en promover paquetes turísticos termais que complementen o gozo de balnearios públicos, privados e spas con aloxamento, restauración e oferta de lecer, cultura e patrimonio. Sobre este extremo, buscaranse novas alianzas e acordos de colaboración con axencias de viaxes e operadores turísticos rexionais, nacionais e internacionais.

Respecto da sustentabilidade e viabilidade do proxecto, o club termal e os axentes e operadores que se adhiran deberán preocuparse por mobilizar e incentivar a captación e derivación de financiamento europeo, a través de programas como NextGeneration ou os fondos Feder, para a mellora de instalacións e a incorporación incremental de centros termais ao catálogo de terapias financiáveis. Finalmente, o club termal, en xeral, e o Sergas, como axente de inspección e control de terapias e a súa cobertura sanitaria, como operador dominante, deberán regular prezos para equilibrar a rendibilidade empresarial co acceso universal aos tratamentos.

Con independencia de que aínda non se teña substanciado en Galicia financiamento ningún de tratamentos por especialidades, na provincia de Ourense diversas iniciativas relacionadas co termalismo foron promovidas e financiadas por entidades como a Xunta de Galicia, o Servizo Galego de Saúde (Sergas), a Deputación de Ourense e varios concellos. A continuación, destácanse algúns dos proxectos máis relevantes dos últimos anos:

Plan de turismo termal de Galicia 2025-2028: presentado en xaneiro de 2025, este plan conta cun orzamento de 10 millóns de euros e busca consolidar Galicia como un destino líder en turismo de saúde e benestar. Inclúe a creación dun proxecto termal emblemático en Ourense, colaboracións con aseguradoras médicas, transporte gratuíto a balnearios e promoción internacional do destino termal. En particular, dentro do bloque 2 do devandito plan inclúense subvencións dun máximo de 8 millóns de euros para a creación, rehabilitación e reforma de establecementos termais.

Oficina Termal AVE de Ourense: inaugurada en febreiro de 2025 na estación de tren de Ourense, esta oficina ten como obxectivo promocionar os balnearios da provincia e o programa de termalismo social. Pretende atraer os viaxeiros que pasan pola estación, conectando a alta velocidade ferroviaria coa proximidade aos centros termais.

Programa de termalismo saudable e benestar, cultura termal 2023: aprobado pola Deputación de Ourense, este programa ten como obxectivo combater a soidade non desexada en persoas maiores de 65 anos que viven soas. Ofrece tratamentos semanais en sete balnearios da provincia, con axudas de 75 euros por persoa, durante un período de entre 6 e 9 meses.

Programa Benestar en balnearios 2025: programa da Xunta de Galicia, dirixido a persoas maiores de 60 anos, de 66 prazas en 16 balnearios galegos, que financia estancias de 10 días para garantir o envellecemento activo e saudable e evitar a soidade non desexada.

Plan de sustentabilidade turística Ourense Provincia Termal: a Deputación de Ourense, en colaboración con trece concellos, traballa na elaboración deste plan que busca mellorar a sustentabilidade do modelo de desenvolvemento turístico na provincia. A iniciativa pretende reactivar o sector turístico mediante accións respectuosas desde o punto de vista socioeconómico, ambiental e territorial.

Catálogo termal da provincia de Ourense: a Deputación de Ourense e os balnearios da provincia están a crear o primeiro catálogo termal, que agrupa e clasifica todas as técnicas termais administradas no territorio. Este catálogo busca normalizar a nomenclatura dos tratamentos e establecer un sistema de «Códigos únicos de técnicas térmicas» (CUTT), facilitando a creación da historia clínica termal e mellorando a xestión dos tratamentos.

Estas iniciativas, entre outras moitas, reflicten o compromiso das institucións galegas co desenvolvemento e a promoción do termalismo en Ourense, aproveitando os recursos naturais da rexión para fomentar o turismo de saúde e benestar.

2. Metodoloxía e proposta de acción comparativa: clubs termais terapéuticos e termalismo social

A continuación, caracterízase unha selección das referencias bibliográficas científicas actualizadas que tratan propostas de clubs termais e iniciativas relacionadas en Europa, valorándoas comparativamente respecto da nosa proposta. O estudo realizado por Carvalho (2023) analiza a transformación das fontes termais tradicionais de Estoril, Portugal, nun moderno centro de benestar, destacando a evolución do turismo de saúde na rexión. Por outra banda, Pérez, Rodríguez e García (2022) avalían o valor económico e social da balneoterapia e do turismo de spa na rexión de Maresme, Cataluña, utilizando modelos de *input-output* e análises custo-beneficio, corroborando o impacto diferencial da terapia termal sobre os tratamentos convencionais e o seu custo contido. Finalmente, Smith e Puczko (2014) ofrecen unha visión comprensiva dos sectores de turismo de saúde, benestar e viaxes médicas a nivel global, analizando a historia, desenvolvemento, xestión e tendencias actuais. Estas fontes proporcionan unha base sólida para comprender as iniciativas de clubs termais en Europa, así como o seu impacto económico e social.

Respecto ao ámbito do termalismo e a hidroloxía médica, resulta imprescindible a participación e implicación de especialistas en hidroloxía médica e fisioterapia para garantir o uso terapéutico das augas mineromedicinais (médicos, enfermeiros e fisioterapeutas, tanto en balnearios coma en termas públicas). Creación de programas de tratamentos personalizados con base científica, seguindo modelos de países como Francia, onde o seguro de saúde cobre ata un 65 % do custo de tratamentos en balnearios acreditados, como parte da atención médica (Mossière *et al.*, 2018; de Oliveira *et al.*, 2023). Tamén resulta necesaria unha maior colaboración entre universidades e centros de investigación en estudos sobre os beneficios das augas termais, como ocorre en Alemaña, onde o Goberno financia proxectos de investigación sobre termalismo, a través do «Deutscher Heilbäderverband» (Assassi *et al.*, 2021).

Particularizando a incidencia do desenvolvemento turístico e a xestión hoteleira, resulta relevante planificar e promocionar o turismo termal no ámbito nacional e internacional. Sobre este particular, poderíamos inspirarnos en modelos como o de Hungría, onde o Estado subvenciona a modernización de balnearios para potenciar o turismo de saúde (Horváth, 2020); neste punto sería recomendable unha maior proactividade desde as administracións públicas en España. Na nosa proposta cremos necesaria a integración de hoteis, balnearios e establecementos turísticos na oferta do club, adoptando estratexias de éxito como as de Italia, onde programas como o «Bonus Terme» incentivaron o consumo de servizos termais mediante axudas directas á cidadanía (Ministero de Turismo, 2022). Neste sentido, deberían desenvolverse experiencias exclusivas para diferentes segmentos de usuarios termais, aproveitando boas prácticas como as de Xapón, onde o turismo termal (*onsen*) é promovido por políticas públicas para o desenvolvemento rexional (Ito e Nakamura, 2019).

A creación de clubs termais permitirá un novo impulso para os conceptos de saúde e benestar, a través da incorporación de prácticas complementarias como nutrición, ioga, conciencia plena (*mindfulness*) e fitness terapéutico. Así, poderemos apostar pola creación de paquetes de benestar combinando servizos médicos e recreativos, seguindo exemplos como o de Portugal, onde o programa «Termas Centro» recibe financiamento europeo para potenciar os balnearios, como espazos de saúde e benestar (European Regional Development Fund, 2021). A integración referida entre terapia termal e benestar permitirá promocionar un estilo de vida saudable entre os usuarios do club, con campañas de sensibilización similares ás desenvolvidas en Corea do Sur, onde os centros termais están integrados no sistema de saúde preventiva (Kim *et al.*, 2020).

En canto ao desenvolvemento endógeno do tecido produtivo local e a xeración de emprego, os clubs termais presentan un impacto positivo moi relevante sobre a economía local mediante a dinamización do sector turístico. Así contribúen á creación de emprego en múltiples sectores, como poden ser a hostalaría, a saúde, o lecer, a arte, patrimonio e cultura ou o deporte, entre outros. Neste caso, o aproveitamento dos recursos naturais actúa como motor do desenvolvemento sostible, atopando modelos replicables como o de Islandia, onde o Blue Lagoon recibiu incentivos do Goberno para converterse nun referente mundial do turismo termal (Sigurðsson e Gunnarsson, 2017).

Respecto ao ámbito da innovación tecnolóxica e a mercadotecnia dixital, o club termal integrado entre balnearios, termas e Sergas necesitará da implementación de plataformas dixitais para a xestión de reservas, seguimento de terapias individuais e fidelización de clientes. Desta forma, os últimos avances en intelixencia artificial e *big data* permitirán personalizar servizos e mellorar a experiencia dos usuarios, seguindo exemplos como os de Eslovenia, onde a transformación dixital dos balnearios foi financiada polo fondo europeo de desenvolvemento rexional (Slovenian Tourism Board, 2021). Igualmente poderán desenvolverse estratexias de mercadotecnia dixital específicos para promocionar Ourense como destino termal de referencia, inspirándose en campañas como as de Turquía, que inclúen incentivos fiscais para empresas que promoven o turismo de benestar (Turkish Ministry of Culture and Tourism, 2020).

Finalmente, a preocupación medioambiental e a sustentabilidade dos clubs termais relacionarase coa protección e conservación dos recursos termais mediante un uso responsable, seguindo as recomendacións da Organización Mundial do Turismo sobre termalismo sostible (UNWTO, 2019). A proposta de club termal para Galicia refire a aplicación estrita e escrupulosa de criterios de eficiencia enerxética nas instalacións, utilizando como referente o modelo de Suíza, onde as políticas de ecoloxía termal son apoiadas con fondos públicos (Swiss Federal Office of Energy, 2021). A proposta de club termal requirirá de investimentos para recuperar espazos e transformar surxencias públicas inundables en espazos diferenciados e privativos para o uso termal, sobre a base da sustentabilidade e accesibilidade continuas e garantizables. Como exemplo replicable propomos as prácticas de termalismo sostible de Canadá, onde se crearon reservas naturais protexidas en zonas termais con financiamento do Goberno (Parks Canadá, 2020).

O modelo de termalismo subvencionado en España está relacionado co programa Imserso e dirixido á terceira idade, maiores de 60 anos e xubilados, dentro dun esquema moi similar ao portugués. O referido modelo leva aplicándose a balnearios acreditados en España desde 1989, cunha media de 200 000 prazas anuais. Este modelo replícase noutras administracións públicas: comunidades autónomas e deputacións, con similar enfoque: pensionistas e subvención parcial de tratamentos e aloxamento.

	España	Francia	Italia	Portugal
Cobertura/acceso	Ciudadanos desde 65 años	Todas las edades si tienen prescripción médica	Todas las edades si tienen prescripción médica	Ciudadanos desde 65 años
Financiación	Programa Cofinanciado por IMSERSO puede variar entre el 20 y el 50% del coste del servicio	La Seguridad Social (\$\$) reembolsa el 65% de los costes del tratamiento. Los pacientes asumen los costes totales de alojamiento y alimentación.	Servizio Sanitario Nazionale prevé una participación en los gastos sanitarios para la balneoterapia, en la que los ciudadanos no exentos de edades comprendidas entre 6 y 65 años pagan una tarifa fija de 55 € por todo el ciclo de tratamiento (12 días).	El valor de la coparticipación del estado es actualmente (2019) del 35% del precio de tratamientos de balneoterapia, con un límite de 95 € por conjunto de tratamientos de entre 12 y 21 días
Personal	La hidrología médica es una especialidad.	Un médico hidrólogo prescribe tratamientos.	La hidrología médica es una especialidad	Médicos con competencia en hidrología médica, otorgados por la Asociación Médica Portuguesa.
Regulación	Ministerio de Derechos Sociales, Consumo y Agenda 2030 regula el programa de termalismo social.	Ministerio de Salud y Seguridad Social supervisa la calidad de los servicios terapéuticos y otorga certificación oficial al establecimiento de balneoterapia que cumple con los requisitos reglamentarios.	Servizio Sanitario Nazionale (Servicio Nacional de Salud)	Fundación INATEL. Director general de Salud realiza el seguimiento de la actividad de balneoterapia, la licencia de la actividad, las directrices para el control de la calidad del agua y el reconocimiento de las indicaciones terapéuticas de las aguas minerales naturales.
Provisión de redes y servicios	El Programa IMSERSO contó con 208.500 plazas en 108 establecimientos asociados	110 establecimientos de balneoterapia. Se enumeran 770 fuentes de agua mineral natural	120 establecimientos con convenio para tratamientos de balneoterapia	49 establecimientos de balneoterapia de los cuales 38 están en funcionamiento: de estos, el 56% es de gestión privada y el 44% de gestión pública

Táboa 1. Coberturas comparativas do termalismo social e terapéutico. Fonte: de Oliveira *et al.*, 2023

Na táboa adxunta analízanse comparativamente as actividades e perfís de usuarios obxecto de subvención do conxunto de servizos termais ofertados polos operadores de España, Francia, Italia e Portugal, a partir de Oliveira *et al.*, 2023. Paralelamente debemos precisar que Francia é o país máis desenvolvido dentro do turismo termal a nivel mundial, estando esta actividade regulada dentro do código de saúde pública nacional. Os seus máis de 110 establecementos termais están regulados como establecementos sanitarios («hospitals», en termos intuitivos para un residente en España), sendo a reumatoloxía a principal terapia termal. No último exercicio pechado, 2024, o sistema sanitario francés financiou preto de 600 000 tratamentos termais, a través dun modelo conxunto e mixto de xestión pública e privada, cun volume moi significativo de balnearios públicos, en todos eles con presenza de persoal médico especializado, composto por médicos, enfermeiros, fisioterapeutas, auxiliares..., sendo as principais rexións de destino o suroeste e sueste do país, rexións de Aquitania, Languedoc-Rosellon, Rodano-Alpes e Mediodía-Pireneos.

O modelo de financiamento do termalismo en Italia é similar ao francés, claramente cun menor control sanitario, unha tarifa fixa por tratamento (55 € para un ciclo de 12 días), centrado só na finalidade terapéutica, deixando fóra da subvención ou axuda o aloxamento ou a manutención.

A principal diferenza entre o modelo francés e o español radica nos conceptos financiáveis e o estrato de idade ao que se dirixen. O termalismo social en España diríxese á terceira idade e financia a estancia total segundo a renda (aloxamento e comidas, podendo elixir o usuario unha maior ou menor implicación cuns ou outros

tratamentos), sen que exista unha prescrición médica específica, chega con que exista unha «non contraindicación» dun médico xeral. Mentres o termalismo subvencionado en Francia é só de carácter terapéutico e específico, é imprescindible unha prescrición médica concreta que habilita unha subvención do 65 % de devandito tratamento, sen cobertura de custos adicionais de aloxamento e manutención.

Consideramos que a existencia de augas terapéuticas en España está a ser obxecto dunha explotación ineficiente, de forma que os máis de 36 anos de termalismo social do Imsero e o seu reflexo en convocatorias similares de autonomías, provincias e concellos contribuíron a un envellecemento activo e saudable, reduciron a estacionalidade, mantendo postos de traballo en tempada baixa, engadindo valor á sociedade. Pero esqueceu as propiedades terapéuticas para a poboación non xubilada, o que provocou unha total desafección por parte da poboación nova, circunstancia que non ocorre en países centroeuropeos. Ao mesmo tempo, a despreocupación polos efectos terapéuticos das convocatorias do Imsero provocou un efecto perverso sobre a sociedade, como é a percepción do termalismo como de benestar, lecer e relaxación, minusvalorando os seus efectos terapéuticos específicos. Sobre este punto debemos precisar que a porcentaxe de persoas que acoden a termas e surxencias públicas en España, seguindo criterios técnicos e terapéuticos, é moi reducido, tendo que realizar o tratamento pola súa conta, sen axuda de persoal médico especializado.

A metodoloxía do proxecto de investigación baséase na interacción cos axentes implicados, xa sexan públicos ou privados, de forma que os balnearios e as termas ou surxencias públicas ou privadas poidan especializar máis as súas propostas por doenzas ou patoloxías concretas, ata agora máis xeneralistas e para pacientes xubilados. Interactuamos tamén co Servizo Galego de Saúde, presentando os beneficios terapéuticos do termalismo e a súa posible incorporación flexible a tratamentos específicos. Trataremos de implicar tamén concellos e deputacións, que poidan financiar parcial ou totalmente os desprazamentos dos pacientes para a recepción de tratamentos. Ademais da incorporación de administracións públicas para facilitar a mobilidade dos usuarios, os concellos deberán decidir o nivel de compromiso das surxencias públicas que xestionan dentro do club termal, dado que en principio os devanditos recursos termais non están suxeitos pola normativa sanitaria, quedando en principio á marxe de calquera tipo de tratamento subvencionable. Nese sentido, deberán valorar os espazos que poderían acceder de forma máis rápida e menos custosa á cobertura e normativas sanitarias, non de forma global, senón incremental, a partir de especialidades menos gravosas, en termos de contratación de persoal e adecuación de espazos e instalacións. A modo de exemplo, quizais comezando con tratamentos dermatolóxicos, postoperatorios, de relaxación e tratamento da tensión crónica. Na figura adxunta referimos a multiplicidade de surxencias públicas dentro do concello de Ourense, que poderían incorporarse a medio prazo ao club termal.



Figura 5. Paseo termal en Ourense. Fonte: Oficina Municipal de Turismo, Ourense

3. Resultados

Entre os resultados esperados, pretendemos mellorar a accesibilidade dos pacientes potenciais do Servizo Galego de Saúde a tratamentos termais, a través dun sistema de bonificacións en balnearios e termas públicas ou privadas. Propomos a creación dunha plataforma dixital de axentes e operadores do club termal, de forma que o facultativo que propoña un tratamento termal reciba todos os informes de seguimento de balnearios ou termas adheridas ao programa. Buscamos unha validación sanitaria dos procesos, sobre a base do *Vademécum de augas termais de Galicia*, proposto pola Cátedra de Hidroloxía Médica da Universidade de Santiago de Compostela en 2017. Tales prescricións deberían actualizarse, incorporando a análise técnica, detallada e terapéutica das diferentes surxencias e termas públicas e privadas existentes en Galicia, de forma que todos os operadores que integren o Club Termal de Galicia estean referidos dentro do catálogo de servizos. Igualmente valoraremos a incidencia do impacto turístico e económico da creación do club termal e a incorporación de tratamentos termais ao catálogo de servizos públicos sanitarios; así como a sustentabilidade súa financeira a partir das complementariedades das iniciativas do Sergas, balnearios, concellos e deputacións implicadas.

En termos específicos, vinculados a indicadores concretos, a creación do club termal persegue unha maior accesibilidade ás terapias termais; así o sistema de bonificacións debería beneficiar máis de 5000 persoas no seu primeiro ano de experiencia piloto, agardando que poida substanciarse en 2027 e para un balneario para cada provincia

galega, dependendo do criterio que adopte o Servizo Galego de Saúde (Sergas). Nas súas primeiras etapas buscaríase, polo menos, un incremento do 30 % do número de tratamentos termais prescritos polos servizos de saúde.

Outro capítulo de resultados esperados refírese á integración e xestión eficiente dos distintos axentes e operadores; así buscaremos a adhesión do maior número de balnearios galegos (tras varios contactos coa Asociación de Balnearios Galegos, podemos descontar o apoio e a participación activa destes no devandito proceso, que acollen con entusiasmo), así como a inclusión progresiva e selectiva de termas públicas e privadas no sistema. Tras a incorporación de axentes e operadores, buscaremos compromisos de administracións locais e rexionais respecto da bonificación de tarifas de transporte urbano, interurbano e de liñas discrecionais, así como a negociación de prezos regulados para a restauración e hostalaría de proximidade para os centros termais. Neste senso xa temos constancia dun programa asinado recentemente pola Deputación de Ourense para tratamentos termais e comidas ou ceas nos tres establecementos con estrela Michelin da capital ourensá: Nova, Ceibe e Miguel, con prezos pactados. Respecto da creación e configuración dunha plataforma dixital operativa, cremos que podería comezar as súas actividades en 2027, tras unha etapa previa de certificación de centros termais e tratamentos.

Os obxectivos de validación científica e sanitaria enmarcaranse na caracterización dun catálogo de tratamentos financiáveis, segundo a evidencia científica dos efectos terapéuticos das diferentes augas mineromedicinais ou termais, resultando imprescindible revisar e actualizar o vademécum publicado en 2017.

Como indicador relevante do impacto turístico e económico, a creación do club termal en Galicia pretende incrementar nun 20 % o número de usuarios de centros termais en Galicia nos tres primeiros anos, posibilitando a creación de novos postos de traballo no sector termal e turístico. Simultaneamente, a xeración incremental de valor engadido para usuarios alleos ao programa Imsero permitirá fixar a poboación ao territorio en sectores afíns e relacionados, como a hostalaría, patrimonio cultural ou oferta de deportivo ou de lecer.

A creación e o mantemento a longo prazo do club dependerá da súa sustentabilidade financeira. Sobre este punto o Sergas debe valorar a análise do custo e beneficio para os pacientes públicos dos tratamentos termais, respecto da solución convencional baseada na farmacoloxía. Así recomendamos tamén algún tipo de colaboración de Anbal e outras administracións sobre o financiamento global do proxecto; de forma que non toda a carga sexa soportada pola administración autonómica. Así poderían buscarse vías adicionais de financiamento a través de fondos europeos. O obxectivo a longo prazo consistirá en establecer un modelo económico sostible con tarifas reguladas e axudas públicas.

Ademais das axudas e subvencións que o Programa de turismo termal da Xunta de Galicia, 2025-2028, propón para a creación e mellora de balnearios, cremos que a Secretaría Xeral de Turismo ou a consellaría pertinente deberían abrir unha liña de investimento decidido e relevante para recuperar as surxencias públicas existentes en Galicia, con especial mención á provincia de Ourense. Este resultado ou reclamación partirá tamén da imposibilidade que manifestan os concellos para asumir novos requirimentos sobre os devanditos espazos. As liñas de subvención non se poden xustificar demasiado cando os balnearios destinatarios destas non alcanzan a cubrir porcentaxes relevantes de ocupación. Neste punto ten máis sentido buscar novos modos de incentivar a demanda, como a través das terapias funcionais, como é o caso da nosa proposta de club termal.



Figura 6. Mapa do Club Balnearios de España. Fonte: ANBAL, Asociación Nacional de Balnearios de España, 2025

Entre os resultados esperados ou retos da creación do club termal pretendemos axuntar normativas que preserven e mobilicen recursos para mellorar a actividade termal, como potencial recurso de turismo termal e de saúde, con especial atención ás surxencias públicas, sobre as que os concellos apenas dispoñen de capacidade para investir e recuperar para o uso e gozo dos seus cidadáns. Resulta moi triste que moitas delas se atopen pechas ou se confundan coa canle dos ríos. Neste sentido, constatamos

que un dos grandes problemas está relacionado coa deficiente gobernanza e a falta de investimento, non xa de mellora, senón polo menos de mantemento das surxencias públicas.

Un dos grandes obxectivos ou resultados buscados coa creación do club termal refírese a unha maior coordinación e implicación entre axentes e operadores públicos e privados.

Por outra banda, a incorporación de terapias termais permitirá diversificar a demanda turística cara a usuarios máis novos, que poderán observar os beneficios específicos das augas terapéuticas, máis aló dos beneficios en termos de benestar, lecer ou relaxación que lles poderán transmitir os seus avós, como tradicional público obxectivo do termalismo social en España. Sobre este estrato poboacional, cremos que os balnearios e demais operadores termais deberían realizar ofertas atractivas para mellorar a percepción do usuario termal futuro.

Outro dos resultados esperados coas terapias termais consiste en reducir a dependencia tendencial da actividade termal nacional cara a actuacións de escaso retorno económico ou, dito doutro xeito, o perfil do usuario terapéutico previsiblemente realizará un maior gasto diario nos centros termais. O perfil terapéutico permitirá un mellor axuste e vinculación coa experiencia percibida por cada usuario, demandando unha maior personalización do servizo e xeración de valor; valores e criterios cada vez máis demandados polo turista termal. Como perspectiva de futuro, todo incentivo sobre as terapias termais permitirá correlacionar o turismo termal con outras tipoloxías e modalidades de produtos turísticos saudables, como o patrimonial, gastronómico, cultural, náutico ou deportivo, creando novas experiencias en destino.

A creación do club termal permitirá visibilizar máis as necesidades de mellora de infraestruturas, accesos e transporte respecto de balnearios, pero con maior incidencia sobre a situación actual das termas e surxencias públicas, que requiren de melloras notables.

Un dos resultados máis concretos da nosa proposta substánciase na aprobación por unanimidade, por parte da Deputación de Ourense, no seu pleno do 27 de febreiro de 2026, do Acordo para impulsar o termalismo terapéutico como recurso sanitario estratéxico. A moción foi defendida por Rosendo Fernández, médico e presidente do Inorde, quen reflectiu as experiencias terapéuticas de Francia, Alemaña ou Italia, coincidentes coas referencias do noso traballo, así como as achegas da Cátedra de Hidroloxía Médica e o vademécum, tamén avaliados na nosa investigación. Neste eido, a deputación insta a Federación Española de Municipios e Provincias (FEMP) para que lle solicite ao Goberno de España a supresión do termo «balneario» do artigo 5.4 do Real decreto 1030/2006 da carteira de servizos do Sistema Nacional de Saúde, ao equiparalas con actividades de lecer ou actividades non sanitarias. Asemade, solicítalle

á Xunta de Galicia que estude a inclusión progresiva das terapias balnearias na carteira complementaria de servizos da comunidade autónoma, unha vez se modifique a normativa estatal. De feito, poucos días despois, o xoves 12 de marzo, o presidente da Deputación de Ourense, acompañado de José Juan Cerdeira, director de benestar da deputación, reuníronse en Santiago de Compostela co conselleiro de Sanidade para avanzar no termalismo terapéutico como recurso sanitario, mostrando acordos para estudar a viabilidade da proposta terapéutica pública do termalismo. Entendemos claramente que o obxecto da nosa investigación, apoiada na coordinación do I Congreso Internacional da Xestión da Balneoterapia, organizado en Ourense, os días 20 e 21 de novembro de 2025, tiveron os seus froitos na actuación política da Deputación de Ourense; entidade que financia os proxectos INOU e que asumiu a reivindicación da nosa proposta, como unha temática propia da institución e da provincia.

4. Discusión de resultados

Valoramos moi positivamente os 36 anos de termalismo social en España, a través do programa Imsero sobre os balnearios españois, a súa contribución ao desenvolvemento e benestar da cidadanía española e dos operadores termais e as rexións nas que se atopan. O esforzo da administración central podería manterse no tempo. Pero cremos que as administracións autonómicas deberían valorar e incorporar dentro dos tratamentos da sanidade pública as terapias termais. O modelo francés non xera un custo inasumible, ao centrarse na cobertura parcial das terapias, mesmo podería valorarse en estadio inicial a opción italiana, cun prezo fixado por tratamento, cuxo custo medio sería claramente inferior ao habitual recurso convencional á farmacoloxía, aplicado en reumatoloxía, dermatoloxía ou calquera outra especialidade. Con iso queremos referir que as terapias termais adoitan presentar unha mellor solución en termos de custo e beneficio (entendido este en termos de saúde e calidade de vida dos pacientes) ca os tratamentos convencionais.

O termalismo social do Imsero ou outras administracións fortalecerase e complementará co financiamento parcial de terapias termais, de forma que a poboación maior valorará moito máis os diferentes tratamentos, desenvolvendo experiencias máis inmersivas e saudables; á vez que o usuario terapéutico desenvolverá unha maior capacidade para entender o benestar e a relaxación que se derivarán, de forma indirecta, do tratamento funcional. Paralelamente, o ámbito competencial administrativo tamén é diferente; social de carácter nacional e sanitario autonómico. En canto a este proceso, serán as administracións locais as que deban solicitar mecanismos, procedementos e axudas para o financiamento das melloras e recuperacións das surxencias da súa

competencia, para incorporalas a algúns tratamentos terapéuticos puntuais. Nese caso precisarán a contratación de persoal con competencias e habilidade funcionais e sobre hidroxía médica.

Entendemos que o proceso para incorporar os tratamentos termais á sanidade pública galega e ao vademécum dos especialistas será longo, pero cremos que a Xunta de Galicia e o Sergas non deberían dar as costas á evidencia científica, ao equilibrio financeiro do sistema sanitario lastrado en exceso polos custos farmacolóxicos e á mellora da saúde e calidade de vida dos cidadáns galegos. Neste eido, valoramos moi positivamente a iniciativa da Deputación de Ourense para iniciar negociacións para a inclusión da balneoterapia no catálogo galego de tratamentos terapéuticos, directamente coa Consellería de Sanidade.

5. Conclusións

O estudo presentado analiza a desigual disposición dos diferentes operadores en Galicia, respecto da creación dun club termal integrado en Galicia, como instrumento vehicular do desenvolvemento do termalismo terapéutico, financiado polo Servizo Galego de Saúde en Galicia. A proposta ten un carácter aberto e flexible, respecto de axentes e tratamentos, sen que se deba entender como incompatible cos actuais programas do Imsero ou comunidades autónomas dirixidos a pensionistas. Consideramos igualmente unha incorporación gradual da balneoterapia ao catálogo de tratamentos financiados pola sanidade pública, circunstancia que permitiría reducir o gasto e a forte dependencia da farmacoloxía observada nos tratamentos convencionais.

A proposta baséase nunha visión transversal que combina saúde, turismo, economía, tecnoloxía e sustentabilidade. O seu carácter multidisciplinar é crucial para o éxito da iniciativa, permitindo unha oferta diversificada, atractiva e viable a longo prazo. O proceso de integración de operadores e axentes será longo e custoso, con diferentes niveis de implicación. Así, os balnearios integrados dentro do sistema de termalismo social do Imsero poderían incorporarse desde o momento inicial, sendo moito máis complexa a incorporación das termas e surxencias públicas, así como a caracterización do proceso, especialidades e tratamentos financiados e supervisión e inspección por parte do Servizo Galego de Saúde. Comprobamos noutros países moi próximos, como Francia, Alemaña ou Italia, que os programas de financiamento público de tratamentos termais terapéuticos melloran substancialmente as doenzas e patoloxías dos cidadáns, sen pór en perigo a sustentabilidade financeira da sanidade pública; polo que cremos que, aínda que se poida estender temporalmente o proceso, a incorporación de terapias termais ao catálogo sanitario público debe ser unha iniciativa prioritaria e tendencial dos axentes e operadores implicados.

A creación do club termal de Galicia deberá evidenciar as necesidades de investimento e de recuperación de numerosas surxencias públicas que se achan francamente deterioradas, cando non abandonadas, pechas, enterradas ou mergulladas en canles de ríos. A conservación e a sustentabilidade das augas terapéuticas representan o futuro do turismo termal e deberían estar moi por riba de calquera outra motivación ou consideración empresarial, administrativa, competencial, social, política ou sanitaria.

6. Referencias

ANBAL. (s.f.). *Tratamentos terapéuticos*. Dispoñible en: <https://www.balnearios.org/tratamentos-terapeuticos>.

Asociación Balnearios de España. (s.f.). *Técnicas Termas*. Dispoñible en: <https://www.balnearios.org/tecnicas-termas>.

Assassi, L., Müller, P., & Schneider, R. (2021). Thermalism in Germany: Economic and Health Impact of the Spa Industry. Deutscher Heilbäderverband.

Bushell, R. e Sheldon, P. (2009): *Wellness and Tourism: Mind, Body, Spirit, Place*. New York: Cognizant Communication Books.

Carvalho, C. (2023). “Health tourism & Estoril Resorts rebirth: from thermal springs to the contemporary wellness centre.” *Tourism and Hospitality International Journal*, 9(2), 42– 58.

de Oliveira, N. N. S., Hellmann, F., Cantista, P., Maraver, F., & Serapioni, M. (2023). Comparative analysis of balneotherapy in European public health systems: Spain, France, Italy, and Portugal. *International Journal of Biometeorology*, 67(4), 597-608.

Escola de Organización Industrial. (2015). *Turismo Termal en España*. Crecente e asociados. Dispoñible en: https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/EOI_TURismoTermal_2015.pdf

European Regional Development Fund. (2021). Thermal Tourism in Portugal: The Case of Termas Centro.

Horváth, T. (2020). Government Subsidies and the Thermal Tourism Industry in Hungary. *Journal of Tourism Economics*, 12(3), 45-62.

Ito, K., & Nakamura, H. (2019). The Onsen Economy: Regional Development through Japanese Hot Springs. *Japan Tourism Review*, 7(2), 88-105.

Kim, S., Park, J., & Le, H. (2020). Thermal Spas as a Preventive Healthcare Strategy in South Korea. *Asian Journal of Wellness and Tourism*, 5(1), 33-50.

Maraver, F. (2017). Indicacións das augas mineromedicinais. *Vademécum das augas mineromedicinais de Galicia*, páx. 31-37

Maraver, F. (2021). *Talasoterapia: conceptos e antecedentes*, 9-15. Conferencias sobre Talaso, Saúde e Benestar.

Ministero do Turismo. (2022). Bonus Terme: Incentives for Thermal Tourism in Italy. Italian Government.

Mossière, A., Lemoine, M., & Dupont, C. (2018). Thermal Medicine in France: A Historical and Medical Perspective. *French Journal of Hydrology*, 15(1), 12-27.

Parks Canada. (2020). Protected Areas and Thermal Springs in Canada. Government of Canada.

Pérez, J. T., Rodríguez, J. M., & García, E. M. (2022). “The economic and social value of spa tourism: The case of balneotherapy in Maresme, Spain.” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1-15.

Segittur, Turismo e Innovación (2024). *Informe sobre Turismo Termal e Augas Terapéuticas*, Ministerio de Industria e Turismo, Madrid

Sigurðsson, H., & Gunnarsson, A. (2017). The Blue Lagoon and the Icelandic Thermal Tourism Model. *Nordic Tourism Journal*, 9(4), 211-228.

Smith, M., & Puczko, L. (2014). “Health, Tourism and Hospitality: Spas, Wellness and Medical Travel.” Routledge

Swiss Federal Office of Energy. (2021). Sustainable Energy Practices in Swiss Thermal Resorts.

Proxectos INOUE 2025

Vicerreitoría do Campus
de Ourense. Campus Auga

Universidade de Vigo