

# **Proxectos INOU 2019.**

## **Investigación aplicada na provincia de Ourense**

***Coordinadora:***

de Blas Varela, Esther

Ourense, 2020

---

Universidade de Vigo • Campus de Ourense

## **Proxectos INOU 2019.** Investigación aplicada na provincia de Ourense

Autores/as:

Cid Iglesias, Begoña  
Gueimonde Canto, Ana Isabel  
García Feal, Orlando  
Pérez Losada, Fermín Emiliano  
Rodríguez Toubes-Muñiz, Diego  
Iglesias Sarmiento, Valentín  
Ribadas Pena, Francisco José  
Laza Fidalgo, Rosalía  
Cotos Yáñez, Tomás Raimundo  
Rivo López, Elena  
Astray Dopazo, Gonzalo

Coordinadora:

de Blas Varela, Esther

Comisión de Avaliación:

Álvarez Díaz, Marcos  
Garrote Velasco, Gil  
López Periago, José Eugenio  
Prada Rodríguez, Julio  
Reboiro Jato, Miguel  
Sampayo Fernández, José A.

Vicerreitoría do Campus de Ourense-Campus Auga  
Universidade de Vigo  
Ourense, 2020

Nº de páxinas: 232

ISBN: 978-84-8158-882-8

### **Edición**

Vicerreitoría do Campus de Ourense - Campus Auga

[www.uvigo.gal/campus/ourense-campus-auga](http://www.uvigo.gal/campus/ourense-campus-auga)

© Universidade de Vigo

### **Maquetación**

Rodi Artes Gráficas, S. L.

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
Indicador composto de valoración do desempeño turístico sustentable dos espazos naturais protexidos (ENP) da provincia de Ourense	9
Análise de inundacións no xacemento arqueolóxico de Aquis Querquennis	37
Documentación, delimitación, estado de conservación e valoración científica e patrimonial do xacemento arqueolóxico de Aquis Querquennis (Baños de Bande, Ourense)	55
Impacto socioeconómico do campamento romano Aquis Querquennis	107
Perfís aritméticos na escola elemental	121
Solución tecnolóxica para PREVIN-MAT	143
Desenvolvemento de ferramentas para apoiar a calidade e a mellora continua no sector hoteleiro ourensán	159
Optimizar os indicadores de circularidade económica mediante a inclusión de factores correctores que non penalicen o sector agroalimentario da provincia de Ourense	189
Establecemento dos balances de materia no sector agroalimentario da provincia de Ourense a fin de optimizar os indicadores de circularidade material	213

---

# Análise de inundacións no xacemento arqueolóxico de Aquis Querquennis

O. García-Feal, J. González-Cao, J. M. Domínguez, M. de Castro, I. Álvarez e M. Des

*EPHYSLAB (Environmental Physics Laboratory), Facultade de Ciencias,  
campus de Ourense, Universidade de Vigo*

orlando@uvigo.gal, jgcao@uvigo.gal, jmdominguez@uvigo.gal, mdecastro@uvigo.gal, ialvarez@uvigo.gal, mdes@uvigo.gal

O complexo arqueolóxico e termal Aquis Querquennis (Bande, Ourense) pódese cualificar como un dos máis importantes de Galicia e un importante centro de atracción turístico-cultural. Desde mediados do século xx, debido á construción do encoro das Conchas, o complexo vén sufrindo inundacións periódicas que afectan tanto a conservación coma a súa explotación turística. É, polo tanto, de especial interese estudar estas inundacións para coñecer o seu impacto e analizar posibles medidas para minimizar os seus efectos. Para isto realizouse un labor de recadación de datos hidrolóxicos e topográficos, que inclúe un traballo de fotogrametría por medio de imaxes aéreas tomadas por dron. Logo realizouse unha análise do alcance e da recorrencia das inundacións e observouse que o complexo ten sido afectado por eventos de longa duración. Tamén se realizou unha modelaxe numérica que permitiu a simulación de inundacións e o deseño de posibles barreiras de protección.

## **Palabras clave:**

Inundacións, Aquis Querquennis, modelaxe numérica, Iber+

## **1. Introducción**

O complexo arqueolóxico Aquis Querquennis atópase no sueste da provincia de Ourense e pódese cualificar como un dos máis importantes xacementos arqueolóxicos de Galicia. Comprende, ademais do campamento militar, unha mansión viaria e unha zona de augas termais onde se localizarían as antigas termas romanas. Desde comezos do século xx realizáronse escavacións tanto no campamento coma na mansión viaria, aínda que non así na área das termas. Atópase na antiga vía romana Vía Nova (Vía XVIII)

que unía a cidade de Braccara Augusta (Braga, Portugal) con Asturica Augusta (Astorga). É, polo tanto, un centro de atracción turístico-cultural de primeira orde. A finais de 2018 foi declarado como ben de interese cultural [1].

A mediados do século xx a construción do encoro das Conchas provocou a inundación de distintas áreas asociadas ao campamento. Os efectos das devanditas inundacións agrávanse durante a tempada de choivas (principalmente no inverno). Isto provoca que calquera actividade, tanto de escavación coma de explotación turística do xacemento, se vexa totalmente imposibilitada (véxase a figura 1). É, polo tanto, de grande interese estudar en detalle o tipo de inundacións que afectan o xacemento, así como a súa recorrencia temporal, co fin de poñer en efecto as accións precisas para minimizar os efectos das devanditas inundacións.



**Figura 1.** De esquerda a dereita: zona de estacionamento das termas durante a inundación rexistrada o 24 de abril de 2019 e zona do campamento durante a inundación rexistrada o 16 de marzo de 2018

Co fin de analizar este fenómeno que vén afectando a zona, establécense dous obxectivos principais: en primeiro lugar, determinar a recorrencia, duración e alcance das inundacións que veñen afectando de forma histórica o xacemento arqueolóxico Aquis Querquennis; en segundo lugar, realizar unha modelaxe numérica da zona de estudo como ferramenta para analizar os eventos de inundacións e estudo de posibles medidas paliativas.

Para acadar estes obxectivos principais é preciso ter en conta outros obxectivos específicos:

1. Estudo detallado da topografía da zona, dividindo a cunca do río Limia augas arriba do xacemento arqueolóxico e a zona do campamento romano propiamente dita. O modelo dixital do terreo (MDT) do Centro Nacional de Descargas Xeográficas (CNIG) con resolución de 5 m é suficiente para realizar o estudo de

choiva/escoamento na cunca do Limia augas arriba do campamento. Para levar a cabo a modelaxe numérica na zona concreta do campamento, o MDT cunha resolución de 5 m é demasiado «groseiro» como para definir o campamento con suficiente precisión. É, polo tanto, necesaria a realización dun voo mediante un dron equipado co instrumental axeitado para obter un modelo dixital da zona de alta precisión.

2. Exame detallado das fontes de achega á zona de estudo. Para este fíxoselle unha solicitude á Confederación Hidrográfica do Miño-Sil.
3. Modelaxe numérica do propio xacemento arqueolóxico mediante o código Iber+ para analizar o impacto das inundacións da zona.
4. Realización das simulacións numéricas precisas para reproducir eventos históricos de inundación que nos permitan calibrar o modelo de asolagamento da cunca do río Limia e o seu efecto nas inundacións do xacemento arqueolóxico.

## **2. Metodoloxía**

### **2.1. Fotogrametría baseada en UAV**

Para analizar as inundacións é preciso dispor dos datos topográficos da zona do encoro das Conchas. Estes datos están dispoñibles de forma pública a través do CNIG (Centro Nacional de Información Xeográfica) a unha resolución de 5 m. Este nivel de detalle é suficiente para unha caracterización xeral da zona do encoro, pero insuficiente para a análise da zona de estudo correspondente ao xacemento Aquis Querquennis.

Para obter unha topografía detallada da zona de impacto das inundacións empregouse tecnoloxía UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Este tipo de vehículos, coñecidos comunmente como drones, manéxanse de forma remota por un operador en terra. Grazas a isto, pódese realizar dun xeito sinxelo e económico a toma de fotografías aéreas dunha área determinada. Para este traballo empregouse un UAV de catro rotores modelo DJI Phantom 3 PRO (véxase a figura 2). Este UAV permite realizar voos de ata 23 minutos de duración e acadar unha altura de ata 120 metros sobre o nivel do punto de engalaxe e unha velocidade máxima de 16 m/s. Conta, ademais, con navegación por GPS, o que permite deseñar con antelación plans de voo coa ruta da zona que se vai fotografar. A cámara vén equipada cunha lente de focal fixa de tipo grande angular (cunha lonxitude focal de 20 mm equivalente en formato de 35 mm) e conta cun sensor CMOS cun tamaño de 1/2.3" e unha resolución de 12.4 MPX (millóns de píxeles).



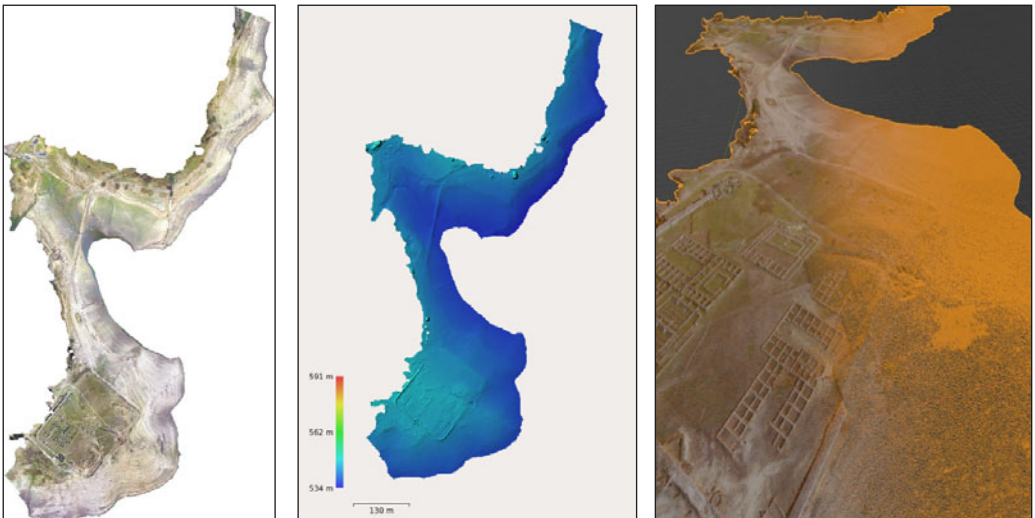
**Figura 2.** Á esquerda: imaxe do UAV empregado no presente traballo.  
Á dereita: demarcación dun punto de control sobre o terreo

Para realizar este traballo foi indispensable a colaboración do grupo GEAAT, e destaca o establecemento de forma precisa dos puntos de control (véxase a figura 2 da dereita e a figura 3) e a determinación da localización de todas as zonas de interese arqueolóxico. Os puntos de control son imprescindibles para unha correcta xeolocalización do modelo dixital do terreo, o que nos permite realizar un acoplamento co MDT de baixa resolución existente que se emprega para o resto da cunca do río Limia. A marcación precisa de puntos de control sobre o terreo fíxose empregando un GPS diferencial.



**Figura 3.** Localización dos puntos de control marcados sobre o terreo  
(PNOA cedido polo Instituto Xeográfico Nacional de España)

Durante o período en que o encoro se atopaba en niveis mínimos anuais, leváronse a cabo diversos voos e realizáronse centos de fotografías da área de interese. O procesamento destas fotografías realizouse mediante o soporte lóxico (*software*) Agisoft Metashape [2]. Esta ferramenta permite o procesamento fotogramétrico de imaxes dixitais. A fotogrametría [3] é unha técnica que permite obter medicións precisas dun obxecto a partir de imaxes fotográficas. Neste caso, o procesamento deu lugar a tres produtos diferentes: unha ortofoto xeolocalizada de alta resolución da zona de estudo, un modelo dixital do terreo cunha resolución de 0,5 m e un modelo en tres dimensións (véxase a figura 4).



**Figura 4.** De esquerda a dereita: ortofoto xeolocalizada, modelo dixital do terreo e modelo en tres dimensións

## **2.2. Modelaxe numérica: Iber+**

Iber [4] é un modelo numérico que resolve as ecuacións de Saint-Venant en dúas dimensións, tamén coñecidas como ecuacións de augas pouco profundas. Para isto emprega o método dos volumes finitos cunha malla non estruturada. Esta ferramenta é especialmente axeitada para a simulación de fluxos de auga en lámina libre en cunhas de ríos e estuarios non estratificados.

As ecuacións hidrodinámicas que resolve o modelo Iber pódense escribir como:



$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = r - i \quad (1)$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( h U_x^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (h U_x U_y) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( h U_y^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (h U_x U_y) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \quad (3)$$

onde  $h$  representa a profundidade da lámina de auga,  $U_x$  e  $U_y$  son velocidades horizontais medias,  $g$  é a aceleración da gravidade,  $\rho$  é a densidade da auga,  $Z_b$  é a cota do fondo,  $\tau_b$  é a fricción causada polo rozamento co fondo,  $v_t$  é a viscosidade turbulenta,  $r$  é a precipitación e  $i$  é a taxa de infiltración. Iber tamén incorpora termos adicionais como o vento ou a aceleración de Coriolis, pero foron omitidos por motivos de claridade. Ademais do módulo hidrodinámico, tamén incorpora outros módulos como os módulos de turbulencia [5], hidroloxía [6], transporte de sedimentos [7] ou calidade de augas [8, 9].

Este modelo foi froito da colaboración de diversos grupos de investigación: o Grupo de Enxeñaría da Auga e o Medio Ambiente (GEAMA) da Universidade da Coruña, o Grupo de Enxeñaría Matemática da Universidade de Santiago de Compostela, o Instituto Flumen da Universitat Politècnica de Catalunya e o Centro de Estudos Hidrográficos do CEDEX. Iber está dispoñible de forma gratuíta a través da súa páxina web oficial (<http://iberaula.es>), onde tamén están dispoñibles outros recursos como documentación e cursos de formación.

Unha das principais limitacións do modelo Iber é o elevado tempo de CPU preciso para realizar simulacións complexas; isto é debido a que o modelo carece das optimizacións necesarias para explotar o paralelismo presente nas arquitecturas de soporte físico (*hardware*) actuais. Ademais pode ser un importante impedimento para certas aplicacións como a simulación de grandes dominios espaciais ou temporais, sistemas de alerta temperá ou estudos de sensibilidade de parámetros. Para dar resposta a estas limitacións, o grupo EPhysLab da Universidade de Vigo tamén colabora no desenvolvemento do modelo Iber, creando unha nova implementación denominada Iber+ [10].

Iber+ foi implementado en C++ empregando o paradigma de programación orientada a obxectos co fin de mellorar a modularidade e o mantemento do código (Iber está programado na linguaxe de programación Fortran). Por outra parte, co obxectivo de mellorar a eficiencia do modelo, Iber+ emprega OpenMP para aproveitar o paralelismo de sistemas CPU de memoria compartida. Non obstante, a característica máis

destacable é a paralelización para GPU (*graphical processing units*) empregando a plataforma Nvidia CUDA (*compute unified device architecture*) [11]. As GPU son tarxetas gráficas utilizadas habitualmente para o procesamento de gráficos por computador. No entanto, debido á súa considerable potencia de cálculo as GPU tamén se empregan para outros usos entre os que se atopan as aplicacións científicas. Na literatura existen abundantes casos de éxito de paralelización con GPU tanto para modelos baseados en malla [12-14] coma para modelos sen ela [15]. As GPU teñen unha arquitectura paralela masiva con centos ou miles de núcleos de procesamento, que ofrecen unha potencia de cálculo de varios TFLOPS ( $10^{12}$  millóns de operacións en punto flotante por segundo) nunha soa tarxeta [16]. Non obstante, a utilización destes recursos non é trivial coma na programación para CPU e cómpre prestar atención a certos aspectos como as transferencias de memoria entre a CPU e a GPU, sincronización entre os diferentes fíos de execución, diverxencia, coalescencia da memoria etc. Estas peculiaridades da programación de GPU poden facer estragos no rendemento dun algoritmo se non son tidas en conta. Para máis detalles sobre estes aspectos o lector ou lectora pode consultar [8, 10]. O diagrama de fluxo da execución de Iber+ pode verse na figura 4. Os datos da simulación son transferidos unha soa vez antes do inicio da simulación e logo só transfíren de volta nos pasos de tempo nos que é preciso escribir os resultados ao disco. Deste xeito, todas as operacións computacionalmente intensivas de cada paso de tempo da simulación execútanse en GPU, evitando perdas de rendemento por transferencias de datos entre a GPU e a CPU.

Empregando GPU Iber+ é capaz de obter melloras de rendemento de ata dúas ordes de magnitude en comparación coa versión non paralelizada de Iber [10]. Isto fai que sexa especialmente axeitado non só para realizar simulacións maiores, senón tamén para aplicacións nas que o tempo de resposta é crítico [17] ou para análises de sensibilidade nas que se precisan levar a cabo un elevado número de simulacións [8].

Neste traballo, unha vez que se dispuxeron de todos os datos, modelouse a zona do encoro das Conchas para realizar simulacións numéricas da zona de estudo. Este modelo permitiu a simulación de distintos eventos históricos de inundación e, unha vez calibrado, permitiu o estudo dos efectos destes eventos no xacemento arqueolóxico e a simulación de distintas contramedidas. Para a calibración fixéronse comparacións dos resultados obtidos nas simulacións con imaxes recollidas in situ dos mesmos even-

tos históricos, e conseguiuase unha boa concordancia entre os resultados simulados e as observacións realizadas.

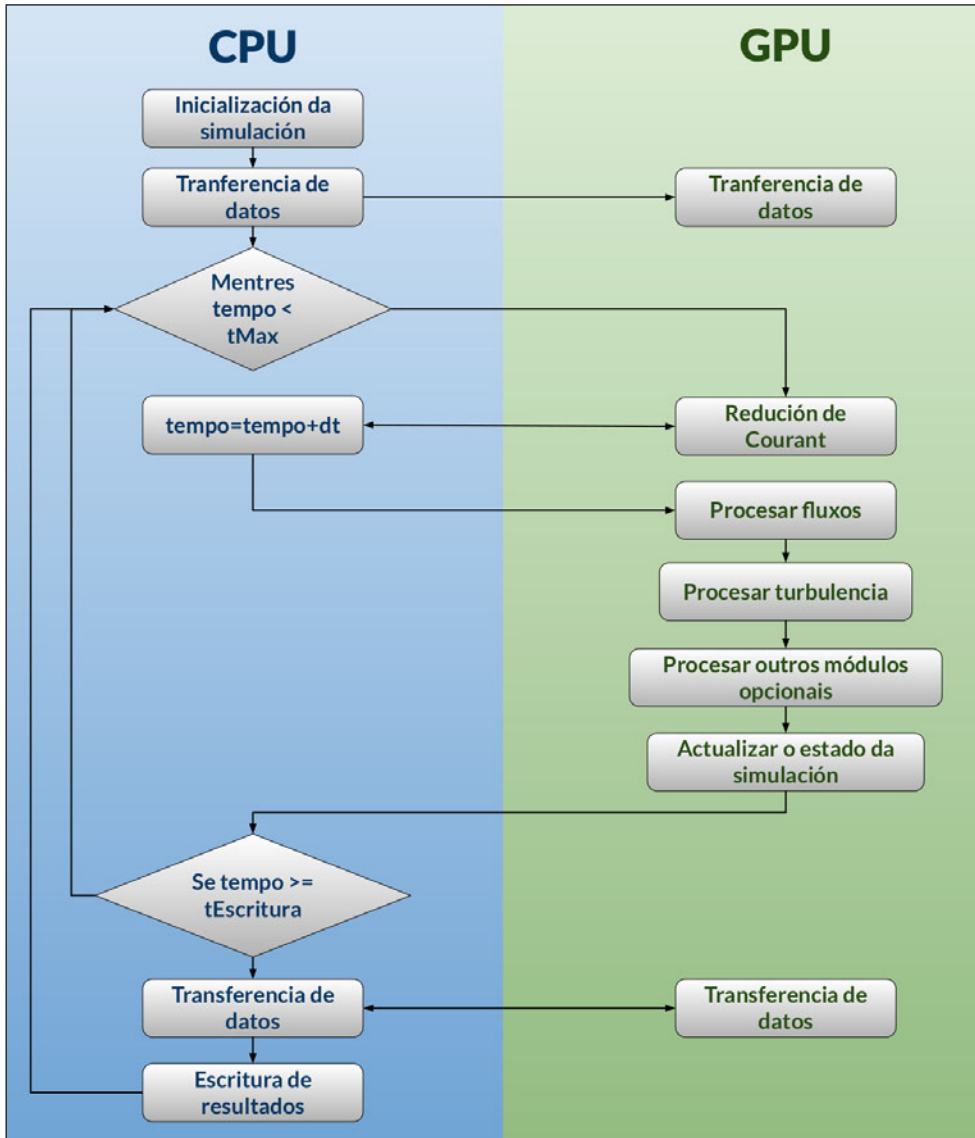
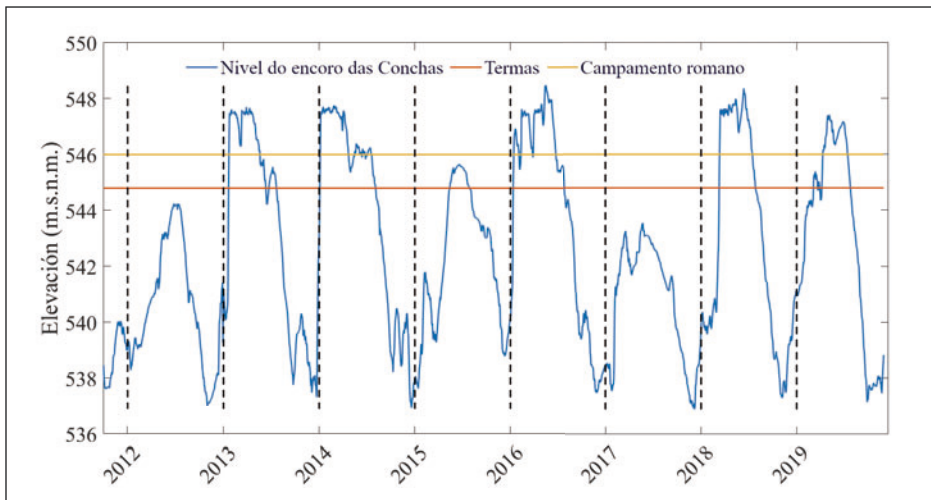


Figura 4. Diagrama de fluxo da execución do modelo Iber+ en GPU

### 3. Resultados

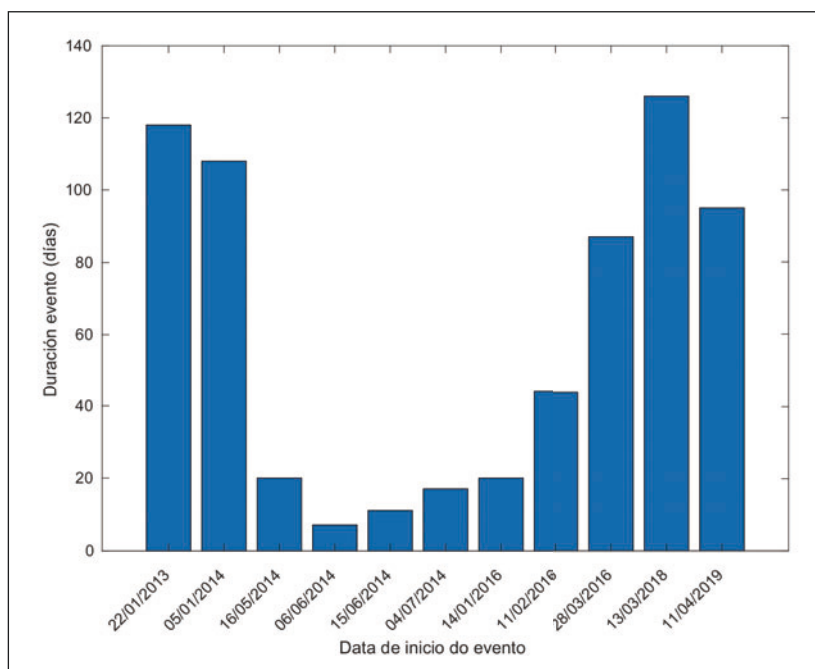
#### 3.1. Recorrenza e duración das inundacións

Co fin de analizar tanto a recorrenza coma a duración das inundacións que afectaron o xacemento arqueolóxico Aquis Querquennis durante o período de estudo, empregouse a serie temporal de elevación da lámina de auga do encoro das Conchas, xunto coas elevacións características da zona termal e do campamento romano. A serie temporal de elevación de auga obtívose a través da CHMS (Confederación Hidrográfica Miño-Sil), mentres que as elevacións características das áreas de interese se obtiveron a partir do mapa de elevacións da zona; 544,8 m corresponden á zona termal e 546,0 m corresponden á zona do campamento. A figura 5 amosa a serie temporal de elevación da lámina de auga no encoro das Conchas, xunto coa elevación da zona termal e do campamento romano. Na figura 5 pódese comprobar que ao longo do período analizado de oito anos, soamente en dous deles (2012 e 2017) non foron rexistradas inundacións no xacemento (nin na zona do campamento romano nin na zona das termas). Nun dos anos (2015) só se rexistraron inundacións na zona termal do xacemento e no resto dos anos (2013, 2014, 2016, 2018 e 2019) rexistráronse inundacións tanto da zona termal coma da zona do campamento. A figura 5 amosa tamén información sobre o comportamento temporal das inundacións rexistradas na zona do campamento. As



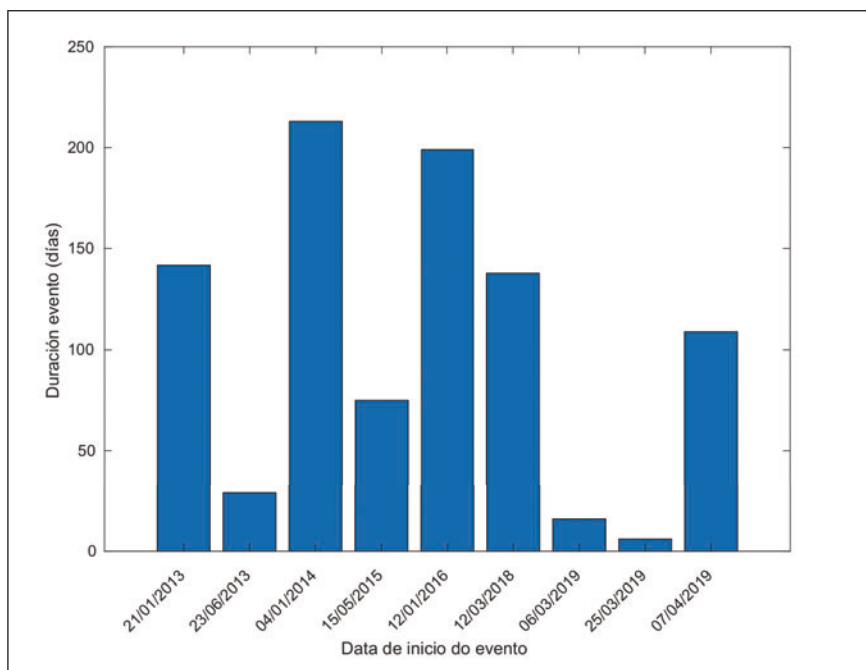
**Figura 5.** Serie temporal de elevación da lámina de auga (en metros sobre o nivel do mar) no encoro das Conchas. A liña laranxa representa a elevación característica da zona termal e a liña amarela representa a elevación do campamento romano. As liñas descontinuas delimitan os anos analizados durante o período de estudo

inundacións adoitan iniciarse durante os primeiros meses do ano e mantense o nivel de auga estable durante o período de duración destas para, unha vez pasado este período, descender ata niveis inferiores ás elevacións características da zona de estudo. Este comportamento é característico das inundacións de tipo fluvial, xa que nas inundacións de tipo *flash flood* o nivel de auga amosa un comportamento menos estable.



**Figura 6.** Días de inundación de cada evento na zona do campamento romano do xacemento Aquis Querquennis

Na zona do campamento romano foron rexistrados 11 eventos de inundación, mentres que na zona termal o número de inundacións rexistradas foi igual a 9. O número total de días de inundación rexistrados no campamento e na zona termal foi de 653 e 927 días, respectivamente. Polo tanto, a duración media de cada evento de inundación foi de preto de dous meses na zona do campamento e de preto de tres meses e medio na zona termal. As figuras 5 e 6 manifestan que a zona do campamento rexistra un número maior de inundacións ca a zona termal, pero estas son de menor duración e podemos concluír que a zona termal estivo afectada polas inundacións durante períodos de tempo máis longos ca a zona do campamento.



**Figura 7.** Días de inundación de cada evento na zona termal do xacemento Aquis Querquennis

### **3.2. Estudo de medidas de protección fronte a inundacións do xacemento arqueolóxico Aquis Querquennis**

A posibilidade de protexer fronte a inundacións un xacemento arqueolóxico da envergadura do Aquis Querquennis non é unha tarefa sinxela. A multitude de factores e de intereses, ás veces contrapostos, que entran en xogo á hora de realizar esta tarefa, fan que sexa un traballo de complexa solución. Unha revisión bibliográfica de solucións similares ás que se propoñen levar a cabo neste traballo manifesta que o colectivo científico se enfrontou a este tipo de problemas en todo o mundo e, ás veces, a solución tomada foi a de trasladar os restos arqueolóxicos a cotas superiores ás que van estar afectadas pola construción do encoro [18]. No caso que nos ocupa, esta solución non é a máis recomendable, xa que o que se pretende con este traballo é manter a localización orixinal dos restos arqueolóxicos nas inmediacións da Vía Nova, ademais de facilitar a continuidade das escavacións que, como manifestou a serie de catas realizadas polas persoas expertas, ata o momento só se puxeron á vista unha pequena parte do que aínda se esconde no subsolo da zona se estudo.

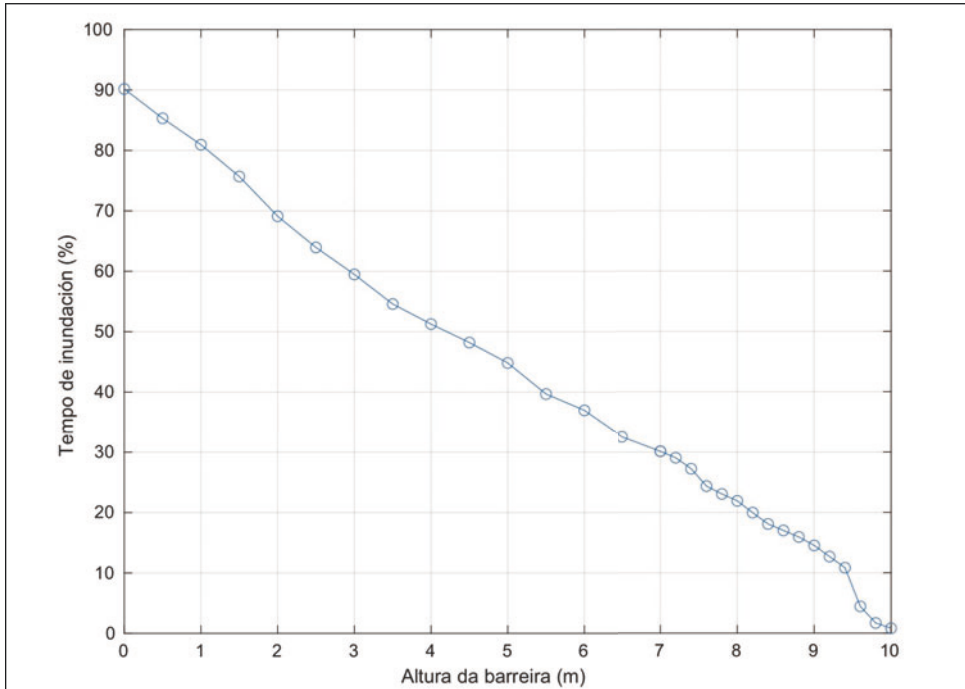
Unha posible solución a este problema é a instalación dunha barreira de protección nas inmediacións do xacemento arqueolóxico. A figura 8 amosa a localización da citada barreira. Solucións similares á proposta formuláronse para protexer cidades fronte a inundacións de orixe mariña como, por exemplo, a *Big U* de Nova York [19] ou os diques de protección instalados nas costas dos Países Baixos.



**Figura 8.** Localización do eixe da barreira de protección do xacemento arqueolóxico Aquis Querquennis

De forma aproximada analizouse o efecto da altura da citada barreira de protección na redución do número de días de asolagamento rexistrada na área de estudo. A figura 9 amosa a redución destes días (en %) en función da altura da barreira.

A figura 9 amosa que a diminución dos días de inundación é case lineal (aproximadamente un 10 % por metro de elevación da barreira) coa altura da barreira desde os 0 ata os 9,5 m. A partir desta altura e ata os 10 m a diminución dos días de inundación é maior ca no rango anterior.



**Figura 9.** Redución de días de inundación en función da altura da barreira de protección

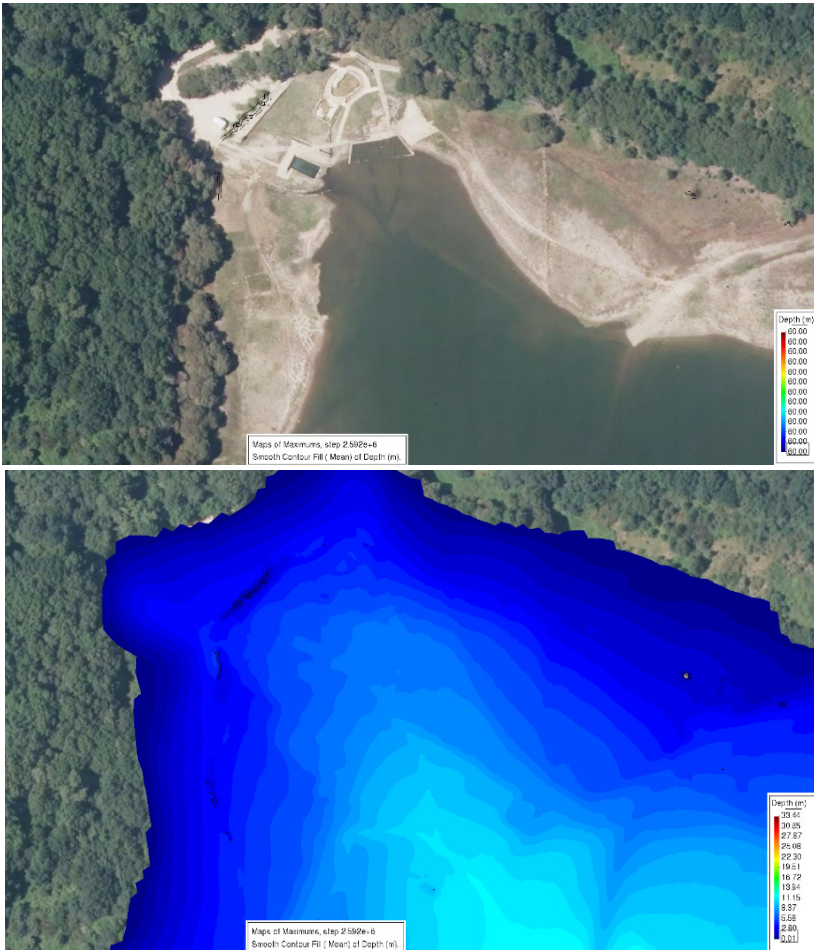
Co fin de analizar máis en detalle o efecto da barreira de protección na zona termal do xacemento arqueolóxico, empregouse o modelo Iber+ para reproducir unha inundación histórica e ver o efecto da barreira. Nun primeiro paso, co fin de verificar a capacidade do código Iber+ para reproducir inundacións deste tipo, reproduciuse a rexistrada o 22 de abril de 2019 sen a barreira de protección. A figura 10 amosa as imaxes correspondentes ao citado evento de inundación. As imaxes do evento foron obtidas por persoas voluntarias.



**Figura 10.** Inundacións rexistradas na zona termal do xacemento Aquis Querquennis o 22/04/2019



Para realizar a simulación numérica definiuse como área de estudo a área comprendida entre a zona arqueolóxica e a presa das Conchas. Como condicións de saída e de entrada no dominio de estudo impuxéronse os caudais de saída da presa e as series de caudais obtidas por medio das variacións de volume almacenado na presa e os caudais de saída desta rexistrados durante os días da inundación, respectivamente. Como condición inicial definiuse a cota de auga correspondente a uns días antes do evento de inundación. Todos os datos de caudais, volumes almacenados e cota de auga da presa obtivéronse por medio da CHMS. Os datos de elevación do terreo obtivéronse a partir dos voos de dron realizados durante este proxecto.



**Figura 11.** Zona termal do xacemento Aquis Querquennis previa á inundación rexistrada o 22/04/2019 (panel superior) e mapa de calados máximos obtido con Iber+ (panel inferior). PNOA cedido polo Instituto Xeográfico Nacional de España

A comparación entre as figuras 10 (imaxes rexistradas durante o evento real) e 11 (panel inferior) amosa que Iber+ é capaz de reproducir as inundacións rexistradas no xacemento arqueolóxico con suficiente exactitude. O panel inferior da figura 11 amosa que a lámina de auga alcanza a zona do aparcadoiro da zona termal (claramente definida no panel superior da figura 11).

Unha vez demostrada a capacidade de Iber+ para reproducir este evento, simulouse o mesmo evento de inundación pero, neste caso, cunha barreira de protección nas inmediacións do xacemento. A barreira segue o esquema amosado na figura 8 e corresponderíase cunha elevación de 10 m sobre o terreo. Os resultados obtidos amósanse na figura 12.



**Figura 12.** Mapa de calados máximos obtido con Iber+ para o evento de inundación rexistrado o 22/04/2019 considerando unha barreira de protección nas inmediacións do xacemento. PNOA cedido polo Instituto Xeográfico Nacional de España

A figura 12 manifesta o efecto conseguido mediante a instalación da barreira de protección. A zona termal do xacemento queda totalmente protexida da inundación. Ademais, como a inundación reproducida numericamente é unha das maiores rexistradas na zona de estudo, podemos considerar que unha barreira destas características se pode considerar como unha solución factible para a protección do xacemento arqueolóxico.

## 4. Conclusións

Neste estudo foi presentado o traballo de análise das inundacións que veñen afectando o complexo arqueolóxico Aquis Querquennis desde a construción do encoro das Conchas. En primeiro lugar, levouse a cabo un traballo de recadación de datos hidrolóxicos e topográficos existentes. En segundo lugar, fíxose un levantamento fotogramétrico da zona de estudo empregando fotografías aéreas tomadas cun UAV. Grazas a isto púidose contar cun modelo dixital do terreo de alta precisión para a análise das inundacións.

Baseándose na análise dos datos dos últimos anos, o complexo vese afectado por inundacións de longa duración, cunha media próxima aos catro meses ao ano. Estas perduran máis na zona das termas ca na zona do campamento romano (case tres meses ao ano). Estas inundacións son irregulares e non se producen todos os anos. En 2012 e 2017 non se inundou o complexo, mentres que en 2015 só se chegou a anegar a zona das termas. Por outra parte, nos anos 2014 e 2016 o complexo estivo asolagado máis de seis meses.

Por último, realizouse unha modelaxe numérica da zona de estudo por medio do modelo Iber+. Grazas a esta ferramenta é posible estudar con precisión a evolución do alcance de eventos de inundación baseándose en datos hidrolóxicos. Unha vez calibrado o modelo, é posible simular diferentes barreiras de protección no perímetro do complexo. Concluíuse que para reducir a cero os días de inundación sería preciso unha barreira a cota 550 m. s. n. m. (metros sobre o nivel do mar), é dicir, un máximo de 10 m de altura. Por outra parte, cunha barreira a 545 m. s. n. m. sería dabondo para reducir aproximadamente o 50 % dos días de inundación.

## 5. Referencias

- [1] ANON. Decreto do DOG nº 185 do 2018/9/27 - Xunta de Galicia. Available at [https://www.xunta.gal/dog/Publicados/2018/20180927/AnuncioG0164-190918-0003\\_gl.html](https://www.xunta.gal/dog/Publicados/2018/20180927/AnuncioG0164-190918-0003_gl.html).
- [2] AGISOFT LLC. (2019). *Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.5*.
- [3] EISENBEISS, H., ZÜRICH, E. T. H., EISENBEISS, H. and ZÜRICH, E. T. H. (2009). *UAV photogrammetry*.
- [4] BLADÉ, E., CEA, L., CORESTEIN, G., ESCOLANO, E., PUERTAS, J., VÁZQUEZ-CENDÓN, E., DOLZ, J. and COLL, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*.

- [5] CEA, L., PUERTAS, J. and VÁZQUEZ-CENDÓN, M. E. (2007). Depth averaged modelling of turbulent shallow water flow with wet-dry fronts. *Archives of Computational Methods in Engineering*.
- [6] CEA, L. and BLADÉ, E. (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research* **51** 5464–86.
- [7] CORESTEIN, G. and BLADÉ, E. (2013). Validación del módulo de transporte de sedimentos de fondo-Modelo Iber. In *III Jornadas Ing. Del Agua La Protección Contra Los Riesgos Hídricos* pp 27–34.
- [8] GARCÍA-FEAL, O., CEA, L., GONZÁLEZ-CAO, J., DOMÍNGUEZ, J. M. and GÓMEZ-GESTEIRA, M. (2020). IberWQ: A GPU Accelerated Tool for 2D Water Quality Modeling in Rivers and Estuaries. *Water* **12** 413.
- [9] CEA, L., BERMÚDEZ, M., PUERTAS, J., BLADÉ, E., CORESTEIN, G., ESCOLANO, E., CONDE, A., BOCKELMANN-EVANS, B. and AHMADIAN, R. (2016). IberWQ: New simulation tool for 2D water quality modelling in rivers and shallow estuaries. *Journal of Hydroinformatics*.
- [10] GARCÍA-FEAL, O., GONZÁLEZ-CAO, J., GÓMEZ-GESTEIRA, M., CEA, L., DOMÍNGUEZ, J. M. and FORMELLA, A. (2018). An accelerated tool for flood modelling based on Iber. *Water (Switzerland)*.
- [11] NVIDIA CORPORATION. (2019). CUDA C Programming Guide. Available at [https://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CUDA\\_C\\_Programming\\_Guide.pdf](https://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CUDA_C_Programming_Guide.pdf).
- [12] CROSSLEY, A. LAMB, R. WALLER, S. (2009). Fast solution of the Shallow Water Equations using GPU technology. *JBA Consulting*.
- [13] VACONDIO, R., DAL PALÙ, A. and MIGNOSA, P. (2014). GPU-enhanced finite volume shallow water solver for fast flood simulations. *Environmental Modelling and Software*.
- [14] LACASTA, A., MORALES-HERNÁNDEZ, M., MURILLO, J. and GARCÍA-NAVARRO, P. (2014). An optimized GPU implementation of a 2D free surface simulation model on unstructured meshes. *Advances in Engineering Software*.
- [15] CRESPO, A. J. C., DOMÍNGUEZ, J. M., ROGERS, B. D., GÓMEZ-GESTEIRA, M., LONGSHAW, S., CANELAS, R., VACONDIO, R., BARREIRO, A. and GARCÍA-FEAL, O. (2015). DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). *Computer Physics Communications* **187** 204–16.
- [16] NVIDIA CORPORATION. (2017). NVIDIA Tesla V100 GPU Architecture. Available at <https://images.nvidia.com/content/volta-architecture/pdf/volta-architecture-whitepaper.pdf>.
- [17] GONZÁLEZ-CAO, J., GARCÍA-FEAL, O., FERNÁNDEZ-NÓVOA, D., DOMÍNGUEZ-ALONSO, J. M. and GÓMEZ-GESTEIRA, M. (2019). Towards an automatic early warning system of flood hazards based on precipitation forecast: the case of the Miño River (NW Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences* **19** 2583–95.

- [18] BROWN, R. (2017). Medieval Turkish Tomb Relocated to Escape Ilisu Dam Flooding. National Geographic. Available at <https://www.nationalgeographic.com/news/2017/05/zeynel-bey-tomb-mausoleum-turkey-relocation-video-dam-flooding-archaeology/>.
- [19] COLLIER, S. J., COX, S. and GROVE, K. (2016). Rebuilding by Design in Post-Sandy New York.Limn. Available at <https://limn.it/articles/rebuilding-by-design-in-post-sandy-new-york/>.