



territorium • 31(I)

REVISTA INTERNACIONAL DE RISCOS | INTERNATIONAL JOURNAL OF RISKS

RISCOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS E SEUS IMPACTES SOCIOAMBIENTAIS

Imprensa da Universidade de Coimbra
Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança

2024

(Página deixada propositadamente em branco)

territorium 31 (I)

Riscos Hidrogeomorfológicos e seus
impactes Socioambientais

*Hydrogeomorphological Risks and their
Socio-environmental impacts*

Janeiro - Junho
2024

FICHA TÉCNICA

Proprietário / Proprietor

RISCOS^o - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança

Redação e administração / Editing and administration

(Toda a correspondência deve ser dirigida a;
Letters should be addressed to):

RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança
Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra
Largo Porta Férrea
3004-530 Coimbra
Portugal
Tel.: +351 239 992 251
E-mail: riscos@riscos.pt

Fotografia da capa / Cover photo

Deslizamento de terra durante as enchentes no bloco Patan, Satara
Landslide during the floods in Patan block, Satara

Fotografia / Photo: Image by वर्षा देशपांडे, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons

Edição / Edition

RISCOS^o - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança
IUC^o - Imprensa da Universidade de Coimbra

Paginação / Formatting and Layout

Mestre Fernando Félix

Resumos e legendas, revisão em inglês / Abstracts and captions, English review

Jean Burrows

Distribuição e Assinaturas / Distribution and Subscriptions:

Venda (vente; sale):

RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança
Número avulso (single issue): 25,00 €

Assinatura anual (dois números + correio);
Annual subscription (2 issues + post charges):
Portugal: 50,00 €; Europa/Europe: 55,00€;
Outros países/Other countries: 60 \$USD

Pré-impressão e Impressão / Print Preview and Printing:

Simões & Linhares, Lda.
Rua do Fetal, Lote 5, 3020-923 Coimbra

Periodicidade / Periodicity

Semestral / Biannual

Tiragem / Print run

550 exemplares

Público alvo / Target audience

Professores, Agentes de Proteção Civil, Autarcas, Estudantes e Cidadãos.
Teachers, Civil Protection Agents, Politicians, Students and Citizens.

Arbitragem / Peer-review

Os artigos submetidos para publicação são sujeitos a revisão por dois especialistas
Articles submitted for publication are subject to review by two experts (double-blind)

Depósito Legal n.º 106376/96

ISSN Digital: 1647-7723

ISSN: 0872-8941

DOI: <https://doi.org/10.14195/1647-7723>

URL:

<https://territorium.riscos.pt/>
<https://digitalis.uc.pt/en/revista?id=107789&sec=5>
<http://impactum-journals.uc.pt/index.php/territorium>

Indexada em / Indexed in

CiteFactor, Dialnet; DOAJ; ERIH-PLUS; Europub database; Latindex; MIAR (Annual ICDS 2019: 4.4); Open Academic Journals Index (CGIJ OAJI: 0,150); Qualis da CAPES (2013-2016); REDIB; SJIF - Scientific Journal Impact Factor; Sherpa Romeo | ReviewerCredits

Apoios:
Sponsors:





NOTA DE ABERTURA

As últimas décadas evidenciam um aumento da frequência de catástrofes naturais a nível mundial, com destaque para as de origem hidrogeomorfológica. O aumento da frequência e magnitude das catástrofes associadas a cheias e movimentos em massa em vertentes, consequência das alterações climáticas e, sobretudo, de um incorreto uso e ocupação do solo, têm originado um aumento da exposição de pessoas e bens face ao risco, constando entre as mais destrutivas, quer em termos sociais quer em termos ambientais.

A necessidade de melhorar a nossa compreensão e proteção em relação à manifestação destes fenómenos tem vindo a ser salientada, tornando-se um desafio cada vez mais urgente para os académicos, decisores políticos, bem como para os profissionais do risco e da proteção civil. “*Riscos Hidrogeomorfológicos e seus impactes Socioambientais*” é o tema no número 31(I) da revista *Territorium* que inclui seis artigos, três notas, três notícias e uma revisão.

Estamos certos de que também este número da *Territorium* contribuirá para o conhecimento mais profundo dos fenómenos desencadeadores dos riscos estudados, assim como da análise, avaliação e redução das vulnerabilidades existentes, quer nas áreas onde eles se podem manifestar, quer nas populações que sofrerão diretamente os seus efeitos.

Reconhecendo o crescente papel da Educação na redução do risco, destacam-se duas notícias; a primeira, relativa aos contributos das práticas educativas na era dos desastres, vencedora do prémio CAPES ensino; a segunda, em que se celebram os 30 anos do PROSEPE (PROjeto de Sensibilização e Educação da População Escolar). Dois exemplos que mostram o, indiscutível, papel da Educação na formação de cidadãos mais conscientes e mais bem preparados para prevenir os riscos e perceber os perigos.

INTRODUCTORY NOTE

Recent decades have shown an increase in the frequency of natural disasters worldwide, with emphasis on those of hydrogeomorphological origin. The greater frequency and magnitude of disasters associated with floods and mass movements on slopes are a consequence of climate change and, above all, of the incorrect use and occupation of land. The result has been an increase in the exposure of people and property to risk, making such disasters among the most destructive, in both social and environmental terms.

The need to improve our understanding and protection in relation to the manifestation of these phenomena has been highlighted. They are becoming an increasingly urgent challenge for academics, policy makers, and risk and civil protection professionals. “*Hydrogeomorphological Risks and their Socio-Environmental Impacts*” is the theme in issue 31(I) of *Territorium* journal, which includes six articles, three notes, three news items, and a review.

We are certain that this issue of *Territorium* will also contribute to a deeper understanding of the phenomena that trigger the risks studied. It will also benefit the analysis, assessment, and reduction of existing vulnerabilities, both in the areas where they can develop and in the populations that will directly suffer their effects.

Recognizing the growing role of Education in reducing risk, two pieces of news stand out. The first relates to the contributions of educational practices in the era of disasters, winner of the CAPES teaching award; the second celebrates the 30th anniversary of PROSEPE (Project for Awareness and Education of the School Population). Two examples that show the indisputable role of Education in creating citizens who are more aware and thus better prepared to prevent risks and perceive dangers.

(Página deixada propositadamente em branco)



RISCOS

territorium 31 (I), 2024, 5-18

journal homepage: <https://territorium.riscos.pt/numeros-publicados/>

DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_31-1_1

Artigo científico / Scientific article



SUSCEPTIBILIDAD A INESTABILIDAD DEL TERRENO DERIVADA DEL CRECIMIENTO URBANO
EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO, MÉXICO*

SUSCEPTIBILITY TO GROUND INSTABILITY ARISING FROM URBAN GROWTH
IN THE CITY OF QUERÉTARO, MÉXICO

Rocio Marisol Alanís Anaya

Universidad Nacional Autónoma de México

Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras (México)

0000-0001-5899-8465 rocioalanis@filos.unam.mx

RESUMEN

La ciudad de Querétaro ha tenido un crecimiento urbano constante desde 1970 abarcando nuevos espacios en áreas con relieve suavizado y que presentan un cambio de uso de suelo urbano intensivo y extensivo en los últimos tres años. Es por ello que este trabajo muestra la asociación entre la susceptibilidad a inestabilidad del terreno y el crecimiento urbano en un relieve poco abrupto. Para ello, se siguió una metodología que integra el análisis del crecimiento urbano, la identificación de la susceptibilidad a inestabilidad del terreno a partir de factores condicionantes y desencadenantes y la recopilación de evidencia documental y con trabajo de campo de eventos de inestabilidad del terreno. Los resultados indican que en la ciudad de Querétaro hay un crecimiento urbano horizontal fuera del graben queretano y un crecimiento vertical en el que destaca la construcción de nuevos edificios de más de 12 pisos en zonas con alta y muy alta susceptibilidad a inestabilidad del terreno.

Palabras clave: Cambio de uso de suelo, procesos gravitacionales, subsidencia del terreno, relieve suavizado.

ABSTRACT

The city of Querétaro has seen constant urban growth since 1970, occupying new spaces in areas with smooth relief which have undergone intensive and extensive urban land use change in the last three years. Thus, this work shows the association between the susceptibility to ground instability and urban growth in relief that is not particularly steep. For this, a methodology that combines the analysis of urban growth, the identification of susceptibility to ground instability with conditioning and triggering factors, and the compilation of documentary evidence and field work for the identification of ground instability was implemented. The results indicate that in the city of Querétaro there is a horizontal urban growth outside the Querétaro Graben together with vertical growth where the construction of buildings with more than 12 floors stands out in areas where the terrain has high and very high susceptibility.

Keywords: Land use change, gravitational processes, ground subsidence, smooth relief.

* O texto deste artigo foi submetido em 29-10-2022, sujeito a revisão por pares a 31-10-2022 e aceite para publicação em 26-12-2022.

Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 31 (I), 2024, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introducción

El establecimiento de campos de cultivo y el crecimiento de zonas urbanas son factores desencadenantes de inestabilidad del terreno, ya que ambos usos de suelo requieren la remoción de la cubierta vegetal natural, dejando al relieve expuesto y contribuyendo a la aceleración de los procesos erosivos en regiones que poseen pendientes pronunciadas y precipitaciones intensas (Chen y Huang, 2013; Kipkosgei-Kilimo, 2014; Legorreta Paulín *et al.*, 2014; Reichenbach *et al.*, 2014; Alanís Anaya *et al.*, 2017).

Si bien el crecimiento urbano no es la principal causa de deforestación, sí forma parte de la secuencia de transformación del paisaje al ocupar los campos de cultivo que fueron abandonados por desertificación o cambios socioeconómicos de la población (Myers y Kent, 2001; Lambin y Geist, 2006). Asimismo, el vivir en ciudades representa el acceso a servicios y empleos mejor remunerados, por lo que la oferta de viviendas se da en las zonas más cercanas a las zonas urbanas, dejando en segundo plano la elección del relieve adecuado para su edificación (Saavedra, 2010; Mendoza-Mamani, 2021).

Por consiguiente, estos cambios de uso de suelo constituyen una parte inherente del modelado hídrico local del terreno, favoreciendo procesos de erosión pluvial, erosión laminar, erosión lineal y flujos subsuperficiales, los cuales no solo deterioran al relieve sino también a la misma infraestructura que se implementó para establecer las zonas urbanas (Schaeztl y Anderson, 2005; Alayo y Villegas-Lanza, 2021; Mendoza-Mamani, 2021).

Ejemplos de lo anterior ocurrieron en 2011 en La Paz, Bolivia, cuando debido a las lluvias intensas se produjo un megadeslizamiento y colapsaron 400 viviendas al este de la ciudad (Pampahasi Central Bajo, 23 de Marzo, Metropolitana, Cervecería, Valle de las Flores, Kallapa y Kupini II); y en 2019 en el sector de San Jorge Kantutani donde se generó un deslizamiento que destruyó 68 viviendas que habían sido establecidas sobre un antiguo basurero (EA Bolivia, 2011; ABE, 2019; Mendoza-Mamani, 2021). Otro ejemplo es el acontecido al norte de la zona conurbada de la Ciudad de México en 2021, cuando después de un periodo de lluvias intensas colapsó parte de la ladera del Cerro del Chiquihuite y se desplazaron 200 toneladas de roca volcánica sobre al menos 10 viviendas (El Universal, 2021; Garnica-Peña, 2022).

En dichos casos se observa que la mala planificación urbana, las fuertes precipitaciones y el descuido de las autoridades dieron como resultado escenarios de desastre que vinculan el uso de suelo urbano con la inestabilidad del terreno. También resulta pertinente mencionar que los estudios que muestran las evidencias de dicha relación se centran en regiones con relieve

abrupto, de manera que es necesario evaluar aquellos paisajes con relieves suavizados que también presenten modificaciones intensivas y extensivas en su uso de suelo que puedan estar expuestos al incremento de las precipitaciones causado por el cambio climático.

Por estas razones el presente estudio se centra en la ciudad de Querétaro, en la cual destacan dos etapas de crecimiento acelerado; la primera entre 1970 y 1990 cuando la densidad poblacional decreció de 100 a 52.9 habitantes por hectárea, que en términos de superficie significa un incremento de 975.72 a 3,445.93 hectáreas; en tanto que para la segunda etapa de 1990 a 2020 se estima que multiplicó su tamaño 2.64 veces y alcanzó 24,271.02 hectáreas. Además, para 2018 se tenía una oferta del 85.5% en casas-habitación como opción de vivienda, lo que implica que la ciudad seguirá aumentando hacia las periferias (Delgado, 1993; AM Querétaro, 2021; Crea Soluciones, 2019; IMPLAN, 2020). Siendo así, el objetivo de este trabajo es evaluar la susceptibilidad a la inestabilidad del terreno derivada del crecimiento urbano en un relieve suavizado con modificaciones intensivas y extensivas del paisaje, considerando factores condicionantes (topográficos y geológicos) y desencadenantes (hidrometeorológicos y antrópicos) con la finalidad de identificar sitios susceptibles para atenuar los peligros implícitos y generar una conciencia de planeación urbana.

Área de estudio

La ciudad de Querétaro se localiza en los límites de los estados de Querétaro y Guanajuato (fig. 1), al sur del Bajío Mexicano. Tiene una población de 2,368,467 habitantes y una superficie de 24,271.02 hectáreas conformada por los municipios de Querétaro, El Marqués, Corregidora y Huimilpan en el estado de Querétaro y Apaseo el Alto en el estado de Guanajuato (IMPLAN, 2020; INEGI, 2021a).

Su clima es semiseco templado con lluvias en los meses de mayo a septiembre, la precipitación media anual varía de 4.1 a 134.9 mm y la temperatura media anual se encuentra entre 15.3°C y 22.8°C (CONAGUA-SMN, 2022). En términos generales, la vegetación predominante corresponde al matorral xerófilo (matorral crasicaule y matorral espinoso) y vegetación secundaria de bosque tropical caducifolio (Cabrera-Luna y Gómez-Sánchez, 2005).

La ciudad se ubica al interior de la cuenca Lerma-Chapala en el límite centro-norte del eje neovolcánico; su superficie se distribuye dentro de un graben que está delimitado por fallas normales al occidente, oriente, norte y sur. Posee depósitos sedimentarios y se rodea de micro-mesetas y depósitos volcánicos. En los estratos superficiales destaca un relleno antropogénico de 1 m de espesor de arena, seguido de estratos de arcillas expansivas de origen fluvial y lacustre con espesores

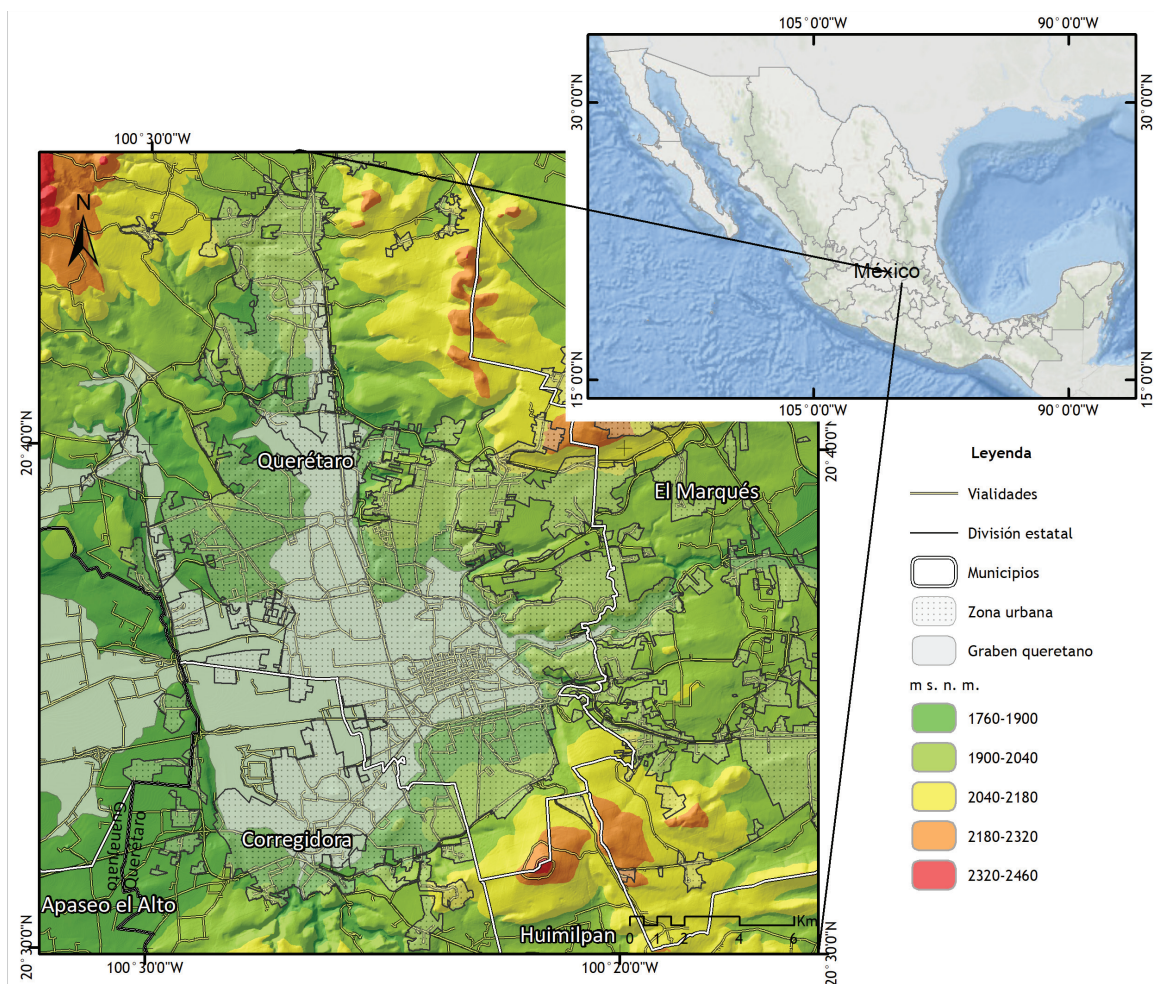


Fig. 1 - Localización de la ciudad de Querétaro (Elaboración propia a partir de datos del INEGI, 2020).

Fig. 1 - Location of the city of Querétaro (Own elaboration based on data from INEGI, 2020).

de entre 1 y 6 m. Cabe mencionar que el relleno antropogénico se colocó para reducir las afectaciones que pudieran ocurrir en las viviendas debido a la expansión y contracción de los depósitos arcillosos (Navarro, 1986; Aguirre-Díaz, 2000; Carreón Freyre et al., 2005).

Metodología

Para evaluar la susceptibilidad a inestabilidad del terreno derivada del crecimiento urbano en la ciudad de Querétaro, se determinó el crecimiento de la zona urbana entre 1990 y 2022; posteriormente se realizó la identificación de áreas susceptibles a inestabilidad de terreno a partir de variables cartográficas correspondientes a factores condicionantes (topográficos y geológicos) y desencadenantes (hidrometeorológicos y antrópicos). Con esta información se recabaron evidencias de los procesos de inestabilidad de terreno a partir de medios digitales de comunicación y trabajo de campo. A continuación, se describe la metodología detallada.

Determinación del crecimiento urbano entre 1990 y 2022

Este proceso consistió en la georreferenciación de imágenes del territorio obtenidas del historial de imágenes de *Google Earth* (1990, 2000, 2010 y 2022). Para ello se descargaron 9 escenas del territorio para cada año y se les asignaron coordenadas por medio de puntos de control utilizando la herramienta Georreferenciador del *software* Qgis. Posteriormente las imágenes se fusionaron en un mosaico por medio de la herramienta Combinar del mismo *software*.

El siguiente paso fue retomar los marcos geoestadísticos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), específicamente la cartografía de las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) urbanas y rurales para los años 2000, 2010 y 2020, las cuales muestran en formato vectorial a las unidades territoriales creadas como base para el control de levantamientos de censos de información demográfica y socioeconómica en campo. En Qgis se sobrepusieron las AGEB a las imágenes de

Google Earth y se identificaron áreas de infraestructura que no estaban delimitadas en los polígonos de los años 2000 y 2010, así que se procedió a completar su delimitación por medio de fotointerpretación digital. Para la delimitación de la zona urbana de 2022 se usó la capa vectorial de 2020 y se completó por medio de una fotointerpretación digital con la imagen de *Google Earth* de 2022. Cabe mencionar que debido a que la disponibilidad de las AGEB se tiene a partir del año 2000, se tuvo que realizar una clasificación supervisada a la imagen de *Google Earth* de 1990 y con ello se obtuvo el polígono de la ciudad para ese año.

Susceptibilidad a inestabilidad del terreno

La evaluación se realizó utilizando Qgis y tomando como referencia un análisis multicriterio ponderado que considera factores condicionantes y desencadenantes en una región con relieve abrupto y cambio de suelo intensivo (Saaty, 2008; Alanís Anaya *et al.*, 2017). La adecuación para el presente trabajo integra variables geológicas e hidrometeorológicas propias de la ciudad de Querétaro y considera escenarios de inestabilidad de terreno en un área con relieve suavizado y un uso de suelo urbano extensivo e intensivo. Es por ello que en este análisis se integraron factores condicionantes topográficos (pendientes, disección vertical del terreno y cercanía a ríos y escorrentías) y geológicos (unidades geológicas y fallas y fracturas geológicas); así como factores desencadenantes hidrometeorológicos (erosividad de lluvias y concentración de precipitación) y antrópicos (uso de suelo y vegetación, y caminos y vialidades).

La obtención de los factores condicionantes topográficos se realizó a partir de un modelo digital de elevación (MDE) con resolución de 15 m (INEGI, 2013). Con él se obtuvieron las pendientes en grados de inclinación usando la herramienta Pendiente. En la disección vertical del terreno se agregó una gradilla de 1 km² para medir la altitud relativa e identificar sitios abruptos en el relieve. Para la cercanía a ríos y escorrentías se digitalizaron las corrientes hídricas a partir de un sombreado del MDE, las curvas de nivel con una equidistancia de 10 m y la imagen de *Google Earth* de 2022; a la capa resultante se le aplicó un *buffer* de 50 m considerando la posible influencia lateral en la inestabilidad de terreno. Los factores condicionantes geológicos (unidades geológicas y fallas y fracturas geológicas) se obtuvieron de la digitalización de la cartografía geológica de Carreón Freyre *et al.* (2005).

En el caso de la elaboración de los factores desencadenantes hidrometeorológicos se consideró evaluar cuál es el impacto de la precipitación en el relieve. Para ello, se partió de datos de precipitación diaria para el periodo del 1 de enero de 1990 al 31 de diciembre de 2021 descargados del Servicio Meteorológico Nacional

para las estaciones climatológicas de Ameche, El Obraje, Eta Carrillo, El Batán, El Pueblito, Juriquilla, Plantel 7, Querétaro DGE y Querétaro Obs (CONAGUA-SMN, 2022); no obstante, dado que en las estaciones se identificaron datos faltantes (20% del total de días) se procedió a realizar una reconstrucción de datos de precipitación con el método de razones promedio (Ecuación 1) (Pizarro *et al.*, 2003).

$$PX = \frac{\overline{PX}}{N} * \frac{PA}{PA} + \frac{PB}{PB} + \dots + \frac{PN}{PN} \quad (1)$$

Donde:

Px = Razón promedio

$\frac{\overline{PX}}{N}$ = Promedio de precipitaciones en la estación de interés entre N estaciones de validación

$\frac{PA}{PA} + \frac{PB}{PB} + \dots + \frac{PN}{PN}$ = Precipitación en estación de validación entre el promedio total de la misma

Para evaluar la erosividad por lluvias, con los valores de precipitación completos se calculó el Índice de Fournier Modificado (IFM) que relaciona la suma de lluvia mensual y la lluvia anual (Ecuación 2) (Arnoldus, 1980; Lobo *et al.*, 2005).

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} (p^2/P) \quad (2)$$

Donde

IFM = Índice de Fournier Modificado (mm)

p = Lluvia mensual (mm)

P = Lluvia anual (mm)

Asimismo, también se calculó el Índice de Concentración de la Precipitación (ICP) que estima la incidencia y agresividad de la precipitación estacional sobre la erosión del suelo (Ecuación 3) (Oliver, 1980; Velasco y Cortes, 2009).

$$ICP = 100 \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{p^2} \quad (3)$$

Donde

ICP = Índice de Concentración de la Precipitación (%)

p = Lluvia mensual (mm)

P = Lluvia anual (mm)

Una vez obtenidos los datos del IFM e ICP, se hizo un promedio de los resultados de cada estación climatológica y se integraron a una capa vectorial para realizar una interpolación de Kriging, la cual permitió conocer la distribución de la erosividad, incidencia y agresividad de la lluvia en el relieve de la ciudad de Querétaro.

Para los factores desencadenantes antrópicos se utilizaron dos capas vectoriales del INEGI. En el caso de uso de suelo y vegetación, se descargó la serie VII de uso de suelo y vegetación escala 1:250,000 (INEGI, 2021b), y con la imagen de *Google Earth* 2022 y el polígono derivado de ella, se delimitaron los elementos espaciales más recientes, para actualizar y aumentar la escala de

resolución de las entidades incluidas en el uso de suelo y vegetación de la capa vectorial. Para obtener el factor desencadenante de caminos y vialidades se usó la capa Red Nacional de Caminos 2021 a escala 1:50,000; de ella se tomaron los datos vectoriales correspondientes a las vialidades primarias para la ciudad de Querétaro y áreas circundantes. Dicha capa se sobrepuso a la imagen de *Google Earth 2022* y se actualizó la información sobre caminos pavimentados primarios y de principales terracerías, para posteriormente aplicar un *buffer* de 50 m para evaluar la influencia que tiene la distancia a las principales vialidades y caminos con la inestabilidad del terreno.

Derivado de los procesos anteriores, todas las capas asociadas a factores condicionantes y desencadenantes se reclasificaron de acuerdo a las clases internas de cada factor, y a cada capa vectorial se le asignaron los pesos ponderados correspondientes a cada clase, resultantes de matrices de jerarquización analítica (Roa, 2007). Estas matrices se elaboraron considerando la contribución de cada clase en la inestabilidad del terreno. Las capas resultantes se reclasificaron nuevamente utilizando el módulo *r.reclass* en Qgis a partir de los pesos ponderados por clase y en el mismo proceso se obtuvieron capas categorizadas en formato raster con 10 m de resolución.

Por último, para obtener la cartografía de susceptibilidad a inestabilidad del terreno derivada del crecimiento urbano en la ciudad de Querétaro, las capas raster generadas se sometieron a una suma lineal ponderada utilizando los pesos relativos para cada grupo de factores condicionantes (topográficos y geológicos) y desencadenantes (hidrometeorológicos y antrópicos), los cuales se calcularon a partir de los pesos ponderados por clase. La ecuación se construyó de la siguiente forma:

$$\text{Susceptibilidad} = [\text{Top} \cdot \text{PRG}\%] + [\text{Geo} \cdot \text{PRG}\%] + [\text{Hidrom} \cdot \text{PRG}\%] + [\text{Antrop} \cdot \text{PRG}\%]$$

Donde:

Top = Factores condicionantes topográficos

Geo = Factores condicionantes geológicos

Hidrom = Factores desencadenantes hidrometeorológicos

Antrop = Factores desencadenantes antrópicos

PRG% = Peso relativo de grupo (%)

Recopilación de evidencia en medios digitales de comunicación y trabajo de campo

Para poder corroborar los resultados de la cartografía de susceptibilidad a inestabilidad del terreno derivada del crecimiento urbano en la ciudad de Querétaro, por un lado, se recopilaron notas de medios digitales de comunicación (octubre de 2017 a julio de 2022) que incluían noticias de portales periodísticos y videos subidos a redes sociales, los cuales estaban relacionados con algún evento de inestabilidad del terreno asociado a la temporada de lluvias.

Por otro lado, se realizó un trabajo de campo durante el mes de mayo de 2022, en el que se visitaron a pie y en automóvil las áreas marcadas con mayor susceptibilidad a inestabilidad del terreno; con ello se identificaron y georreferenciaron los puntos donde se encontró evidencia de erosión fluvial, caída de rocas, flujos de lodo, flujos de escombros, deslizamientos y subsidencias.

Resultados y discusión

Si bien el crecimiento urbano de la ciudad de Querétaro se ha evaluado en otros trabajos, su análisis se ha realizado a partir del Marco Geoestadístico del INEGI (Delgado, 1993; Implan, 2020; Oropeza y Leyva, 2020), lo que implica que la representación del área urbana sea una generalización cartográfica de manzanas o áreas de superficie variable que componen las AGEB, y por ende algunos elementos espaciales con uso de suelo urbano puedan no verse representadas en los polígonos vectoriales. No obstante, para el presente trabajo, los polígonos de dichas AGEB fueron el referente para conocer los límites del uso de suelo urbano y del uso de suelo rural que se integró a la ciudad, así como para identificar la aceleración del crecimiento urbano.

Es por ello que se realizó una fotointerpretación digital con imágenes de *Google Earth* para complementar la información del INEGI, y obtener datos más precisos de la superficie que abarca la zona urbana en la ciudad de Querétaro. Siendo así, en el análisis de este trabajo se observó que entre 1990 y 2022 la ciudad de Querétaro tuvo un incremento notable de su superficie urbana pasando de 4,698.63 a 27,053.42 hectáreas (fig. 2). Lo anterior implica que en 32 años la ciudad de Querétaro aumentó su tamaño un 575.77% con respecto al año 1990.

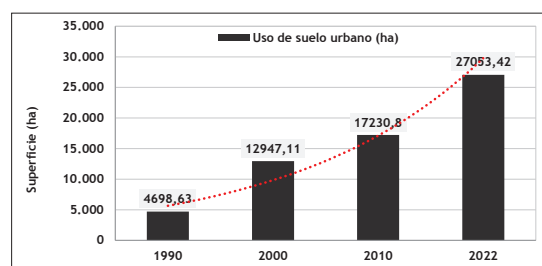


Fig. 2 - Crecimiento urbano de la ciudad de Querétaro entre 1990 y 2022.

Fig. 2 - Urban growth of the city of Querétaro between 1990 and 2022.

Al evaluar los datos por periodos, se puede observar que el crecimiento más acelerado ocurrió entre 1990 y el año 2000 con un 175.55%. No obstante, a pesar de que en el periodo del 2000 al 2010 el aumento solo fue del 33.09%, para el periodo de 2010 a 2022 el porcentaje de crecimiento volvió a subir y alcanzó un 57.01% (TABLA I).

TABLA I - Periodos de crecimiento urbano en la ciudad de Querétaro entre 1990 y 2022.

TABLE I - Periods of urban growth in the city of Querétaro between 1990 and 2022.

Periodo	Superficie de crecimiento (ha)	Crecimiento anual (ha)	Porcentaje de crecimiento (%)
1990-2000	8,248.48	824.85	175.55
2000-2010	4,283.69	428.37	33.09
2010-2022	9,822.62	818.55	57.01

Por su parte, en el análisis espacial del crecimiento urbano destaca que en el año 1990 había muchos polígonos pequeños que se encontraban separados del núcleo urbano de la ciudad, los cuales para el año

2000 ya estaban incorporados a la mancha urbana, además de que se comenzó a construir hacia las laderas volcánicas que bordean el graben queretano. También es evidente que el crecimiento urbano para 2010 se mantuvo principalmente hacia los bordes del polígono correspondientes al año 2000. Sin embargo, para el año 2022 se observa que el crecimiento fue mayor e incluso hay una alta incidencia de polígonos urbanos de considerables dimensiones que no están conectados a la mancha urbana principal (fig. 3).

En este punto es necesario mencionar que la ciudad de Querétaro ocupa el quinto lugar en la lista de las principales ciudades del futuro en Latinoamérica (fDi Financial Times, 2021) y uno de los motivos es su

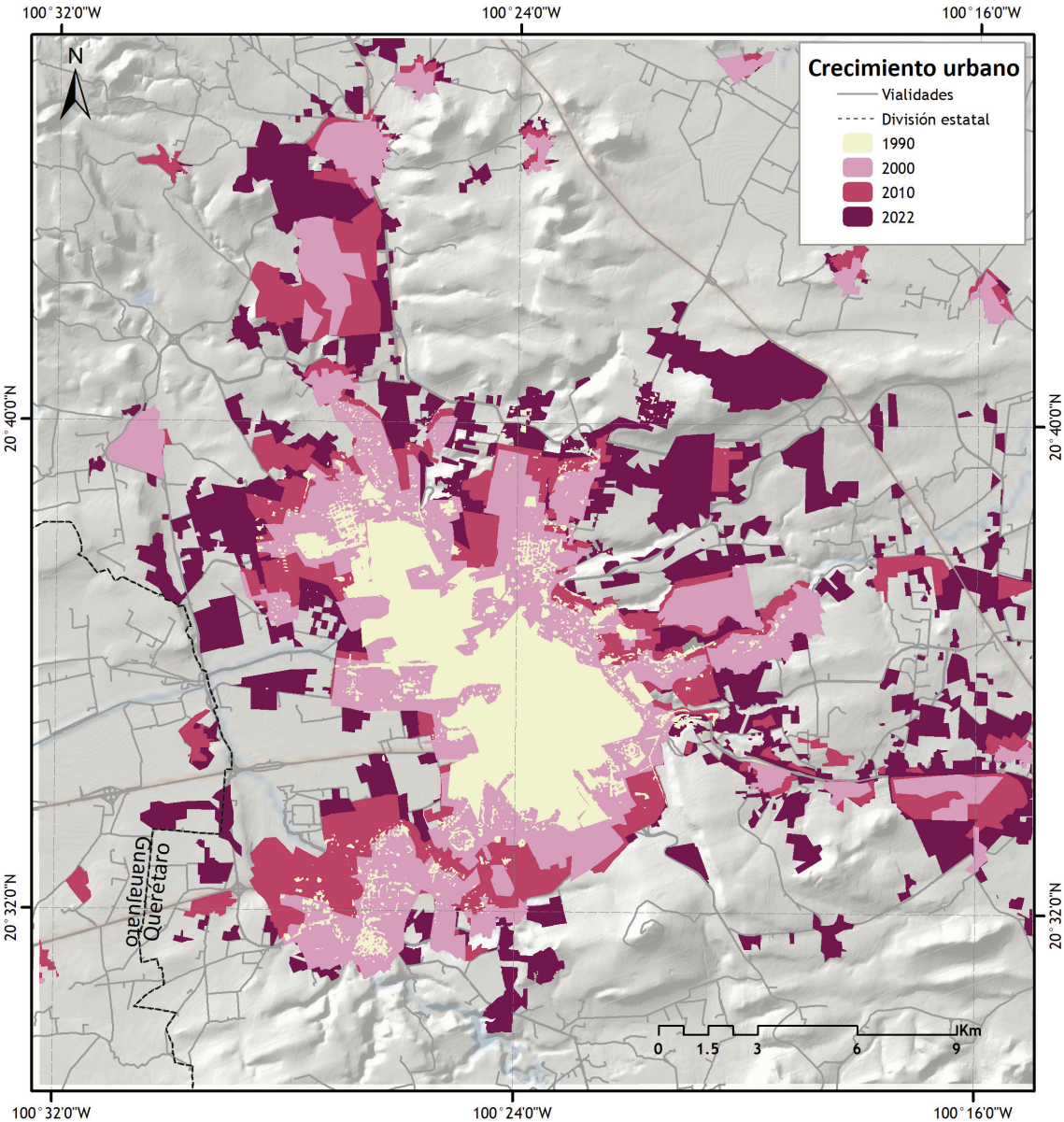


Fig. 3 - Cartografía del crecimiento urbano en la ciudad de Querétaro.

Fig. 3 - Map of urban growth in the city of Querétaro.

conectividad urbana. La secuencia lógica de crecimiento urbano apunta a la urbanización de las áreas que se ubican entre la mancha urbana principal y los polígonos urbanos que aún permanecen aislados, por lo que se puede esperar una mayor modificación del relieve para esas zonas.

Antes de abordar la susceptibilidad a inestabilidad del terreno, es necesario mencionar que el área de estudio para evaluar los factores condicionantes y desencadenantes en la ciudad de Querétaro fue de 29 km²; esto es para poder analizar la influencia de dichos factores dentro y fuera del polígono urbano de la ciudad y así poder identificar los sitios con menor susceptibilidad a inestabilidad del terreno y facilitar un futuro ordenamiento territorial.

Dicho lo anterior, a continuación se describen los factores condicionantes topográficos: en el caso de las pendientes se observan inclinaciones de 0 a 50°; las diferencias de altitud relativa mínima van de 0 a 331 m/km² y la presencia de ríos y escorrentías ocurre principalmente en las laderas y drenes de concreto y roca que encausan las corrientes al interior del graben. Por su parte en los factores condicionantes geológicos se observaron las siguientes unidades: andesitas y basaltos del Mioceno Tardío (48,383 ha); calizas con intercalaciones de lutitas y areniscas (196 ha); riolita/toba riolítica (116 ha); rocas volcánicas Mioceno Inferior 2,053 ha); secuencia sedimentaria de conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas (14,552 ha); secuencia de tobas, gravas, arenas y arcillas con abundantes materiales piroclásticos (24,575 ha); toba riolítica/toba dacítica (2,388 ha) y una unidad volcánica de composición intermedia a básica (2,316 ha) (Carreón Freyre *et al.*, 2005). Respecto a las fallas y fracturas geológicas se observó la presencia de un sistema de 24 fallas y 17 fracturas cuya distribución enmarca los límites del graben queretano (Carreón Freyre *et al.*, 2005).

En relación a los factores desencadenantes hidrometeorológicos, se obtuvieron valores del Índice de Fournier Modificado de entre 100 y 146 mm, lo que acuerdo con la

escala de Lobo *et al.* (2005), indica erosividad moderada y alta. En tanto que el Índice de Concentración de la Precipitación muestra datos que van de 20.74 a 24.36% y señalan que la precipitación sobre la erosión del suelo es altamente estacional según la escala de Oliver (1980). En este punto cabe mencionar que la distribución temporal de lluvias entre 1990 y 2021 (fig. 4) muestra incrementos de precipitación anual acumulada importantes cada 10 a 12 años aproximadamente; lo anterior es necesario que se considere ya que podría tratarse de ciclos en los cuales dichos aumentos en la cantidad de lluvia pueden ocasionar inundaciones y mayor presencia de eventos de inestabilidad del terreno.

En el factor desencadenante antrópico de uso de suelo y vegetación se observaron las siguientes clases: asentamiento humano (28,465 ha), agricultura (42,480 ha), cuerpos de agua (259 ha), matorral crasicaule (6,371 ha), pastizal inducido (1,126 ha), suelo desnudo (208 ha) y vegetación secundaria de selva baja caducifolia (15,795 ha). Por último, en el factor desencadenante antrópico de caminos y vialidades se consideró la presencia de 274 km de vialidades primarias y principales terracerías, aunque en la región existen 2,643 km; esta selección fue para evitar la sobreestimación de este factor.

Derivado de la asignación de pesos ponderados a partir de matrices de jerarquización analítica (Anexo I), el peso relativo por grupo de factores fue mayor en los factores condicionantes topográficos (29.29%), le siguen los factores condicionantes geológicos (25.94), los factores desencadenantes antrópicos (25.24%) y los factores desencadenantes hidrometeorológicos (19.53%); destacando que el aporte de los factores desencadenantes antrópicos está casi al mismo nivel que el factor condicionante geológico, lo que indica que el uso de suelo y las vialidades sí tienen un peso significativo en la inestabilidad del terreno para la ciudad de Querétaro (Anexo II).

A partir de los resultados de la suma lineal ponderada para evaluar la inestabilidad del terreno, se puede observar que

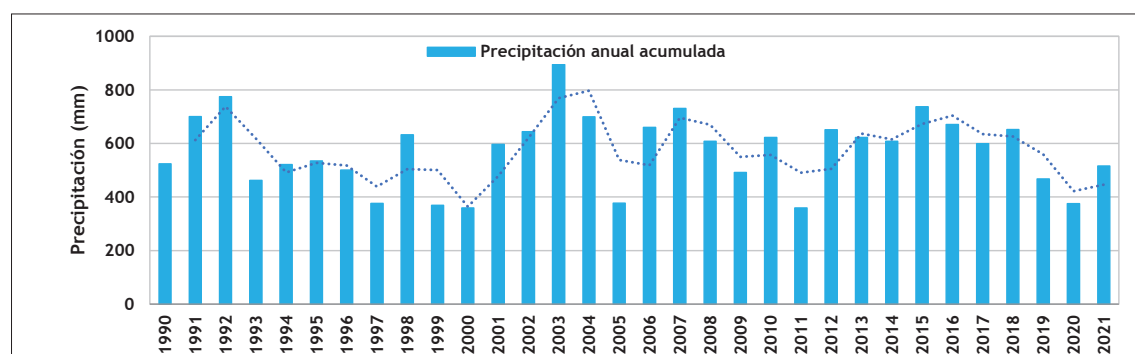


Fig. 4 - Distribución espacial de la precipitación anual acumulada en la ciudad Querétaro (1990-2021).

Fig. 4 - Spatial distribution of the accumulated annual precipitation in the city of Querétaro (1990-2021).

en la región existe una mayor distribución de áreas con susceptibilidad baja (37,014 ha); le siguen la susceptibilidad moderada (23,254 ha) y la susceptibilidad muy baja (18,719 ha). No obstante, existen superficies de 7,187 ha con susceptibilidad alta y 3,238 ha con susceptibilidad muy alta, las cuales corresponden a sitios con mayor pendiente, en polígonos urbanos sobre las micro-mesetas ubicadas al este de la ciudad y en áreas cercanas a ríos y caminos. Asimismo, los resultados de la cartografía anterior indican que los municipios con mayor superficie de alta y muy alta susceptibilidad a inestabilidad del terreno son Corregidora, El Marqués y Querétaro (fig. 5).

Para complementar los resultados anteriores, se documentó la evidencia de 28 eventos asociados a inestabilidad del terreno por uso de suelo a través de

medios digitales de comunicación y trabajo de campo. Se identificaron 4 eventos de erosión fluvial que incluyen la presencia de rocas con alto grado de intemperismo, cárcavas bajo los restos de un local inmobiliario y la colocación de gaviones en una ladera donde se está construyendo un edificio de 15 pisos. También se encontraron 12 sitios con caída de rocas en los que se observaron bloques en riesgo de caer o ya desprendidos en laderas intervenidas y modificadas hasta con 90° de inclinación para avances laterales de construcciones de edificios y en un caso con la construcción de una barda perimetral en el borde la ladera, bloques removidos en perturbaciones recientes para terraseo de laderas y caída de bloques en laderas con perturbaciones antiguas. Se documentó la presencia de un flujo de lodo que

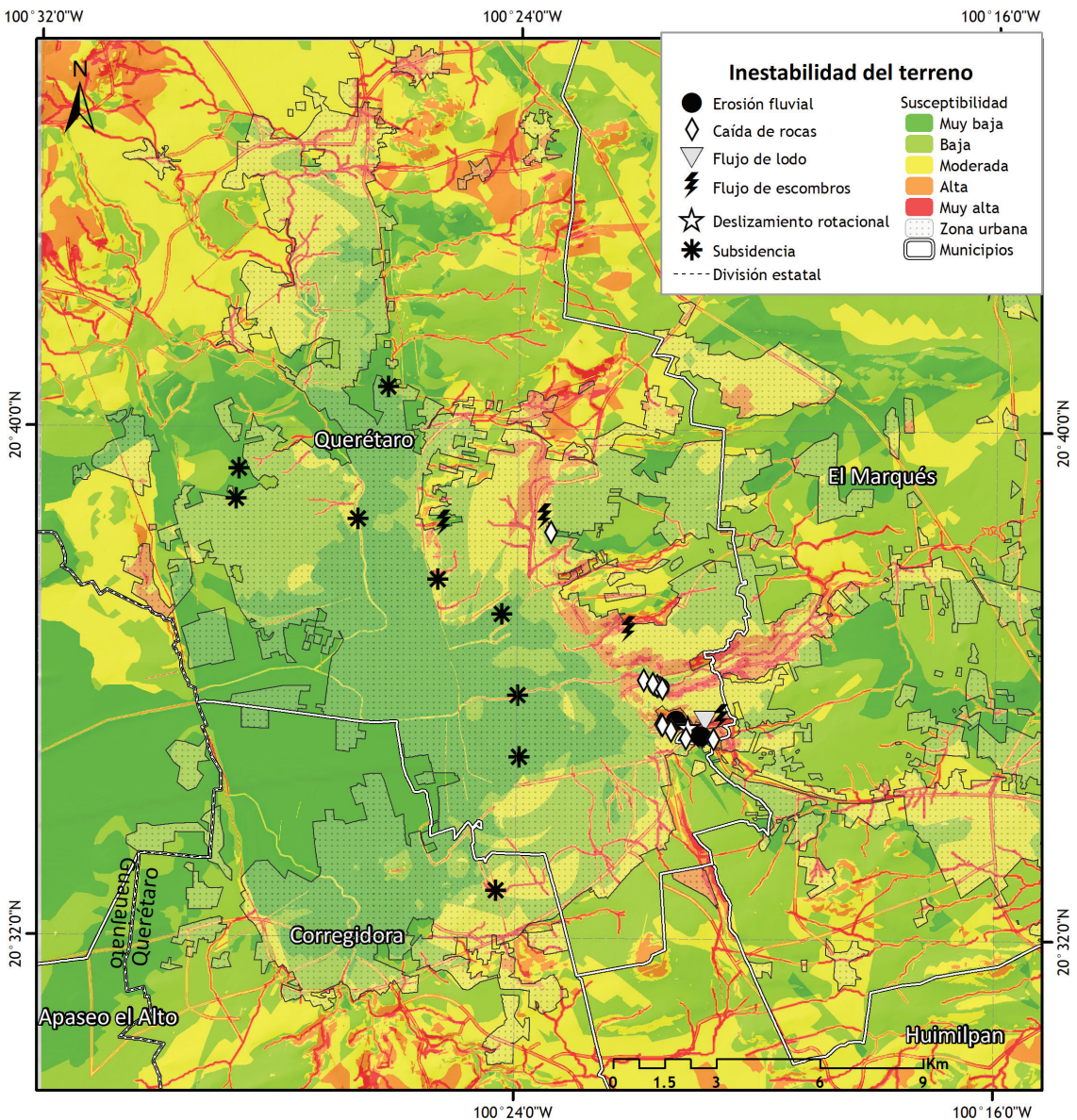


Fig. 5 - Susceptibilidad a inestabilidad del terreno en la ciudad de Querétaro 2022.

Fig. 5 - Susceptibility to terrain instability in the city of Querétaro 2022.

ingresó a dos viviendas durante una fuerte precipitación; cabe mencionar que las viviendas se encuentran con una separación mínima en la parte trasera que colinda con la ladera y el frente de las casas está prácticamente en el borde de la ladera con terraceo. Se ubicaron 4 flujos de escombros, dos de ellos en laderas terraceadas, otro ocurrió en una vialidad y fue producto de una fuerte precipitación que inestabilizó una ladera altamente erosionada por la extracción de materiales para la construcción y el último se desencadenó después de una lluvia acontecida en una ladera con intervención humana debido al establecimiento de terrenos irregulares. Además, se identificó la formación de un deslizamiento rotacional en el borde de una avenida, el cual fue resultado de la intervención para la construcción de una vialidad elevada en una ladera de toba y roca volcánica. Finalmente, se registró la incidencia de 9 subsidencias presentadas sobre vialidades al interior del graben, las cuales aparecieron después de inundaciones importantes en las zonas. La más notable ocurrió el 2 de octubre de 2021 cuando se formó un socavón en una de las paredes de un dren lo cual ocasionó la caída de un auto y con ello la pérdida de vidas humanas (Quadratin Querétaro, 2021). Cabe mencionar que dichas inundaciones se pueden relacionar a la modificación del relieve que en zonas de ladera ha reemplazado la cobertura vegetal y la primera capa superficial del suelo por concreto y asfalto, impidiendo la correcta infiltración del agua de lluvia y ocasionando un incremento de agua en los ríos, así como

la aparición de caudales sobre calles que conectan hacia las partes bajas del graben queretano.

A continuación, se muestran algunas de las evidencias de procesos de inestabilidad del terreno que se encontraron para la ciudad de Querétaro (fot. 1).

Si bien la inestabilidad del terreno asociada a zonas urbanas ha sido ampliamente documentada en áreas con relieve abrupto y pendientes pronunciadas (Reichenbach *et al.*, 2014; Alanís Anaya *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2021), existen algunos estudios que muestran la relación entre los procesos gravitacionales y la urbanización en sitios con relieve suavizado, por ejemplo, desde 1962 en las colinas de La Popa en la Ciudad de Cartagena (Colombia), se ha observado que la deforestación y la modificación del relieve para el establecimiento de sitios urbanos ha ocasionado deslizamientos en sitios que tenían menos de 30° de inclinación (Arce-Herrera, 1962; Aguilar-Collazo, 2015). Asimismo, al norte de la Ciudad de México, en los escarpes de la Sierra de Guadalupe, se han encontrado 14 procesos de inestabilidad de laderas en pendientes modificadas por la expansión urbana y que originalmente tenían menos de 30° (García Palomo *et al.*, 2006). Dichos trabajos analizan los procesos gravitacionales principalmente desde un punto de vista geológico-estructural, y sus resultados coinciden con la investigación plasmada en este documento, al evidenciar que el crecimiento urbano que modifica la topografía afecta a la estabilidad de las laderas aun en relieves



Fot. 1 - Evidencias de inestabilidad del terreno asociada al crecimiento urbano: a) Edificio en borde de ladera terraceada, b) Ladera con terrazas y gaviones, c) Deslizamiento rotacional, d) Vista superior del deslizamiento rotacional, e) Bloques colapsados en ladera modificada, f) Flujo de escombros (Noticias de Querétaro, 2022), g) Subsidencia del terreno (Expreso Press, 2021).

Photo 1 - Evidence of ground instability associated with urban growth: (a) Building on the edge of a terraced hillside; (b) Hillside with terraces and gabions; (c) Rotational slide; (d) Rotational slide viewed from above; (e) Collapsed blocks on modified slope; (f) Debris Flow (Noticias de Querétaro, 2022); (g) Ground subsidence (Expreso Press, 2021).

suavizados, por lo que es necesario que los planes de ordenamiento territorial también incluyan análisis de la estabilidad del terreno en relieve suavizado que ha sido modificado por el crecimiento urbano.

Conclusiones

La ciudad de Querétaro ha crecido considerablemente en los últimos 30 años. En su avance ha conectado áreas que anteriormente se consideraban rurales y ahora forman parte de una mancha urbana de mas de 27 mil hectáreas; además de que su crecimiento se está distribuyendo hacia áreas de micro-mesetas fuera del graben queretano las cuales poseen un relieve suavizado. En los años anteriores a 2019 se ofrecían viviendas tipo casa habitación lo cual explica el crecimiento horizontal de la ciudad. Sin embargo, en los últimos tres años han proliferado las construcciones de edificios de mas de 12 pisos con hasta 82 departamentos, los cuales se están estableciendo sobre laderas terraceadas y en algunos casos en áreas muy cercanas a paredes de laderas a las que se les modificó la pendiente dejándolas hasta en 90° de inclinación, evidenciando un uso de suelo urbano intensivo y extensivo en algunas áreas con alta y muy alta susceptibilidad a inestabilidad del terreno.

Lo anterior complementa el análisis de susceptibilidad a inestabilidad de terreno, ya que junto con la documentación en medios digitales de comunicación y el trabajo de campo, se valida la ocurrencia de eventos gravitacionales y de subsidencia en las áreas correspondientes a alta y muy alta susceptibilidad en la cartografía presentada en este trabajo. Además de que la mayoría de dichos eventos de inestabilidad del terreno (erosión fluvial, caída de rocas, flujo de lodo, flujo de escombros y deslizamiento rotacional) se asocian a modificaciones en laderas debido al uso de suelo urbano para la construcción de inmuebles y ocupación de laderas. En el caso de las subsidencias, estas se pueden asociar al aumento del crecimiento urbano sobre las cumbres y las laderas, lo cual impide la infiltración del agua de lluvia, facilitando los escurrimientos hacia las partes bajas del graben queretano y generando inundaciones.

Finalmente, se puede concluir que si la ciudad de Querétaro continúa con un ritmo constante en el crecimiento de su mancha urbana hacia zonas fuera del graben queretano, entonces aumentará la incidencia de procesos asociados a la inestabilidad del terreno. Asimismo, la metodología propuesta en este trabajo funciona para la identificación de zonas con alta y muy alta susceptibilidad a inestabilidad del terreno en relieves suavizados, lo cual puede coadyuvar al ordenamiento territorial en áreas donde antes no se creía que pudiera ocurrir el fenómeno y que ahora deben considerarse debido a los cambios de uso de suelo intensivos y al cambio climático que puede incidir en el aumento de la precipitación.

Agradecimientos

Se hace un reconocimiento a las instituciones que publican datos que sirven como base para realizar cartografía (CONAGUA e INEGI). Asimismo, al esfuerzo que hacen las personas para informar afectaciones derivadas de inestabilidad del terreno, por lo que se agradece la labor de periodistas y particularmente de los pobladores que han encontrado en las redes sociales un medio de alertamiento e información sobre los daños ocurridos en su región. A Lucero Parra, Aslam, Khalil y Siria, quienes facilitaron el trabajo de campo. Finalmente, a María Fernanda de la Torre por la revisión de estilo que contribuyó a mejorar la lectura del presente documento.

Bibliografía

- ABE - AGENCIA BOLIVIANA ESPACIAL (2019). Deslizamiento San Jorge/Kantutani. Agencia Boliviana Espacial. URL: <https://www.abe.bo/actividades/observacion-de-la-tierra/deslizamiento-san-jorge-kantutani/>
- Aguilar-Collazo, R. D. (2015). Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá, Colombia, 365 p.
- Aguirre-Díaz, G. J., Zuñiga-Davila Madrid, F. R., Pacheco-Alvarado, F. J., Guzmán-Speziale, M. y Nieto-Obregón, J. (2000). El graben de Querétaro, México. Observaciones de Fallamiento activo. *GEOS*. Vol. 20, n.º 1, 2-7. URL: <https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos00-1/Aguirre-Diaz00-1.pdf>
- Alayo, J. T. y Villegas-Lanza, J. C. (2021). Estimación de desplazamientos ocasionados por deslizamientos de tierra en la ciudad de Huancabamba, Piura, mediante análisis de imágenes satelitales para el periodo 2017-2019. *Revista de Investigación de Física*. Núm. 24 (3). DOI: <https://doi.org/10.15381/rif.v24i3.20805>
- Alanís, A. R. M., Legorreta, P. G., Mas, J. F., and Granados, R. G. R. (2017). Susceptibility to gravitational processes due to land cover change in the río chiquito-barranca del muerto subbasin (Pico de Orizaba volcano, México). *Journal of Mountain Science*, 14(12), 2511-2526. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4268-9>
- AM QUERÉTARO (2021). Crece población 125% en las últimas décadas. Recuperado del 11 de julio de 2021. URL: <https://amqueretaro.com/queretaro/estado/2021/07/11/crece-poblacion-de-queretaro-125-en-las-ultimas-decadas-2/>

- Arce-Herrera, M. (1962). Estudio sobre la erosión en el Cerro de La Popa, Cartagena. *Boletín Geológico*. Vol. X. Núm. 1-3, 203-216.
- Arnoldus, H. M. (1980). An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In *Assessments of Erosion*, de Boodts M, Gabriels D (eds). John Wiley and Sons Ltd, Chichester 127-132 p.
- Cabrera-Luna, J. A. y Gómez-Sánchez, M. (2005). Análisis florístico de la Cañada, Querétaro, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 77, 35-50. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.1711>
- Carreón Freyre, D., Cerca, M., Luna González, L. y Gámez González, F. J. (2005). Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 22, n.º 1, 1-18. DOI: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57222101>
- Chen, C. Y. and Huang, W. L. (2013). Land use change and landslide characteristics analysis for community-based disaster mitigation. *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol. 185, Issue 5: 4125-4139. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-012-2855-y>
- CONAGUA-SMN (2022). *Información de estaciones climatológicas*. Comisión Nacional del Agua-Servicio Meteorológico Nacional. URL: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- CREA SOLUCIONES (2019). *El acelerado crecimiento de Querétaro*. CREA Bright Solutions Profitable Results. URL: <https://creasoluciones.com.mx/general/el-acelerado-crecimiento-de-queretaro/>
- Delgado, J. (1993). Querétaro: hacia la ciudad-región. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 8(3), 655-699. DOI: <https://doi.org/10.24201/edu.v8i3.889>
- EA BOLIVIA (2011). Mega deslizamiento en La Paz: 400 casas se desploman y deja 5000 afectados. Recuperado del 27 de febrero de 2011. URL: <https://www.eabolivia.com/social/6456-mega-deslizamiento-en-la-paz-400-casas-se-desploman-y-deja-5000-afectados.html>
- EL UNIVERSAL (2021). Se desgaja el Cerro del Chiquihuite; se reportan 10 desaparecidos y un muerto. Recuperado del 10 de septiembre de 2021. URL: <https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/reportan-desgajamiento-del-cerro-del-chiquihuite-en-tlalnepantla>
- EXPRESO PRESS (2021). Tras fuertes lluvias, rescatan dos cuerpos en el río Queretaro. Recuperado del 3 de octubre de 2021. URL: <https://expreso.press/2021/10/03/tras-fuertes-lluvias-rescatan-dos-cuerpos-en-el-rio-queretaro/>
- fDi Financial Times. (2021). Americas Cities of the Future 2021/2022 overall winners. Recuperado del 17 de julio de 2021.
- IMPLAN (2020). Crecimiento del Área Urbana de la Zona Metropolitana de Querétaro 1970-2020. Instituto Municipal de Planeación del Municipio de Querétaro. RL: <http://implanqueretaro.gob.mx/v2/>
- INEGI - INSTITUTO DE CIÊNCIA E INOVAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E ENGENHARIA INDUSTRIAL (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano. URL: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI - INSTITUTO DE CIÊNCIA E INOVAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E ENGENHARIA INDUSTRIAL (2021a). Marco Geoestadístico diciembre 2021. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. URL: <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Descargas>
- INEGI - INSTITUTO DE CIÊNCIA E INOVAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E ENGENHARIA INDUSTRIAL (2021b). Uso de suelo y vegetación, escala 1:250,000. Serie VII. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. URL: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>
- García-Palomo, A., Carlos-Valerio, V., López-Miguel, C., Galván-García, A. y Concha-Dimas, A. (2006). Mapa de inventario de deslizamientos de la Sierra de Guadalupe, al norte de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. LVIII(2), 195-204. URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94320213004>
- Garnica-Peña, R. y Alcántara-Ayala, I. (2022). Evaluation of exposure to mass movement processes using UAVacquired aerial imagery: insights after the 2021 El Chiquihuite hill disaster, Estado de Mexico, Mexico. *10th International Conference on Geomorphology*, ICG2022-719. DOI: <https://doi.org/10.5194/icg2022-719>
- Kipkosgei-Kilimo, R. (2014). *Land cover changes and landslide occurrence: A case of Tirap Division in Elgeyo Marakwet county, Kenya*. University of Nairobi. Department of Urban and Regional Planning.
- Lambin, E. y Geist, H. (2006). *Land-use and land-cover change. Local processes and global impacts*. Springer.
- Légorreta-Paulín, G. y Lugo-Hubp, J. (2014). Zonación de peligros por procesos gravitacionales en el flanco suroccidental del Volcán Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*, n.º 84, 20-31. DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.37004>
- Liu, J., Wu, Z., Zhang, H. (2021). Analysis of Changes in Landslide Susceptibility according to Land Use over 38 Years in Lixian County, China. *Sustainability*, n.º 13, 10858. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131910858>

- Lobo, D., Lozano, Z. and Delgado, F. (2005). Water erosion risk assessment and impact on productivity of a Venezuelan soil, *Catena*, 64, 297 p.
- Mendoza-Mamani, R. (2021). Situación físico-Legal de las áreas de riesgo de la ciudad de La Paz. Revista del Instituto de Investigaciones Geográficas. II GEO-UMSA. *REVIGEO*, 13, Vol. 3, Núm. 13. URL: <https://revistaiigeo.umsa.bo/index.php/revista/article/view/39/36>
- Myers, N., Kent, J. (2001). *Perverse subsidies: How tax dollars can undercut the environment and the economy*. Island Press, Washington D.C., 277 p.
- Navarro-Ochoa, L. A. (1986). *Estabilización de arcillas expansivas del Estado de Querétaro con cal y cemento a corto plazo (Tesis Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón)*. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, 43 p.
- Oliver, J. E. (1980). Monthly precipitation distribution: A comparative index. *Professional Geographer*, 32 (3), 300-309.
- NOTICIAS DE QUERÉTARO (2022). Se deslava cerro en San Pedrito Peñuelas. Recuperado del 6 de junio de 2022. <https://noticiasdequeretaro.com.mx/2022/06/06/se-deslava-cerro-en-san-pedrito-penuelas-4ta-seccion/>
- Oropeza Sandoval, D. y Leyva Picazo, V. (2020). El crecimiento urbano y sus consecuencias en la movilidad. Caso de estudio: Zona conurbada de Querétaro. *Anuarios de Espacios Urbanos*, n.º 27, 27 p. DOI: <https://doi.org/10.24275/ARW17430>
- Pizarro, R., Ausensi, P., Aravena, D. y Sangüesa, C. (2003). *Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones pluviométricas de la VII Región del Maule, Chile*. Centro Tecnológico de hidrología ambiental. Universidad de Talca, Chile.
- QUADRATIN QUERETARO (2021). Cae auto a dren en avista candiles, conductor esta desaparecido. Recuperado del 2 de octubre de 2021. <https://queretaro.quadratin.com.mx/cae-auto-a-dren-en-avenida-candiles-conductor-esta-desaparecido/>
- Roa, J. (2007). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado de Mérida-Venezuela. *Revista geográfica venezolana*, vol. 48 (2), 183-219.
- Reichenbach, P., Busca, C., Mondini, A. C. and Rossi, M. (2014). The Influence of Land Use Change on Landslide Susceptibility Zonation: The Briga Catchment Test Site (Messina, Italy). *Environ Manage*, vol. 56 (6): 1372-1384. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-014-0357-0>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal Services Sciences UK*, Volume 1, n.º 1, 83-98. URL: <https://www.rafikulislam.com/uploads/resourses/197245512559a37aadea6d.pdf>
- Saavedra, F. (2010). Vulnerabilidad de la población frente a inundaciones e inestabilidad de laderas. En Cotler Ávalos, H. (coord.). *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización*, México: Semarnap-INE, Fundación Río Arronte, 132-137. URL: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/639/vulnerabilidad.pdf>
- Schaetzl, R., Anderson, S. (2005). *Soils Genesis and Geomorphology*. Cambridge. University Press.
- Velasco, I. y Cortés, G. (2009). Índice de Fournier modificado y de concentración de la precipitación, como estimadores del factor de riesgo de la erosión, en Sinaloa, México. Soil Erosion and Desertification. Trabajo presentado en el *Congreso Internacional sobre Desertificación*, Murcia, España.

Anexo I - Pesos ponderados a partir de matrices de jerarquización analítica.

Appendix I - Weighted weights from analytical jerarchic matrices.

Pendientes	24 a 50°	18 a 24°	12 a 18°	6 a 12°	Menos de 6°	Peso ponderado ($\Sigma x_j/n$)
24 a 50°	1	1	2	3	4	2.20
18 a 24°	1.00	1	1	2	3	1.60
12 a 18°	0.50	1.00	1	1	2	1.10
6 a 12°	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
Menos de 6°	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Disección vertical	133 a 331 m	99 a 133 m	66 a 99 m	33 a 66 m	0 a 33 m	Peso ponderado ($\Sigma x_j/n$)
133 a 331 m	1	1	2	3	4	2.20
99 a 133 m	1.00	1	1	2	3	1.60
66 a 99 m	0.50	1.00	1	1	2	1.10
33 a 66 m	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
0 a 33 m	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Cercanía a ríos y escorrentías	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	Peso ponderado ($\Sigma x_j/n$)
10 m	1	1	2	3	4	2.20
20 m	1.00	1	1	2	3	1.60
30 m	0.50	1.00	1	1	2	1.10
40 m	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
50 m	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Unidades geológicas (Parte 1)	Secuencia de tobas, gravas, arenas y arcillas con abundantes materiales piroclásticos	Riolita / toba riolítica	Toba riolítica / Toba dacítica	Calizas con intercalaciones de lutitas y areniscas
Secuencia de tobas, gravas, arenas y arcillas con abundantes materiales piroclásticos	1	2	2	2
Riolita / toba riolítica	1	1	2	2
Toba riolítica / Toba dacítica	1	1	1	2
Calizas con intercalaciones de lutitas y areniscas	1	1	0.50	1
Rocas volcánicas Mioceno Inferior	0.33	0.33	0.33	0
Andesitas y basaltos del Mioceno Tardío	0.33	0.33	0.33	0
Unidad volcánica de composición intermedia a básica	0.25	0.25	0.25	0.25
Secuencia sedimentaria de conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas	0.20	0.20	0.20	0.20

Unidades geológicas (Parte 2)	Rocas volcánicas Mioceno Inferior	Andesitas y basaltos del Mioceno Tardío	Unidad volcánica de composición intermedia a básica	Secuencia sedimentaria de conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas	Peso ponderado ($\Sigma x_j/n$)
Secuencia sedimentaria de conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas	3	3	4	5	2.20
Unidad volcánica de composición intermedia a básica	3	3	4	5	2.05
Andesitas y basaltos del Mioceno Tardío	3	3	4	5	1.90
Rocas volcánicas Mioceno Inferior	3	3	4	5	1.75
Calizas con intercalaciones de lutitas y areniscas	1	2	3	4	1.13
Toba riolítica / Toba dacítica	1	1	2	3	0.78
Riolita / toba riolítica	0.33	1	1	2	0.48
Secuencia de tobas, gravas, arenas y arcillas con abundantes materiales piroclásticos	0.25	0	1	1	0.29

Fallas y fracturas geológicas	0 a 4 m	4 a 8 m	8 a 12 m	12 a 16 m	16 a 20 m	Peso ponderado ($\Sigma x_j/n$)
0 a 4 m	1	1	2	3	4	2.20
4 a 8 m	1.00	1	1	2	3	1.60
8 a 12 m	0.50	1.00	1	1	2	1.10
12 a 16 m	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
16 a 20 m	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Erosividad de lluvias (IFM)	136 - 146	127 - 136	118 - 127	109 - 118	100 - 109	Peso ponderado ($\Sigma x_j/n$)
136 - 146	1	1	2	3	4	2.20
127 - 136	1.00	1	1	2	3	1.60
118 - 127	0.50	1.00	1	1	2	1.10
109 - 118	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
100 - 109	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Índice de concentración de la precipitación (ICP)	23 - 24.36	22.37 - 22.9	21.85 - 22.36	21.29 - 21.84	20.74 - 21.28	Peso ponderado ($\Sigma x_j/n$)
23 - 24.36	1	1	2	3	4	2.20
22.37 - 22.9	1.00	1	1	2	3	1.60
21.85 - 22.36	0.50	1.00	1	1	2	1.10
21.29 - 21.84	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
20.74 - 21.28	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Anexo I (continuación) - Pesos ponderados a partir de matrices de jerarquización analítica.

Appendix I (continued) - Weighted weights from analytical jerarchic matrices.

Uso de suelo y vegetación	Suelo desnudo	Asentamiento humano	Campo de cultivo agrícola	Vegetación secundaria selva baja caducifolia	Pastizal inducido	Matorral Crasicaule	Peso ponderado (Σxj/n)
Suelo desnudo	1	1	1	2	2	2	2.25
Asentamiento humano	1	1	1	2	2	2	2.25
Campo de cultivo agrícola	1	1	1	1	1	2	1.75
Vegetación secundaria selva baja caducifolia	1	1	1.00	1	1	2	1.50
Pastizal inducido	0.50	0.50	1.00	1	1	2	1.50
Matorral Crasicaule	0.50	0.50	0.50	1	1	1	0.88

Caminos y vialidades	0 - 10 m	10 - 20 m	20 - 30 m	30 - 40 m	40 - 50 m	Peso ponderado (Σxj/n)
0 - 10 m	1	1	2	3	4	2.20
10 - 20 m	1.00	1	1	2	3	1.60
20 - 30 m	0.50	1.00	1	1	2	1.10
30 - 40 m	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
40 - 50 m	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Anexo II - Pesos ponderados y relativos para la evaluación de inestabilidad del terreno.

Appendix II - Weighted and relative weights for evaluating terrain instability.

Factores condicionantes						
Grupo	Factor	Clases	Intensidad	Peso ponderado	Peso relativo (%)	Peso relativo de grupo (%)
Topográficos	Pendiente	<6°	Muy baja	0.52	0.79	29.29
		6° a 12°	Baja	0.97	1.48	
		12° a 18°	Moderada	1.1	1.68	
		18° a 24°	Alta	1.6	2.44	
		24° a 50°	Muy alta	2.2	3.36	
	Disección vertical	0 a 33 m	Muy baja	0.52	0.79	
		33 a 66 m	Baja	0.97	1.48	
		66 a 99 m	Moderada	1.1	1.68	
		99 a 133 m	Alta	1.6	2.44	
		133 a 331 m	Muy alta	2.2	3.36	
	Cercanía a ríos y escorrentías	40 - 50 m	Muy baja	0.52	0.79	
		30 - 40 m	Baja	0.97	1.48	
		20 - 30 m	Moderada	1.1	1.68	
		10 - 20 m	Alta	1.6	2.44	
		0 - 10 m	Muy alta	2.2	3.36	
Geológicos	Unidades geológicas	Secuencia sedimentaria de conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas	Baja	0.49	0.44	25.94
		Unidad volcánica de composición intermedia a básica	Moderada	0.79	0.73	
		Andesitas y basaltos del Mioceno Tardío	Moderada	1.18	1.19	
		Rocas volcánicas Mioceno Inferior	Moderada	1.41	1.73	
		Calizas con intercalaciones de lutitas y areniscas	Alta	2.34	2.67	
		Toba riolítica / Toba dacítica	Alta	2.57	2.90	
		Riolita / toba riolítica	Alta	2.8	3.13	
		Secuencia de tobas, gravas, arenas y arcillas con abundantes materiales piroclásticos	Muy alta	3.03	3.36	
	Fallas y fracturas geológicas	16 a 20 m	Muy baja	0.52	0.79	
		12 a 16 m	Baja	0.97	1.48	
		8 a 12 m	Moderada	1.1	1.68	
		4 a 8 m	Alta	1.6	2.44	
		0 a 4 m	Muy alta	2.2	3.36	
Factores desencadenantes						
Grupo	Factor	Clases	Intensidad	Peso ponderado	Peso relativo (%)	Peso relativo de grupo (%)
Hidrometeorológicos	Erosividad de lluvias (IFM)	100 - 109	Muy baja	0.52	0.79	19.53
		109 - 118	Baja	0.97	1.48	
		118 - 127	Moderada	1.1	1.68	
		127 - 136	Alta	1.6	2.44	
		136 - 146	Muy alta	2.2	3.36	
	Índice de concentración de la precipitación (ICP)	20.74 - 21.28	Muy baja	0.52	0.79	
		21.29 - 21.84	Baja	0.97	1.48	
		21.85 - 22.36	Moderada	1.1	1.68	
		22.37- 22.9	Alta	1.6	2.44	
		23 - 24.36	Muy alta	2.2	3.36	
Factores condicionantes						
Grupo	Factor	Clases	Intensidad	Peso ponderado	Peso relativo (%)	Peso relativo de grupo (%)
Antrópicos	Uso de suelo y vegetación	Matorral crasicaule	Baja	0.79	1.33	25.24
		Pastizal inducido	Baja	1.41	2.29	
		Vegetación secundaria selva baja caducifolia	Baja	1.41	2.29	
		Agricultura	Moderada	1.5	2.67	
		Asentamientos humanos	Alta	3.25	3.43	
	Caminos y vialidades	Suelo desnudo	Muy alta	3.25	3.43	
		0 - 10 m	Muy baja	0.52	0.79	
		10 - 20 m	Baja	0.97	1.48	
		20 - 30 m	Moderada	1.1	1.68	
		30 - 40 m	Alta	1.6	2.44	
		40 - 50 m	Muy alta	2.2	3.36	
Sumatoria				66	100	100



RISCOS

territorium 31 (I), 2024, 19-30

journal homepage: <https://territorium.riscos.pt/numeros-publicados/>

DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_31-1_2

Artigo científico / Scientific article



DESARROLLO DE UN MODELO DE REGRESIÓN LOGÍSTICA PARA EVALUAR EL RIESGO POR INUNDACIÓN
EN LA LOCALIDAD DE FONTIBÓN, BOGOTÁ D.C.-COLOMBIA*

19

DEVELOPMENT OF A LOGISTIC REGRESSION MODEL TO EVALUATE FLOOD RISK
IN THE TOWN OF FONTIBÓN, BOGOTÁ D.C.-COLOMBIA

Carolina Acero

Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)
Facultad de Medio Ambiente y Recursos, Ingeniería Sanitaria
ORCID 0000-0000-0000-0000 caceroc@udistrital.edu.co

Felipe Ortiz

Universidad Santo Tomás (Colombia)
Decano Facultad de Estadística
ORCID 0000-0001-5272-4447 andresortiz@usta.edu.co

RESUMEN

Una parte natural del ciclo hidrológico son las inundaciones derivadas de los sistemas pluviales. Siendo, el peligro natural más frecuente y costoso, el que impacta habitualmente a la mayoría de los países. En las últimas décadas, la frecuencia de eventos de inundación ha aumentado a escala global y con ella las pérdidas económicas. La zona de estudio es la localidad de Fontibón ubicada en el occidente de la ciudad de Bogotá D.C., una de las más vulnerables a inundación debido a su geografía plana, con poca pendiente y baja capacidad para evacuar caudales. Este artículo presenta el desarrollo de un modelo de regresión logística para evaluar el riesgo de inundación en la localidad de Fontibón apoyado en información meteorológica y registros de eventos de inundación en un periodo de 21 años (2000 al 2021). El modelo es altamente sensible con una capacidad de detectar presencias de inundación del 96,15%, los meses con mayor riesgo de inundación son diciembre y enero y para octubre y diciembre del año 2023 la probabilidad de inundación es mayor del 50%.

Palabras clave: Escorrentía, inundación, planicies y riesgo.

ABSTRACT

A natural part of the hydrological cycle is flooding from storm systems, these being the most frequent and expensive natural hazard that usually impacts most countries. Flood events have become more common worldwide in recent decades, and economic losses have increased with them. The study area is Fontibón, a locality in the west of the city of Bogotá D.C., one of the most vulnerable to flooding due to its flat geography, with low slope and low flow evacuation capacity. This article presents the development of a logistic regression model to assess the risk of flooding in the Fontibón locality supported by meteorological information and records of flood events over a period of 21 years (2000 to 2021). The model is highly sensitive with a flood detection capacity of 96.15%; the months with the highest risk of flooding are December and January, and from October to December of the year 2023 the probability of flooding is greater than 50%.

Keywords: Runoff, flood, plains and risk.

* O texto deste artigo corresponde a uma comunicação apresentada no IV Simpósio Ibero-Afro-Americano de Riscos, tendo sido submetido em 27-12-2022, sujeito a revisão por pares a 18-02-2023 e aceite para publicação em 27-03-2024.

Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 31 (I), 2024, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introducción

Las inundaciones son calificadas como el desastre natural más desfavorable y significativo del mundo, aproximadamente corresponden al 50% de las catástrofes, por encima de hambrunas, sequías y epidemias (Douben, 2006). La presencia de eventos de inundación se ha elevado de manera acelerada, especialmente en áreas urbanas afectando el funcionamiento regular de los sectores: social, económico, financiero, político y entre otros, donde los más vulnerables son los habitantes de bajos recursos (Benjamín, 2006).

El riesgo de inundación es uno de los más frecuentes e impactantes sobre las poblaciones, se puede presentar por diferentes causas como el manejo inadecuado de los ríos, la baja capacidad de los sistemas de alcantarillado, la deforestación, entre otros (IDIGER, 2022). Uno de los principales factores que aumenta la amenaza por inundación corresponde al fenómeno de la lluvia, es usual ver que en temporada de lluvias aumentan los eventos de emergencias asociados a inundaciones por encharcamiento (Idiger, 2022). Sumado a eso se evidencian cambios significativos en la intensidad y distribución de las lluvias, asociados con la variabilidad climática y cambio climático, que extienden los periodos de inundación, con tendencia a empeorar (Pinos, Timbe, & Orellana, 2017).

Un proceso clave para la gestión del riesgo por inundación es el desarrollo de modelos de estimación y proyección del comportamiento hidrológico para obtener una reducción eficiente de este (Pinos, Timbe, & Orellana, 2017). Se ha demostrado que los modelos de gestión del riesgo en el mundo contando con criterios de responsabilidad social y sostenibilidad permiten: tener un mayor control de riesgo, contribuyendo a la planificación territorial, mitigación de impactos negativos y análisis de costo beneficio (Carla Rodríguez Cuesta, 2015). En ese sentido la realización del presente artículo de desarrollo de un modelo logístico, para evaluar el riesgo por inundación cobra importancia debido a que favorece la identificación y probabilidad de ocurrencia del evento de inundación para anticipar a los residentes de la zona.

Elementos conceptuales relevantes

El riesgo entendido como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas, provocando daños sociales, ambientales y económicos, depende de la confluencia de factores de amenaza y vulnerabilidad (Meza, Corso, & Soza, 2010). Al encontrarse en función de la amenaza y la vulnerabilidad, el riesgo puede disminuirse, aumentarse o concretarse en una emergencia o desastre, con consecuencias para la sociedad; lo que involucra que el riesgo responde a dinámicas naturales y también

a dinámicas sociales que lo configuran y convierten continuamente (Quintero Angel, Carvajal Escobar, & Aldunce, 2012).

Para que se pueda entender el concepto de gestión del riesgo, se debe tener claro la noción de gestión integral del riesgo la cual es el conjunto de elementos, medidas y herramientas encaminadas a intervenir la amenaza o la vulnerabilidad, con el propósito de disminuir o mitigar los riesgos existentes (Oficina Federal de Protección Civil, 2014). La gestión del riesgo tiene como objetivo principal la prevención y mitigación de un desastre. La gestión del riesgo actúa mediante el desarrollo de políticas preventivas que generalmente suelen dar resultados a largo plazo disminuyendo de manera significativa en desastres que están por ocurrir o que inevitablemente ocurren (Omar Darío Cardona Arboleda, 2008).

La mitigación de riesgos es el proceso de desarrollo de opciones y acciones que, al ser implementadas, mejoran las oportunidades y reducen el impacto negativo o la probabilidad de ocurrencia de un evento en particular. La mitigación de riesgos es el eje central de la gestión de riesgos (Escuela Eurpoea por excelencia, 2021). La experiencia señala que son pocos los riesgos que realmente se pueden eliminar. Gracias a las estrategias de mitigación de riesgos es posible aceptar y tolerar riesgos, bajo un ambiente de seguridad (Jauregui, Aversa, & Salas, 2017).

En los últimos años se han presentado distintos modelos y metodologías para evaluar el riesgo de inundación, los cuales son muy heterogéneos entre si y la gran mayoría no incorporan una validación explícita de los resultados, presentando incertidumbres altas y contrastes que a menudo llevan a cuestionar su calidad (Pinos, Timbe, & Orellana, 2017). Sin embargo, a pesar de las limitaciones en el conocimiento del medio y restricciones tecnológicas que impiden las simplificaciones de los sistemas en un modelo, amplias investigaciones buscan la mayor aproximación posible, lo que ha contribuido a mejorar la gestión del riesgo por inundación (Robert, 2000).

Un modelo de regresión logística es un modelo matemático que puede ser utilizado para describir la relación entre un conjunto de variables independientes y una variable dicotómica Y (TIBC, 2022). La regresión logística resulta útil para los casos en los que se desea predecir la presencia o ausencia de una característica o resultado según los valores de un conjunto de predictores (IBM, 2021). Es similar a un modelo de regresión lineal pero está adaptado para modelos en los que la variable dependiente es dicotómica (Dos valores posibles ausencia o presencia del evento de interés) (Moral Peláez, 2014). Los coeficientes de regresión logística pueden utilizarse para estimar la razón de probabilidad de cada variable independiente del modelo (Moral Peláez, 2014).

La regresión logística (RL) es uno de los instrumentos estadísticos más expresivos y versátiles de los cuales se dispone para el análisis de datos. Su origen se remonta a la década de los sesenta (Confield, Gordon y Smith 1961); su uso se universaliza y expande desde principios de los ochenta debido, especialmente, a las facilidades informáticas con que se cuenta desde entonces. En los últimos años se ha verificado una presencia muy marcada de esta técnica, tanto en la literatura orientada a tratar temas metodológicos como en los artículos científicos (Fiuza Pérez & Rodríguez Pérez, 2000).

Enfoques Existentes

Se observa una relación directamente proporcional entre los daños/costos socioeconómicos y las amenazas por inundación debido a que si incrementa una la otra también lo hace, esto se presenta porque más personas viven en condiciones de vulnerabilidad ante estas (Venton & Hansford, 2006 como se citó (Quintero-Angel *et al.*, 2012).

Las medidas de gestión denominadas por Di Baldassarre *et al.* (2015) “Efecto del Dique” son las predominantes en Colombia para ejercer acción y respuesta ante las inundaciones, las cuales no han sido muy efectivas, y se le suma la falta de memoria histórica de la población y la ausencia de estudios específicos hidroclimáticos, físicos y ambientales de las zonas afectadas, haciendo que los eventos de inundación se repitan una y otra vez (Barrios Díaz & Salazar Galán, 2018).

En lo que respecta a los modelos para la evaluación y predicción de riesgo por inundación estos son muy heterogéneos incluyendo tantos procesos y variables como sea posible (Robert, 2000), como: la duración del evento, la temperatura del agua, el tiempo de alerta, la presencia de olas, la época del año, el día de la semana, la hora del día, la topografía, el tipo de propiedad en riesgo y muchos otros factores (Pinos, Timbe, & Orellana, 2017). Que conllevan a diferentes interpretaciones teniendo en cuenta la sensibilidad e incertidumbre.

Estado del Arte

A nivel global se evidencia que las mayores pérdidas económicas consecuencias de las inundaciones se producen en las zonas urbanas, provocando degradación o destrucción de estructuras, deterioro del contenido de las viviendas y comercios, costos del cierre de negocios, fallos en los sistemas de abastecimiento de servicios básicos, entre otros. El incremento de pérdidas por inundaciones en los últimos años ha expuesto la necesidad urgente de mejorar la gestión de este riesgo natural (Pinos, Timbe, & Orellana, 2017).

La gestión de riesgo en Colombia parte de un régimen normativo que coordina las acciones gubernamentales y

territoriales que permite delegar funciones, sustentando así la gestión del riesgo en proyectos y estrategias a corto, mediano y largo plazo desarrollados finalmente por los departamentos, municipios y regiones del país. Entonces, entre los múltiples niveles que se encargan de la gestión del riesgo en Colombia se destaca como actor principal al municipio. Dado que a nivel municipal es donde se gestiona todo el desarrollo del territorio y se generan las regulaciones para la distribución de las poblaciones (Álvarez, 2020).

De manera particular la localidad de Fontibón tiene un “Plan Local de Gestión del Riesgo y Cambio Climático” (Consejo Local de gestión del Riesgo y Cambio Climático, 2019) que va de la mano con el plan de gestión del riesgo de Bogotá que tiene como objetivo general “[...] *incrementar la capacidad del Distrito Capital para confrontar el riesgo de desastres asociados con los fenómenos naturales, socio naturales, tecnológicos, biosanitarios y humanos no intencionales, y los efectos del cambio climático, a través de la implementación de acciones de conocimiento, reducción, manejo del riesgo, mitigación y adaptación al cambio climático, que ayuden con la seguridad, bienestar, la calidad de vida de las personas, el desarrollo bajo en carbono y con capacidad de adaptación al clima*” (IDIGER, 2018b). Actualmente existe una caracterización de los escenarios de riesgo, sin embargo no se evidencian la implementación de modelos para gestionarlos.

El objetivo general de este artículo es desarrollar un modelo de regresión logística para evaluar el riesgo por inundación en la localidad de Fontibón, que permita predecir los meses con mayor riesgo. Se escogen las variables explicativas del fenómeno a través de la información meteorológica a cargo del IDEAM, y el registro de la presencia del evento otorgado por el IDIGER en un periodo de tiempo del año 2000 al 2021, con ayuda del software R Studio se establece el modelo (Ortiz, 2019).

Materiales y Métodos

Descripción del Sitio de Investigación

La zona de estudio es la localidad de Fontibón ubicada en la ciudad de Bogotá distrito capital de Colombia (fig. 1), cuenta con una extensión territorial de 33.32 km² y una población de 424,038 habitantes (CLGR-CC, 2018), se encuentra a proximidades de la cuenca de drenaje del río Fucha y el Aeropuerto Internacional El Dorado (TABLA I). Es altamente propensa al evento de inundación por su geografía plana, alto índice de contaminación y su clima frío con abundantes lluvias (precipitación promedio anual de 1465 mm) (Weather Atlas, 2022) (Fernandez Roa & Afanador, 2013). Además algunos de sus barrios se encuentran por debajo de la cota del río Bogotá (Lozada

Carvalho, 2021) y cuando este incrementa por causas invernales se desborda o genera fuertes presiones sobre los diques, lo cual puede romperlos (Consejo Local de gestión del Riesgo y Cambio Climático, 2019).

Recolección de Información

La información analizada en el artículo se solicita a entidades oficiales y pertenece a las estaciones meteorológicas instaladas en la localidad de Fontibón a cargo del IDEAM que presentaron información completa desde el año 2000 a 2021 (esta información es dada por el IDEAM de manera diaria y para el modelo se transforma en información mensual) y del IDIGER que registra en el mismo periodo de tiempo los eventos de inundación ocurridos en el sector. A continuación, se organiza la información en una base de datos en Excel (*Anexo 1 Base de datos inicial*) para ser procesada en el software R Studio, contando con seis variables explicativas: año, mes, precipitación, temperatura, humedad relativa y pendiente. Sin embargo, variables cualitativas explicativas como: cercanía a ríos o canales, estructuras hidráulicas, topografía del terreno y entre otras no son consideradas en el modelo debido a que estas variables son categorizadas como ficticias o subjetivas, que aumentan el AIC (Criterio de Información Akaike el cual mide la calidad relativa de un modelo estadístico) del modelo haciéndolo menos confiable y disminuyendo su capacidad de predicción.

Es importante resaltar que las estaciones del IDEAM cuentan con un valor significativo de incertidumbre: debido al manejo de equipos por los operarios y/o la suspensión de estaciones por mantenimiento o daño. En el caso de la estación “El Dorado Catam AUT” se evidencia ausencia de información, por eso se decide completar los datos con el software Nasa Power, el cual permite obtener información meteorológica satelital en una coordenada, mes y año determinado, evitando el descarte de datos por parte del modelo y aumentando su representación.

Análisis de Información

El modelo del riesgo por inundación en la localidad de Fontibón determina la presencia y ausencia del evento de inundación, a nivel descriptivo se realizan diagramas de caja (boxplot) con las variables cuantitativas para determinar aquellas que aporten a la explicación del fenómeno, luego se realizan gráficos de dispersión con diferentes variables cuantitativas, desagregando entre presencia o ausencia de inundación; para encontrar la relación existente entre ellas y el evento estudiado.

Se diseña un modelo de regresión logística con el fin de encontrar la relación entre la variable dicotómica (riesgo de inundación) y las variables independientes (precipitación, temperatura, humedad relativa, pendiente del terreno y eventos de inundación), se utilizó el software R Studio, en el *Anexo 2 Código de R Studio* se muestra la codificación usada.

TABLA I - Características de la zona de estudio localidad de Fontibón - Bogotá D.C.

TABLE I - Study area characteristics, Fontibón - Bogotá D.C.

Características	Zona de Estudio
Población	424,038 hab
Densidad Poblacional	127.26 hab/ha
Área	3332 ha
Suelo Urbano	3052 ha
Suelo Rural	0 ha
Suelo de Expansión Urbana	275.3 ha
Altitud	2550 msnm
Hidrología	Río Bogotá, río Fucha, quebrada San Antonio, Humedal Capellanía y humedal del Meandro del Say.
Topografía	Plana
Inclinación Promedio	1.0% a -1.0%
Promedio Temperatura Alta	18.92 °C
Promedio Temperatura Baja	10.33 °C
Humedad Relativa Promedio	82.75%
Precipitación Promedio Anual	1465 mm
Promedio Días de Lluvia Anual	305.4
Estructuras hidráulicas	Estaciones de Bombeo y Pondajes La Alameda, La Rivera y La Navarra, las cuales embalsan las aguas lluvias para depositarlas a través de plantas de bombeo al río Bogotá.
Eventos de inundación del 2000 al 2021 (Lámina de agua superior a 30 cm)	30

Fuente: (Alcaldía de Bogotá, 2021), (Google Earth, 2022), (Weather Atlas, 2022), (Lozada Carvalho, 2021), (IDIGER, 2019) e (IDIGER, 2022).
Source: (Alcaldía de Bogotá, 2021), (Google Earth, 2022), (Weather Atlas, 2022), (Lozada Carvalho, 2021), (IDIGER, 2019) e (IDIGER, 2022).

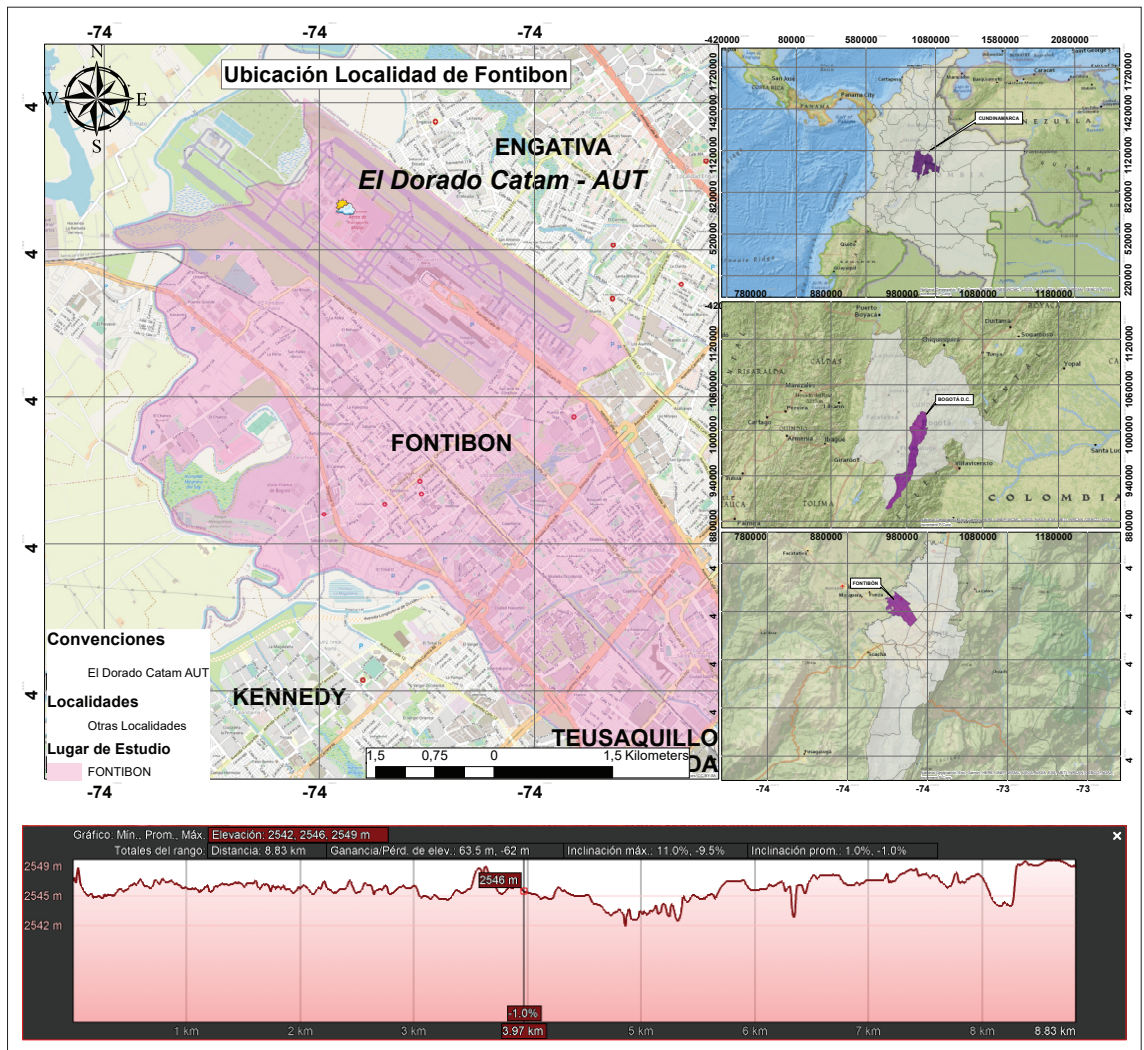


Fig. 1 - Ubicación Zona de Estudio (Fuente mapas base de ESRI:

<https://sites.google.com/site/seriescol/shapes?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog>).

Fig. 1 - Location Study Area (Data source ESRI base maps

<https://sites.google.com/site/seriescol/shapes?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog>).

Evaluación del Riesgo por Inundación a partir del Modelo de Regresión Logística

Para el modelamiento del riesgo por inundación en una zona de estudio específica se tienen en cuenta diferentes variables empíricas que se basan en la observación y ocurrencia del evento (Abraira, 2022).

$$\text{Logit}(\pi) = \log\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki}$$

En ella, el *Logit* de la probabilidad de ocurrencia del evento de inundación, se iguala al predictor del modelo, además surge el cociente: $\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right)$ el cual está asociado al riesgo de desarrollar el evento de interés (Ortiz, 2019) (Poma & Mercedes, 2022) (DataScientest, 2021).

Para la estimación, análisis del modelo e interpretación de los riesgos y probabilidades de inundación se tienen en cuenta los siguientes pasos:

Primer paso: Se calculan e interpretan las razones de *Odds*. El *Odds* de un suceso es el cociente de sus probabilidades de ocurrencia entre sus probabilidades de no ocurrencia, bajo unas determinadas condiciones C, lo que permite inferir cuando el riesgo aumenta o disminuye, los *Odds* ratio oscilan entre 0 e infinito (Cardenas, 2015). Razones de *Odds* mayores a uno (1) indican que aumentos en el predictor del modelo se asocian a incrementos en el riesgo y probabilidad de inundación mientras que, razones de *Odds* menores a uno que indiquen disminuciones en el predictor del modelo están asociadas con disminuciones en el riesgo y la probabilidad de inundación (Ferre Jaén, 2019).

Segundo paso: Se establece el punto de corte c con el método de Youden. Este punto de corte se establece para identificar a partir de las probabilidades estimadas, aquellos registros asociados a presencia de inundación (valores mayores al punto de corte) y aquellos asociados a ausencia de inundación (valores menores o iguales al punto de corte). El índice se expresa como la suma de sensibilidad y especificidad del test menos la unidad, de esta manera una de las interpretaciones dadas a los resultados del índice es la ganancia promedio de certidumbre neta en la clasificación de la presencia o ausencia de un evento. Bajo el razonamiento anterior se puede establecer que el índice toma valores entre 0 y 1; siendo 1 un test perfecto y cero un test inútil para detectar o descartar el evento de interés (Estrada Álvarez, 2016) (Brage Escalona, 2020).

Tercer paso: A partir del punto de corte y los registros reales de presencia o ausencia de inundación se construye la matriz de confusión, los verdaderos positivos, los falsos positivos, los falsos negativos y los verdaderos negativos, para establecer la sensibilidad y especificidad que: permiten dar cuenta de un aspecto muy importante del modelo, el cual es la capacidad que tiene para discriminar. La sensibilidad cuantifica la capacidad de detectar la condición de interés cuando la misma se encuentra presente y está dada por la probabilidad de tener un resultado positivo en presencia del evento. La especificidad, por el contrario, da cuenta de la capacidad que tiene el modelo para descartar el evento cuando este es ausente (Estrada Álvarez, 2016) (Sergas, 2014) (Lee, 2019).

Cuarto paso: Con lo anterior se cuantifica la tasa de falsos positivos (β), y la tasa de falsos negativos (α). Dado que α y β están relacionados entre sí (a través del punto de corte), suele ser costumbre reflejar esta relación, representando en el plano una curva, llamada curva ROC (siglas en inglés Receiver Operating Characteristic curve), que relaciona el porcentaje de falsos positivos del modelo (β) (en el eje horizontal) con la sensibilidad del mismo (en el eje vertical). La curva ROC permite evaluar cómo se comporta el modelo para cada punto de corte seleccionado y a partir de ella, es factible deducir cuál es el punto de corte óptimo, lo cual permite dar representación y clasificación al modelo (Estrada Álvarez, 2016) (Deride Silva, 2010).

Quinto paso: Se analiza la existencia de multicolinealidad con el factor de inflación de la varianza VIF. La Multicolinealidad es la correlación alta entre más de dos variables explicativas, lo cual no es un aspecto deseable para el modelo ya que evidencia duplicidad de información a nivel de las variables explicativas, es posible que exista un nivel de correlación entre las variables explicativas del modelo; sin embargo no debe ser alto (Uriel, 2022).

Validación del modelo

La validación del modelo de regresión logística se realiza con la evaluación de la bondad de ajuste, en el presente artículo se realiza con dos métodos:

Método McFadden Pseudo R^2 : el coeficiente de determinación, R^2 , se define como el porcentaje de variación de la variable respuesta que es explicado por el modelo de regresión ajustado (Ruiz & Londoño, 2022), los valores R^2 altos cercanos a 1 indican que una buena parte de la variación es explicada por el modelo (IBM, 2022).

Método Homer-Lemeshow consiste en comparar los valores previstos (esperados) por el modelo con los valores realmente observados. Ambas distribuciones, esperada y observada, se contrastan mediante una prueba de χ^2 . La hipótesis nula del test de Hosmer-Lemeshow es que no hay diferencias entre los valores observados y los valores pronosticados (la aceptación de esta hipótesis con un p-value mayor a 0,05 indicaría que el modelo se encuentra bien ajustado) (FBA Estadística I, 2012).

Resultados y Discusión

Varianza entre variables explicativas del riesgo por inundación según presencia o ausencia del evento

En lo ítem de precipitación se observa una diferencia importante entre el comportamiento de la precipitación bajo la presencia y ausencia de inundación, donde se percibe que si la precipitación es mayor a 100 mm es más probable que exista riesgo de inundación (fig. 2). Esta variable marca una diferencia importante para que el evento ocurra.

En las variables de humedad relativa y temperatura, las cajas son casi simétricas y se encuentran una al lado de la otra para representar ausencia y presencia, esto quiere decir que un rango en estas variables no podría determinar la presencia o ausencia del riesgo por inundación, no son variables determinantes en el modelo, debido a que en el caso de la temperatura un rango entre 16 a 19 °C que es donde se encuentra la mayor concentración de datos, no podrán definir donde tendría el mayor riesgo por inundación.

Se observan valores atípicos en las cajas de precipitación, temperatura y humedad relativa, pero revisando los datos iniciales y el rango se evidencia que los valores no son exagerados ni se encuentran fuera de contexto, es importante resaltar la incidencia de la variabilidad y cambio climáticos sobre estas variables, los cuales causan valores extremos y poco triviales en ciertas temporadas del año. Además, se puede sumar las incertidumbres de medición y manipulación de equipos.

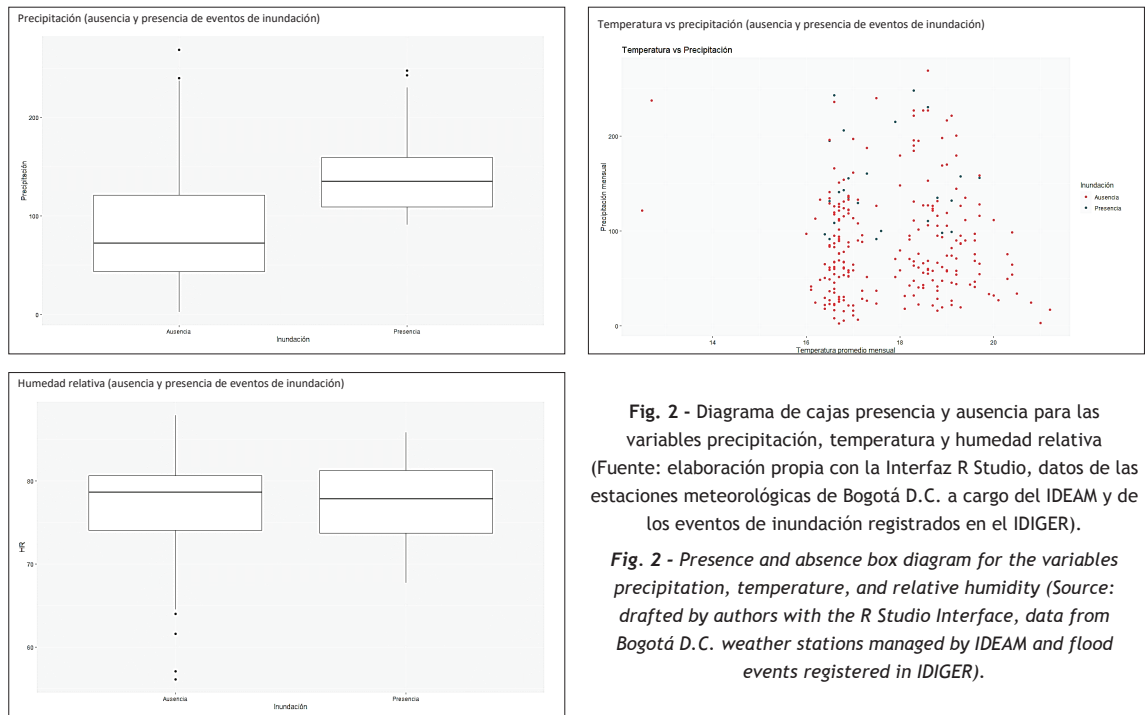


Fig. 2 - Diagrama de cajas presencia y ausencia para las variables precipitación, temperatura y humedad relativa (Fuente: elaboración propia con la Interfaz R Studio, datos de las estaciones meteorológicas de Bogotá D.C. a cargo del IDEAM y de los eventos de inundación registrados en el IDIGER).

Fig. 2 - Presence and absence box diagram for the variables precipitation, temperature, and relative humidity (Source: drafted by authors with the R Studio Interface, data from Bogotá D.C. weather stations managed by IDEAM and flood events registered in IDIGER).

Variables explicativas combinadas según presencia y ausencia del evento de inundación

En lo ítem de Año VS Precipitación no se evidencia una diferencia marcada, debido a que en la mayoría de los años fue probable evidenciar una inundación, sin embargo en la variable de precipitación se puede observar que las presencias señaladas con puntos de

color azul se ven en mayor cantidad si esta es superior a los 100 mm, por consiguiente se detalla ausencia de inundación, con precipitaciones bajas (fig. 3).

En los gráficos que combinan la precipitación vs temperatura y la precipitación vs humedad relativa, se evidencia que la temperatura y humedad relativa no marcan una diferencia sobre la ocurrencia del evento debido a que en

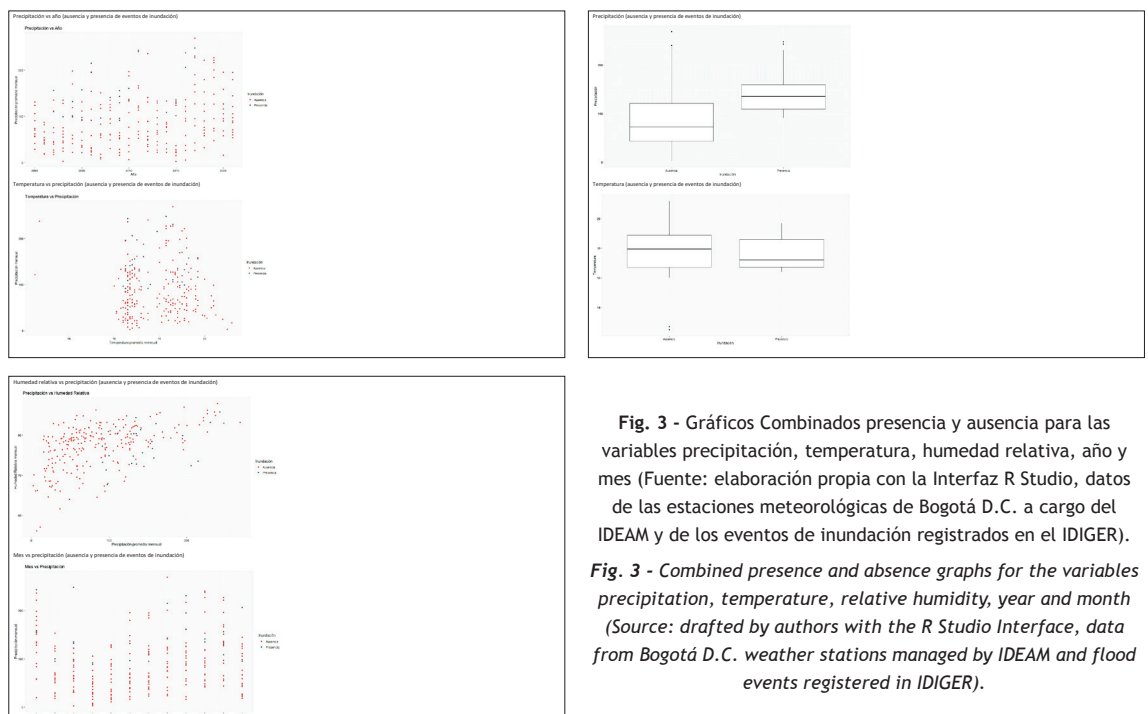


Fig. 3 - Gráficos Combinados presencia y ausencia para las variables precipitación, temperatura, humedad relativa, año y mes (Fuente: elaboración propia con la Interfaz R Studio, datos de las estaciones meteorológicas de Bogotá D.C. a cargo del IDEAM y de los eventos de inundación registrados en el IDIGER).

Fig. 3 - Combined presence and absence graphs for the variables precipitation, temperature, relative humidity, year and month (Source: drafted by authors with the R Studio Interface, data from Bogotá D.C. weather stations managed by IDEAM and flood events registered in IDIGER).

bajas o altas temperaturas y humedades relativas puede ocurrir una inundación. Se especula que posiblemente a mayor humedad relativa aumentan las probabilidades de lluvia y como se evidencia las altas precipitaciones inciden directamente sobre el riesgo de inundación.

Es importante resaltar que los datos meteorológicos cuentan con una incertidumbre significativa que podría estar afectando directamente los resultados del modelo.

Para la variable explicativa “pendiente del terreno” no es representativo ilustrar el grafico debido a que no varía en el periodo de 21 años.

En la fig. 3 en las variables de precipitación vs mes se evidencia mayor ausencia del evento de inundación en los meses de febrero, junio y agosto.

El riesgo por inundación puede aumentar por otros factores que no se tienen en cuenta en la presente investigación, debido a la dificultad de medirlos cuantitativamente, por ejemplo la capacidad de los sistemas de alcantarillado y/o los desbordamientos de cauces.

Modelo logístico

$$\text{Logit}(\pi) = \text{Log} \left(\frac{\pi}{1-\pi} \right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \beta_{4j} X_{4ij}$$

$$\begin{aligned} \text{Logit}(\pi) = \text{Log} \left(\frac{\pi}{1-\pi} \right) = & 429,6 + (-0,2106 * \text{Año}) + \\ & + (0,04094 * P) + (-0,11882 * HR) + (\beta_{4j} * M) \end{aligned}$$

Donde:

Variable Respuesta

Logit (π) = Logit de la probabilidad de que el evento de Inundación Ocurra.

$\left(\frac{\pi}{1-\pi} \right)$ = Riesgo de que ocurra el evento de Inundación

Betas

$$\beta_0 = 429,6$$

$$\beta_1 = -0,2106$$

$$\beta_2 = 0,04094$$

$$\beta_3 = -0,11882$$

$$\beta_{4j} = \text{Dependerá del mes, enero}=2,94, \text{ febrero}=-14,77, \text{ marzo}=-0,067, \text{ mayo}= 1,37, \text{ junio}=0,80, \text{ julio}=1,95, \text{ agosto}=0,91, \text{ septiembre}=0,91, \text{ octubre}=0,82, \text{ noviembre}=0,74 \text{ y diciembre}=3,06.$$

Variables Explicativas

$$X_{1i} = \text{Año en el año}$$

$$X_{2i} = \text{Precipitación en el año}$$

$$X_{3i} = \text{Humedad Relativa j en el año}$$

$$X_{4i} = \text{Mes en el año , mes}$$

$$\text{AIC} = 141,01 \text{ (17 iteraciones)}$$

El modelo logístico descarta las variables de temperatura y pendiente debido a que no las encuentra representativas y aumenta el valor del criterio de Akaike AIC (se considera que cuando el AIC disminuye, mejor es el modelo).

Razón de Odds para medir el riesgo de inundación por variable

A medida que aumentan los años el riesgo de inundación disminuye en un 19 %. Esto puede deberse al esfuerzo de la ciudad por mejorar y controlar esta situación que trae problemas económicos y sociales, al pasar de los años se evidencian acciones que contribuyen a disminuir el riesgo por inundación como: las obras civiles que mejoran la capacidad de los canales, la recuperación hidráulica, adecuación de los sistemas de alcantarillado y entre otras.

Cuando se revisan las relaciones de Odds por meses se evidencia que en febrero, marzo y abril existe un menor riesgo de inundación que en los meses restantes, de mayo a enero el riesgo de inundación es mayor al 100% (TABLA II).

TABLA II - Razón de Odds.

TABLE II - Odds Ratio.

Variab	Razón de Odds	% Riesgo
Año	0,8101	19
Enero	19,059	1805,9
Febrero	0,000	100
Marzo	0,9345	6,55
Abril	0,000	100
Mayo	3,941	294,1
Junio	2,2342	123,42
Julio	7,027	602,7
Agosto	2,488	148,8
Septiembre	2,503	150,3
Octubre	2,275	127,5
Noviembre	2,103	110,3
Diciembre	21,36	2036
Precipitación	1,041	4,1
Humedad Relativa	0,828	17,2

Se evidencia que el mayor riesgo de inundación se presenta en el mes de diciembre con un valor de 2036%, esto puede deberse a la precipitación y a que es el mes con más eventos de inundación registrados por el IDIGER, es un mes vulnerable y al cual debe prestarse atención para generar estrategias de adaptación y mitigación.

Cuando aumenta la precipitación el riesgo de inundación aumenta en 4,1% y cuando aumenta la humedad relativa el riesgo de inundación disminuye en un 17,2%. El cambio de estas variables climáticas interfiere en el riesgo de inundación, y se encuentra relación con la variabilidad climática, debido a que el régimen de precipitación se ve directamente afectado por el aumento de la

humedad relativa y la temperatura, porque más calor equivale a más energía en la atmosfera, lo cual supone el aumento del vapor de agua y la actividad del sistema, contribuyendo a los fenómenos extremos con el incremento de precipitación.

Sensibilidad y Especificidad

Se observan los resultados de la Curva ROC la cual representa la sensibilidad y especificidad del modelo (fig. 4).

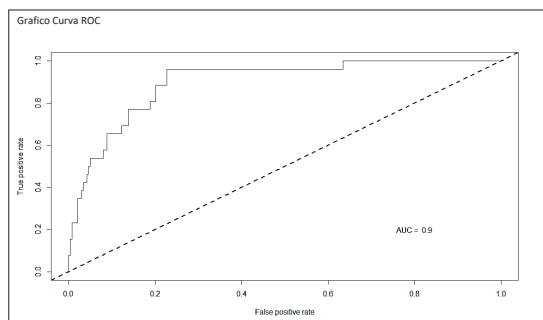


Fig. 4 - Curva ROC (Curva de Operación Relativa) (Fuente: elaboración propia con la Interfaz R Studio, datos de las estaciones meteorológicas de Bogotá D.C. a cargo del IDEAM y de los eventos de inundación registrados en el IDIGER).

Fig. 4 - ROC Curve (Relative Operation Curve) (Source: drafted by authors with the R Studio Interface, data from Bogotá D.C. weather stations managed by IDEAM and flood events registered in IDIGER).

El punto de corte del modelo es de 0,094, lo cual indica que las probabilidades estimadas por encima de ese punto son presencia y por debajo ausencia (TABLA III). A partir de esto se genera la TABLA III donde en las filas se tiene la presencia y ausencia; estimada por el modelo bajo la selección del punto de corte y en las columnas a partir de los datos recolectados. Con esto se observa lo siguiente: los verdaderos positivos son igual a 25, los verdaderos negativos son igual a 184, quiere decir que el modelo clasifico estas ausencias y presencias adecuadamente según los datos registrados. Por el otro lado se tienen 54 falsos positivos donde el modelo los clasifico como presencia y eran ausencia, y 1 falso negativo el cual clasifico como ausencia pero era presencia.

TABLA III - Punto de Corte, Conteo de ausencia y presencia, Sensibilidad y Especificidad del Modelo.

TABLE III - Cutoff Point, Absence and Presence Count, Sensitivity and Specificity of the Model.

Punto de corte	0,09498187	
Estimada/Realidad	Ausencia	Presencia
Ausencia/Falsos	184	1
Presencia/Verdaderos	54	25
Especificidad	0,7731	
Sensibilidad	0,9615	

Con lo anterior se calcula la sensibilidad y especificidad del modelo la cual indica que tan bueno es este para detectar presencias y ausencias respectivamente. Entonces se tiene que el modelo es altamente sensible con una capacidad de detectar presencias de un 96,15% y ausencias de un 77,31%. Por ende el modelo predice de mejor manera la presencia del evento, entonces cuando el modelo predice la presencia de inundación existe una probabilidad del 96,15% de que si haya una inundación. En cambio cuando predice la ausencia no es tan confiable porque existe una probabilidad del 22,69% de que si se presente el evento de inundación y este no fue detectado por el modelo.

En la fig. 4 curva ROC donde se resumen los valores de especificidad (eje y) y sensibilidad (eje x) con el punto de corte c, arroja un valor del área bajo la curva $AUC=0,90$ lo cual lo califica como un modelo “muy bueno” para clasificar el evento hidrometeorológico extremo de inundación (TABLA IV). En este caso existe una buena capacidad del modelo para clasificar la presencia y ausencia de las condiciones necesarias para que se presente una inundación.

TABLA IV - Clasificación del Modelo.

TABLE IV - Model Classification.

AUC	Interpretación
0,5-0,6	Malo
0,6-0,75	Regular
0,75-0,9	Bueno
0,9-0,97	Muy Bueno
0,97-1	Excelente

Entonces se puede decir que con precipitaciones mayores a 100 mm existe una alta probabilidad de que se inunden barrios de la localidad de Fontibón y que el modelo prediga la presencia del evento, además de que en los meses de enero, julio y diciembre existe un alto riesgo de que se presente el evento de inundación.

Ajuste del Modelo

A continuación, se muestra el ajuste del modelo por los métodos de Pseudo R^2 y Hosmer and Lemeshow (TABLA V):

TABLA V - Ajuste del Modelo.

TABLE V - Model Fit.

Ajuste del Modelo	
Pseudo R^2	0,346 - df=15
Hosmer and Lemeshow	$\chi^2=7,3041$ - df=8 - p-value=0,5042

Con el método de Pseudo R^2 , el modelo presenta un ajuste de 0,34 no es un valor bueno, debido a que entre más cercano a 1 el ajuste del modelo es mejor, pero

se resalta que el valor tampoco se encuentra cercano a cero, aunque según el ajuste del modelo por este método refleja que no es bueno para predecir. Sin embargo, con el método de Hosmer and Lemeshow el $\chi^2=7,30$ y $p\text{-value}=0,5042$, indican lo siguiente: χ^2 cuenta con un valor pequeño y $p\text{-value}$ es un valor considerado alto debido a que es mayor de 0,05, que relaciona buenos resultados en la bondad de ajuste del modelo, permitiendo razonar que es un buen modelo predictivo, a su vez este ajuste de modelo es recomendado para modelos como el de la investigación que combina variables continuas y categóricas.

Se presenta el grafico con los valores ajustados donde se evidencia levemente la tendencia a una función logarítmica (fig. 5).

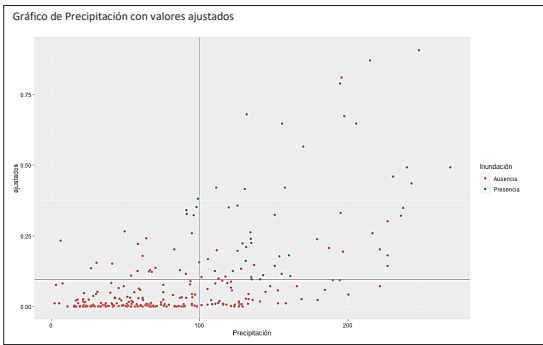


Fig. 5 - Grafico de Precipitación con valores ajustados
(Fuente: elaboración propia con la Interfaz R Studio, datos de las estaciones meteorológicas de Bogotá D.C. a cargo del IDEAM y de los eventos de inundación registrados en el IDIGER).

Fig. 5 - Precipitation graph with adjusted values
(Source: drafted by authors with the R Studio Interface, data from Bogotá D.C. weather stations managed by IDEAM and flood events registered in IDIGER).

Multicolinealidad

Se calcula la multicolinealidad que existe entre las variables explicativas del modelo (TABLA VI):

TABLA VI - Cálculo de Multicolinealidad, Factor VIF.
TABLE VI - Multicollinearity Calculation, VIF Factor.

Variab	Factor VIF
Año	1,414
Mes	1,053
Precipitación	2,079
Humedad Relativa	1,583

En la TABLA VI se calcula la multicolinealidad del modelo entre las variables explicativas con el coeficiente VIF, el cual arroja valores entre 1,053 a 2,079, los cuales no son mayores a 10 indicando que no existe problema de

multicolinealidad entre las variables, esto quiere decir que la correlación entre variables no es exacta ni fuerte, por ende no son redundantes en el modelo y explican fenómenos diferentes.

Utilidad en la gestión del riesgo

El modelo logístico permite predecir a través de los años y por mes la probabilidad de inundación. En el presente artículo se realiza el cálculo para el año 2023, sin embargo, este puede proyectar otros años futuros.

Se debe tener en cuenta lo siguiente: para la precipitación y humedad relativa, de la cual no se tienen valores conocidos se proyectan a través del promedio multianual de los 21 años analizados, para establecer un comportamiento.

Para el cálculo de la probabilidad se utiliza la siguiente formula, la cual está relacionada con el modelo establecido, ejemplo mes de enero:

$$\pi = \frac{1}{1 + e^{-(429,6 + (-0,2106 \cdot \text{Año}) + (0,04094 \cdot P) + (-0,11882 \cdot HR) + (B4 \cdot M))}}$$
$$\pi = \frac{1}{1 + e^{-(429,6 + (-0,2106 \cdot 2023) + (0,04094 \cdot 43,99) + (-0,11882 \cdot 75) + (2,94))}}$$
$$\pi = \frac{1}{1 + e^{-(-0,61)}}$$
$$\pi = \frac{1}{1 + 1,84}$$
$$\pi = 0,35$$

Con lo anterior se establece la probabilidad de inundación para el año 2023 (TABLA VII), donde se tiene lo siguiente:

TABLA VII - Valores de precipitación, humedad relativa, B4 para los meses y cálculo de la probabilidad de inundación para el año 2023.

TABLE VII - Precipitation values, relative humidity, B4 for the months and calculation of the probability of flooding for the year 2023.

	P promedio	HR promedio	B4	Probabilidad
Enero	43,99	75,00	2,94	0,35
Febrero	59,71	73,11	14,77	0,15
Marzo	103,54	76,49	-0,07	0,20
Abril	143,37	80,30		0,47
Mayo	109,05	80,33	1,37	0,46
Junio	87,91	78,33	0,80	0,21
Julio	77,12	76,13	1,95	0,41
Agosto	68,39	74,03	0,91	0,18
Septiembre	77,49	72,99	0,91	0,26
Octubre	129,95	78,49	0,82	0,59
Noviembre	119,41	82,31	0,74	0,35
Diciembre	83,86	79,28	3,06	0,65

Para octubre y diciembre la probabilidad es mayor del 50%, son meses de alto riesgo y vulnerables a la inundación en la localidad de Fontibón, se tiene que en estos meses existe el doble de probabilidad de inundación que en febrero, marzo, junio, agosto y septiembre, esto contribuye a anticiparse al riesgo y tener un cálculo aproximado del comportamiento futuro, para establecer planes de choque, a su vez deben enfocarse en meses con probabilidades que se acercan al 50% porque esto indica que meses como abril, mayo, julio, octubre y diciembre, tienen la mitad de posibilidad de inundarse, la cual es considerable.

Con la estimación de la probabilidad del riesgo, se debe proceder a la prevención y reducción de este. Preparando a las comunidades sobre el potencial riesgo en ciertos meses del año y anticiparse a lo que se pueda proyectar en años futuros.

Conclusiones

La variable explicativa más significativa del modelo es la precipitación, debido a que con lluvias mayores a 100 mm el riesgo de inundación puede aumentar en un 4,1%, además se evidencia en los diagramas de cajas y gráficos combinados que se marca una varianza y diferencia entre la presencia y ausencia del evento de inundación.

Se evidencia que el riesgo de inundación en la localidad de Fontibón aumenta considerablemente en el mes de diciembre, de igual manera en todos los meses se presenta riesgo por inundación, excepto en febrero, marzo y abril los cuales también se identifican por bajas precipitaciones.

El modelo de riesgo de inundación se clasifica como “muy bueno” según su sensibilidad y especificidad para detectar las condiciones necesarias en que se presenta un evento hidrometeorológico extremo de inundación. Además, su ajuste de bondad con el método Hosmer and Lemeshow es igualmente bueno.

Los residuales que no se pueden explicar en el modelo, se deben a otras variables que no se tuvieron en cuenta debido a su dificultad de medición y expresión de manera cuantitativa, entre las cuales cabe mencionar el desbordamiento de cauces, el abastecimiento y capacidad del sistema de alcantarillado, los coeficientes de escorrentía y entre otros, que posiblemente podrían mejorar la predicción del modelo.

El modelo no presenta problemas de multicolinealidad, haciendo referencia que la correlación entre variables no es alta, por ende, las variables no explican el mismo fenómeno y no son redundantes.

El cálculo de probabilidad proyectado por año, es de gran utilidad para anticiparse a situaciones futuras y fortalecer la reducción y el mecanismo de respuesta ante los eventos de inundación.

Referencias

- Abraira, V. (2022). *Modelos de Regresión Logística*. Madrid: Hospital Universitario Ramón y Cajal.
- ALCALDIA DE BOGOTÁ (23 de Septiembre de 2021). *Localidad de Fontibón*. Obtenido de <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/localidades/fontibon>
- Barrios Díaz, L., & Salazar Galán, S. (2018). *Una perspectiva de la implementación de un enfoque sociohidrológico para la gestión del riesgo por inundaciones en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, 1-2.
- Brage Escalona, M. (2020). *Análisis de datos categóricos: regresión*. La Laguna, Tenerife: Departamento de Matemáticas, Estadística e Investigación Operativa Universidad de La Laguna.
- Cardenas, J. (1 de Diciembre de 2015). *Odd Ratio*. Obtenido de <https://networkianos.com/odd-ratio-que-es-como-se-interpreta/#toc-3>
- CLGR-CC (Junio de 2018). *Caracterización General de Escenarios de Riesgos*. Obtenido de <https://www.idiger.gov.co/documents/220605/308252/Identificaci%C3%B3n+y+priorizaci%C3%B3n.pdf/6637c155-697a-43df-8fef-c6a8b7f3488e#:~:text=DESCRIPCION%20GENERAL%20DE%20LA%20LOCALIDAD&text=Seguimiento%20del%20estudio%20de%20la,2018%20es%20de%20424.038%20>
- CONSEJO LOCAL DE GESTIÓN DEL RIESGO Y CAMBIO CLIMÁTICO (2019). *Caracterización General de Escenarios de Riesgo*. Bogota, Localidad de Fontibon: Alcaldía local.
- DataScientest. (16 de Diciembre de 2021). *Regresión Logística*. Obtenido de <https://datascientest.com/es/que-es-la-regresion-logistica>
- Deride Silva, J. (2010). *Universidad de Chile*. Chile: Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas.
- ESCUELA EUROPEA POR EXCELENCIA (2021). *Mitigación de riesgos: proceso de 3 pasos para reducir frente al riesgo*.
- Estrada Álvarez, J. (2016). *El índice de Youden y su aplicación a la determinación del punto de corte en un test cuantitativo*. España: Universidad de Granada Departamento de Estadística e Investigación Operativa.
- FBA Estadística I (2012). *Fundamentos de Biología Aplicada I Estadística*. eio.usc.es.
- Fernandez Roa, Y., & Afanador, I. (2013). *Análisis de riesgo por inundación en la zona de Fontibon-Barrio Casandra*. Bogotá D.C.: Universidad Católica.
- Ferre Jaén, M. (04 de Abril de 2019). *Regresión Logística*. Obtenido de <https://gauss.inf.um.es/feir/45/>

- Fiuzza Pérez, M., & Rodríguez Pérez, J. (2000). *La regresión logística: una herramienta versátil*. Islas Canarias-España: Sociedad Española de Nefrología.
- GOOGLE EARTH (30 de Octubre de 2022). Bogotá D.C., Localidad de Fontibón, Colombia.
- IBM (31 de 08 de 2021). *Regresión lineal múltiple*. Obtenido de <https://www.ibm.com/docs/es/cognos-analytics/11.1.0?topic=tests-multiple-linear-regression>
- IBM (13 de Septiembre de 2022). *Pseudo R cuadrado*. Obtenido de <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/saas?topic=model-pseudo-r-square>
- IDEAM, & PNUD (2014). Vulnerabilidad de la región capital a los efectos del cambio climático. Documento de Apoyo Para La Toma de Decisiones, 24. URL: <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19772>
- IDIGER (2019). *Caracterización General de Escenarios de Riesgo Localidad de Fontibón*. Bogotá D.C.: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- IDIGER (09 de 06 de 2022). *Caracterización General del Escenario de Riesgo por Inundación*. Obtenido de <https://www.idiger.gov.co/rinundacion>
- IDIGER (2022). *Caracterización General del Escenario de Riesgo por Inundación*. Bogotá D.C.: Instituto distrital de gestión de riesgo y cambio climático.
- Felipe, A., & Rico, O. (n.d.). Seminario de Estadística.
- Jauregui, E., Aversa, M., & Salas, R. (2017). *Estrategias para la mitigación del riesgo por inundación*. Buenos Aires: ISSN 0717 - 3997 / 0718-3607.
- Lee, D.-J. (Marzo de 2019). *Introducción al software estadístico R*. Obtenido de <https://idaejin.github.io/courses/R/2019/euskaltel/>
- Lozada Carvalho, C. (2021). *Plan Ambiental Local de Fontibón 2021-2024*. Localidad de Fontibón - Bogotá: Alcaldía Bogotá D.C.
- Meza, L., Corso, S., & Soza, S. (2010). *Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile*. Chile: Oficina de Estudios y Políticas Agrarias - ODEPA.
- Meinke, H., Nelson, R., Kokic, P., Stone, R., Selvaraju, R., & Baethgen, W. (2006). Actionable climate knowledge: From analysis to synthesis. *Climate Research*, 33(1), 101-110.
- DOI: <https://doi.org/10.3354/cr033101>
- Moral Peláez, I. (2014). *Modelos de regresión: lineal simple y regresión logística*. Revista Seden.
- OFICINA FEDERAL DE PROTECCIÓN CIVIL (2014). *Gestión Integral del Riesgo*. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.
- Pinos, J., Timbe, L., & Orellana, D. (2017). *Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fluvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para Ecuador*. Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca, 147-162.
- Poma, S., & Mercedes, C. (2022). *Modelo de Regresión Logística*. UNMSM.
- Ortiz, F. (2019). *Regresión Logística*.
- Quintero, Ángel, M., Carvajal Escobar, Y., & Aldunce, P. (2012). *Adaptación A La Variabilidad Y El Cambio Climático: Intersecciones Con La Gestión Del Riesgo*. Manizales-Caldas: Universidad de Caldas.
- R CORE TEAM (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>
- Robert, L. (2000). *One World: The Health and Survival of the Human Species in the 21st Century*. Santa Fe, New Mexico: Published by health Press.
- Ruiz, J., & Londoño, C. (25 de Mayo de 2022). *Pseudo-R2 para GLM*. Obtenido de https://rpubs.com/Cata_lonc/907061
- SECRETARÍA GENERAL DE LA COMUNIDAD ANDINA (2009). Prevención y reducción de riesgos a través de los instrumentos de planificación territorial en Bogotá.
- SERGAS (2014). *Regresión logística*. Soporte Epidat Sergas.
- TIBC (09 de Octubre de 2022). *Regresión Logística*. Obtenido de <https://www.tibco.com/es/reference-center/what-is-logistic-regression>
- URIEL (31 de Octubre de 2022). *Multicolinealidad*. Obtenido de <https://www.uv.es/uriel/material/multicolinealidad3.pdf>
- WEATHER ATLAS (16 de Octubre de 2022). *Clima y previsión meteorológica mensual Fontibón, Colombia*. Obtenido de <https://www.weather-atlas.com/es/colombia/fontibon-clima>



RISCOS

territorium 31 (I), 2024, 31-42

journal homepage: <https://territorium.riscos.pt/numeros-publicados/>

DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_31-1_3

Artigo científico / Scientific article



31

BIVARIATE ANALYSIS OF SHORT-DURATION EXTREME RAINFALLS.
APPLICATION TO THE STUDY OF THE DEBRIS FLOODS (ALLUVIUMS) IN THE FUNCHAL REGION (MADEIRA ISLAND)*

MODELAÇÃO BIVARIADA DE PRECIPITAÇÕES EXTREMAS DE CURTA DURAÇÃO.
APLICAÇÃO AO ESTUDO DAS ALUVIÕES NA REGIÃO DO FUNCHAL (ILHA DA MADEIRA)

Lucas Gomes

The Master's University (United States of America)
School of Science, Mathematics, Technology and Health
ORCID 0009-0002-8097-6160 lgomes@masters.edu

Maria Manuela Portela

Lisbon University, Instituto Superior Técnico (Portugal)
Department of Civil Engineering, Architecture and Environment
ORCID 0000-0002-5221-1139 maria.manuela.portela@tecnico.ulisboa.pt

Luis Angel Espinosa

Lisbon University, CERIS (Portugal)
Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability
ORCID 0000-0003-0059-3953 luis.espinosa@tecnico.ulisboa.pt

ABSTRACT

Intense rainfalls and debris floods are familiar occurrences in Madeira Island (Portugal); but, understanding how intense rainfall relates to this type of floods is limited. This research seeks to characterise extreme rainfall events measured at the Funchal rain gauge station and to analyse their relationship with the region's debris flood records. Contrary to other studies, a multivariate approach was performed to describe those relationships. To identify the extreme hourly rainfall events, the annual maximum series (AMS) technique was applied to a record of hourly time-series data covering a period of 34 years. By applying bivariate copula analysis to coupled AMS and cumulative rainfall series, joint and conditional return periods were calculated. The results suggested that the extreme rainfall events causing debris flood events tend to have higher return periods than those with no debris flow generation. The exceptionality of the late February 2010 deadly event is reaffirmed. This work assists our understanding as to how intense rainfall events relate to debris flood events, and shows the benefit of copulas in providing new insights in hydrologic studies.

Keywords: Funchal, extreme rainfall, debris flood, bivariate copula, return period.

RESUMO

As precipitações intensas e as aluviões são ocorrências vulgares na Ilha da Madeira (Portugal). No entanto, a compreensão de como aquelas precipitações se relacionam com as aluviões é limitada. No presente artigo caracterizam-se acontecimentos extremos de precipitação registados no posto udográfico do Funchal e analisa-se a sua relação com as ocorrências de aluviões na região tendo por base uma abordagem multivariada. Os acontecimentos extremos de precipitação foram identificados por aplicação da técnica de amostragem de máximos anuais (AMS) a 34 anos de registos de precipitações horárias. Seguidamente associaram-se às precipitações horárias máximas anuais precipitações acumuladas em intervalos de tempo contendo aqueles máximos. Por aplicação de cópulas bivariadas foram atribuídos períodos de retorno conjuntos e condicionais aos pares de precipitações AMS e correspondentes precipitações acumuladas. Os resultados obtidos indicam que os acontecimentos extremos de precipitação que originaram aluviões tendem a ter períodos de retorno mais elevados do que aqueles que não terão originado aluviões. O estudo realçou ainda a excecionalidade do acontecimento de fevereiro de 2010. Esta investigação permitiu uma melhor compreensão sobre a relação entre precipitações extremas e aluviões e evidenciou a capacidade de as cópulas fornecerem novas perspetivas em estudos hidrológicos.

Palavras-chave: Funchal, precipitação extrema, aluviões, cópula bivariada, período de retorno.

* O texto deste artigo corresponde a uma comunicação apresentada no IV Simpósio Ibero-Afro-Americano de Riscos, tendo sido submetido em 01-02-2023, sujeito a revisão por pares a 18-02-2023 e aceite para publicação em 26-04-2023.

Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 31 (I), 2024, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introduction

This paper presents some of the results from research on debris floods in the Portuguese Island of Madeira (fig. 1), due to the susceptibility of the territory to intense rainfall occurrences (Gomes, 2021). These often trigger landslides and the movement of water-laden masses of soil and fragmented rock that rush down mountainsides causing devastation in terms of physical damages, but also casualties, as it happened on February 2010. Such flood events (herein also mentioned as alluvium floods, from the Portuguese word “*aluviões*”) are a combination of hydro-geomorphological complex processes that differ from a strictly hydrologic flood, due to the high amount of rocky, from particles to large blocks, and organic material that flows mixed with the water (Lopes *et al.*, 2020).

Although intense rainfalls which trigger debris floods are common occurrences in Madeira Island, some of which are deadly, there is a limited understanding of how intense rainfall events relate to such type of flood events. In this paper, the short-duration extreme rainfalls measured at the Funchal Observatório gauge station are analysed aiming at understanding their relationship with the debris flooding occurring in the region, as reported by Quintal (1999) and Sepúlveda (2011). For this purpose, bivariate statistical analysis was applied to “coupled” extreme rainfall events with different durations, thus allowing for the understanding of how the exceptionality of the rainfall events changes with their progression through time.

The main assumption of the study presented in this paper was that a similar extreme rainfall event may have different consequences in terms of debris flooding depending on the rainfall that preceded or/and followed it, i.e., depending on the wetness conditions of the watershed (Gomes, 2021). To explore such an assumption, bivariate series built upon extreme rainfalls coupled with cumulative rainfalls that occurred immediately before or/and after the extremes were analysed based on a copula approach aiming at identifying the association and dependence structure properties connecting those two random variables. By identifying the coupled extreme rainfalls that triggered debris flood events, conclusions were made on how the exceptionality of the rainfall can be considered as an indicator of the occurrence and consequences of a debris flood. In this study, special attention is given to the deadly late February 2010 event that resulted in over forty human casualties.

Whilst most studies on the subject take into consideration other factors, such as geomorphological, and use a univariate approach applied to rainfall data, this study solely focuses on the bivariate behaviour of the extreme rainfalls with different durations as a triggering factor of debris flood events.

To select the extreme rainfall events, the Annual Maximum Series (AMS) technique was applied to hourly and daily rainfall series at Funchal Observatório over periods of 34 and 80 years, respectively. Because the conclusions from the daily analysis were equivalent to those from the hourly analysis, only the hourly-based conclusions are addressed in this paper. The AMS technique extracts the maximum hourly rainfall of each hydrologic year (which in Portugal runs from October 1 to September 30 of the following year) and compiles the values into one series, resulting in an hourly AMS with a length equal to the length of the recording period, i.e., in the case of Funchal Observatório, 34 years. The use of the hydrologic year is essential to ensure the randomness of the series. This means that, under the constraints prevailing in Madeira Island, in each hydrologic year, the hydrologic conditions are re-initiated after the long dry summer season, thus ensuring the temporal independence of some of the hydrologic time series, such as the AMS used in this study.

To understand the relationship between the exceptionality of the extreme rainfalls and the associated debris flood events, cumulative rainfalls with different durations were coupled with each annual maximum, and were characterised by joint and conditional return periods provided by bivariate copula models. Among the several definitions of return period, Shiau and Shen (2001) describe it as the average elapsed time between occurrences of an event with a certain magnitude or greater than a threshold. The higher the return period, the more exceptional the event is.

The study area and the data used in the study are presented after an analysis of relevant literature. Then, the modelling approach is described, and some of the main results from Gomes (2021) are presented. Finally, there is a discussion of the results and the main conclusions from the analysis.

Literature Review

There have been studies published which seek to analyse the relationship between rainfall and debris or alluvium flooding events on Madeira. These studies, such as Lopes *et al.*, 2020, utilise a univariate or categorising approach to handle the rainfall data. One of the difficulties introduced by these methods is that they do not account for the variation of the rainfall along the rainy events, either before or during the mass movement occurrences. This study argues that a more comprehensive quantitative approach is required to understand how relevant the accumulation of rainfall is during extreme events as debris flood triggering factor. A well-defined quantitative look at the rainfall data permits the use of standardised and repeatable methods, for instance, of statistical nature. The quantitative approach used in

this research seeks to be more objective in depicting the rainfall data. Through the coupling of rainfall series data, this paper argues for the use of bivariate copulas as the statistical method for the data analysis. Copulas in hydrology are frequently applied to the study of floods and droughts, as seen in Kao and Govindaraju (2010). However, when applied to rainfall they also have shown to be extremely useful, Tahroudi *et al.* (2020), Zhang and Singh (2007).

According to Gomes (2021), there are two noticeable studies that centre on the more recent debris flood event of late February 2010, one of the deadliest floods recorded in Madeira Island. The first, from Frago, *et al.* (2012), sought to understand the exceptionality of the rainfall during the event and understand the flash floods that then occurred. Those authors took a holistic approach to the subject, and studied the various contributing factors to the debris floods, for example, atmospheric data and the spatial variability associated with the rainfall event. Levizzani, *et al.* (2013) also utilise a more holistic approach. Though analysing various hydrologic factors, Frago, *et al.* (2012) employ a univariate statistical approach, which may not fully explicate the relationship between rainfall and debris flooding, nor the exceptionality of the rainfall events, including giving an accurate value of their return period (Gomes, 2021).

The paper presented herein argues that a bivariate copula approach applied to different types of time-series of rainfall data, results in a better understanding and characterisation of the rainfall “temporally surrounding” a debris flood event. As opposed to the univariate approach based on AMS, which does not provide any information about the wetness conditions of the watersheds during debris floods, the approach

adopted in this study uses cumulative rainfalls associated to each AMS value as a measure of the excess of water in the soil that reduces its cohesion and promotes its movements down mountainsides. In other words, this paper argues that the inclusion of cumulative rainfalls during debris flood events provides new insights into the exceptionality of those events and how they relate to alluvium occurrences.

Case Study and Data

Madeira is a volcanic island located in the North Atlantic Ocean with an area of 741 km², a length of 57 km and a maximum width of 22 km. Centred at 32° 44.34' N and 16° 57.91' W, approximately 600 km northwest of the Western African coast (fig. 1), Madeira has a steep topography consisting of an enormous central E-W-oriented mountainous system cut by deep valleys and which divides the island mainly into north and south from an orographic perspective. According to Koppen’s classification, the climate is predominantly temperate with dry and warm to hot summers approaching the coastal zones of Madeira.

The rainfall occurs predominantly in the north-facing slope as a result of the topography combined with the prevailing N-E trade winds. The rainfall is concentrated in the period from October to mid-April, while in summer (from June to August) is very low. The highest average annual values, exceeding 2200 mm, are observed in the northern slope and especially in the central highland region of the island while the smallest rainfalls, less than 650 mm, occur in the lowland areas of the southern slope, including in the Funchal area, the capital of Madeira and where the rain gauge adopted in the study is located.

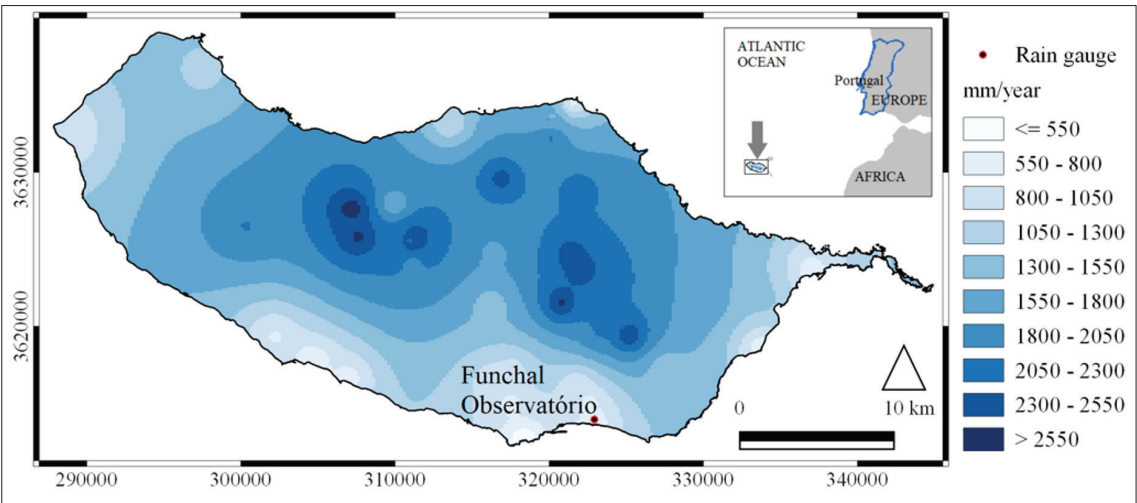


Fig. 1 - Madeira Island and Funchal Observatory rain gauge location over a map of the mean annual rainfall.

Fig. 1 - Localização da Ilha da Madeira e do posto udográfico de Funchal Observatório sobre um mapa da precipitação média anual.

The two data sets required by this study's approach comprehended rainfall data and debris flood data. The first set included the hourly rainfall records at Funchal Observatório rain gage from the 1st of October 1980 to the 30th of September 2014 provided by the IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I. P. (34 hydrologic years). The second set of data, related to recorded debris floods from 1601 to 2010, was collected from Sepúlveda (2011). For each flood event, this author provides some information on the dates, weather conditions, location of the occurrence and damages.

Aiming at identifying possible cause-effect relationships between annual maximum hourly rainfalls and debris floods, three types of criteria were developed and applied to the flooding data systematised by Sepúlveda (2011): the *temporal*, the *spatial*, and the *substantive* criteria. However, it is important to clarify that all the annual maximum hourly rainfalls were used to set up the copula models, not merely those that were further related to debris floods. In other words, the analysis based on copulas considered all the extreme rainfall events independently of if they could be considered as having triggered alluviums or not.

The *temporal* criterion considers that there might exist a cause-effect relationship between an extreme rainfall

and an alluvium flood event if the annual maximum rainfall occurred within the previous 6 days of the identified alluvium. The *spatial* criterion considers that the debris flood must have been said to occur specifically in the study area of Funchal or to have impacted the southern slope of the island (where the Funchal area is located), or impacted the whole island. Finally, the *substantive* criterion was defined as having caused either floods, landslides or damaging impacts on civil infrastructure and human life.

For the period with hourly rainfall data, the eleven coupled rainfall-debris flood events that simultaneously met the three previous criteria are systematised in TABLE I. The table specifies the hydrologic year of occurrence of each alluvium, its date, as well as the date and the amount of the annual maximum rainfall that was assigned to the debris flood and, finally, a brief description of the event.

Modelling approach

If merely annual maximum hourly rainfalls were analysed in a univariate perspective, under the hypothesis that the debris floods could be explained solely based on such extreme rainfalls, the in-time internal relationship of said rainfall events could not be addressed. In the bivariate analysis, a second variable related to

TABLE I - Association between annual maximum hourly rainfalls and alluviums. Hydrological year and dates of occurrence and description of the alluviums (reproduced from Gomes, 2021).

TABELA I - Associação entre ocorrências de precipitações horárias máximas anuais e aluviões. Anos hidrológicos, datas de ocorrência e descrição das aluviões (reproduzida de Gomes, 2021).

Hydrologic year	AMS data		Debris flood date	Debris flood description
	Date	Maximum hourly rainfall		
1989/1990	18-09-1990	37,7	18-09-1990	"Falling of blocks in Curral das Freiras: "landslide happened after the strong rainfall which happened between 14h and 15h" (DNM, 1990). Floods also took place in Funchal"
1991/1992	29-10-1991	25,4	29-10-1991	"In Funchal the rain caused floods and damage to the sewage systems. Also, in Câmara de Lobos floods were registered in the residences and anomalies in the sewer systems"
1993/1994	29-10-1993	29,8	29-10-1993	"Funchal was woken up startled. The intensive rain and streams filled with rubble caused a catastrophe. (...) The tragedy struck various points of the island"
1994/1995	07-10-1994	10,9	07-10-1994	"Great rainfall registered during all of the day and provoked some floods a landslides in diverse areas of the island"
1995/1996	22-03-1996	32,5	22,23/03/1996	Strong storm with great discharge of water in all the island. Landslides, falling of trees and the obstruction of roads happened.
1997/1998	01-02-1998	28,7	07-02-1998	"A bit everywhere, with land giving way because of the weight of the rainfall water" (DNM, 8 Feb. 1998).
1999/2000	10-10-1999	26,5	10-10-1999	"Strong rainfall in Funchal, followed by landslides"
2001/2002	18-11-2001	20,6	18,19/11/2001	"Storm mainly on the south side of the island provoked floods, landslides and the falling of trees"
2002/2003	24-11-2002	29,9	24-11-2002	"Storm over all the island, mainly in the south and west, provoked landslides, floods and obstructions of roads"
2006/2007	07-04-2007	22,1	7,8,10,11/04/2007	"Intensive rainfall provoked floods in Funchal" "Intensive rain provoked loss of stones in access roads to Curral das Freiras, and also floods"
2009/2010	20-02-2010	51,2	18-20/02/2010	"All of the south side of the island was affected by the by the storm. The final official balance indicates that 43 people died, 8 remain lost, 120 were injured and 800 habitations suffered damages, 400 of which there was a total loss or are needing a deep intervention, with a loss of 36 million Euros. (...) The Comissão Partiaária Mista defined the value of loss at 1080 million Euros"

cumulative rainfall that can be coupled with the annual maxima was considered. This means the simple usage of an AMS approach may be insufficient for a deeper understanding of the exceptionality of a rainfall event because it only portrays a very small time window (1 h in the case of hourly rainfall AMS), but not the rainfall conditions during its occurrence. Since debris floods are related to the rainfall that occurs over time and to its effects on the humidity content and cohesion of the ground soils, a more meticulous understanding of the rainfall event before the debris flood and its evolution in time is necessary. Under this understanding and assuming that there would be some correlation between annual maximum rainfalls and cumulative rainfalls temporally contiguous to those maxima, each annual maximum rainfall was coupled with the cumulative rainfall that occurred before or/and after it.

For this purpose, different accumulation periods were considered, as further discussed. Such a bivariate model must also have the ability to enjoin the two variables into one distribution, so that in the qualitative hydrologic sense the two variables can be looked at as one coupled extreme rainfall occurrence, also possibly assigned to a debris flood event. For this purpose, the bivariate copula model was used.

Such a model is in essence a bivariate distribution from which joint or conditional probabilities can be calculated, and it allows for an understanding

of possible non-linear relationships between two variables. In its application to Funchal Observatório rain gauge records, the hourly AMS values were used as the first variable, X_0 , i.e., the defining characteristic of the extreme rainfall event.

The cumulative rainfalls before and/or after each annual maximum were set as the second variable of the bivariate analysis, X_n^B , X_n^A and X_n^{BA} , where “n” represents the number of hours considered when computing the cumulative rainfall, and X_n^B represents the cumulative rainfall “n” hours before each annual maximum, including this maximum, X_n^A the same for “n” hours after each annual maximum, and X_n^{BA} a mix of the two previous scenarios, i.e., cumulative rainfall in “n” hours symmetrically surrounding (before and after) each annual maximum. All the series of the second variable include the maximum, X_0 , in the cumulative rainfall calculation. To help to understand how the cumulative rainfall series were obtained fig. 2 was produced. As shown in the figure, the accumulation periods may include sub-periods (hours) without rainfall. The series of X_0 , X_n^B , X_n^A and X_n^{BA} , with “n” from 1 to 6, used in the study are presented in TABLE II.

Mathematically, these series can be defined by the following equations, where the index i refers to the rainfalls in consecutive time steps $i \Delta t$, with Δt equal to 1 hour for hourly AMS series. A mathematical rendering of the schematic represented in fig. 2 is given by:

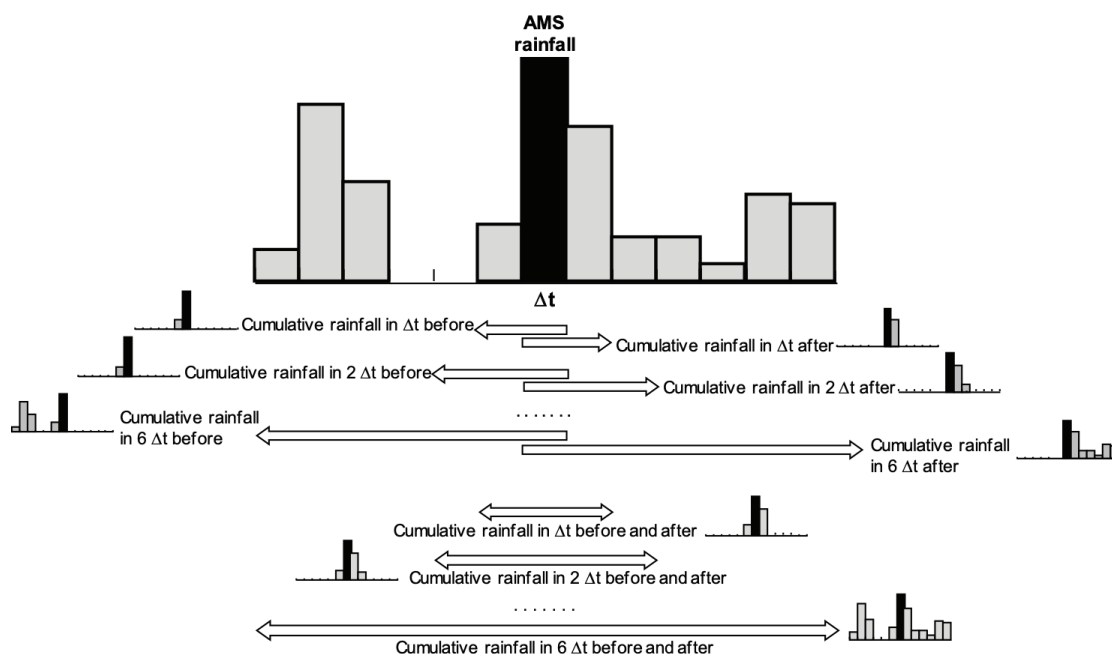


Fig. 2 - Representation of the procedure to create coupled AMS rainfalls and cumulative rainfalls in contiguous time steps with a duration of $\Delta t=1$ h (reproduced from Gomes, 2021).

Fig. 2 - Representação do procedimento de associação entre precipitações horárias máximas anuais e precipitações acumuladas em intervalos de tempo com a duração de $\Delta t=1$ h contíguos aos de ocorrência daquelas primeiras precipitações (reproduzido de Gomes, 2021).

Kolmogorov-Smirnov and Anderson-Darling distances. For each of the previous marginal distributions and their parameters estimations, the relative fitting quality was assessed based on the Log-Likelihood Function (LLF), the Akaike Information Criterion (AIC), and the Bayesian Information Criterion (BIC). LLF computes a relative comparison of the quality of different fitted distributions. LLF, represented by $F(\theta)$, is equal to the natural logarithm of the likelihood function $L(\theta)$, this is, $F(\theta) = \ln(L(\theta))$, being its given parameter. The greater the value of $F(\theta)$ in the following equation, the higher quality the distribution fitting has:

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^n \ln(f_i(x_i | \theta))$$

In line with Moffatt (2020), AIC is another criterion that evaluates the relative quality of fitting of statistical distributions. Similarly, BIC, also referred to as Schwarz Information Criterion (SIC) (Schwarz, 1978), has the same statistical objective. The following two equations describe the calculation of the criteria, where RSS is the residual sum of squares, K is the number of estimated free parameters, and n is the number of observations:

$$AIC = n \ln(RSS) + 2K$$

$$BIC = n \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + k \ln(n)$$

By ranking the results from these tests, the best marginal distributions were selected to set up the copula models. The three quality criteria all agreed in producing the same

ranking for the marginal distribution fitting. The term “relative fitting quality” refers to when a distribution is better fitted to a series than another distribution that was also tested. But, it does not demonstrate that the distribution is sufficiently well fitted in an absolute perspective, being one of the causes of the so-called epistemic uncertainty in hydrology-related studies.

After all the marginal models were fitted to the series, tested and the best selected, each series of AMS rainfall and cumulative rainfall must have its records made dimensionless, by transforming them into 0 to 1 values, according to the marginal distribution that best fitted each series. The dimensionless series are the ones to be considered in the establishment of the copulas.

The graphs in fig. 3 exemplify, for the AMS series and log-normal distribution, how the selected distributions fit the data series in the absolute sense, that is, based on the empirical and theoretical densities and cumulative distribution functions and Q-Q and P-P plots for the AMS fitted data. The good fitting exemplified in the figure is representative of the behaviour of all the marginal distributions selected to establish the copula models.

Once all the dimensionless series were calculated, the copulas can be modelled. For this purpose, different copula types were also compared, tested and selected.

The copula is a concept that derives its theory from the joint distribution notion. As indicated by Embrechts (2009), the bivariate copula can be argued as follows:

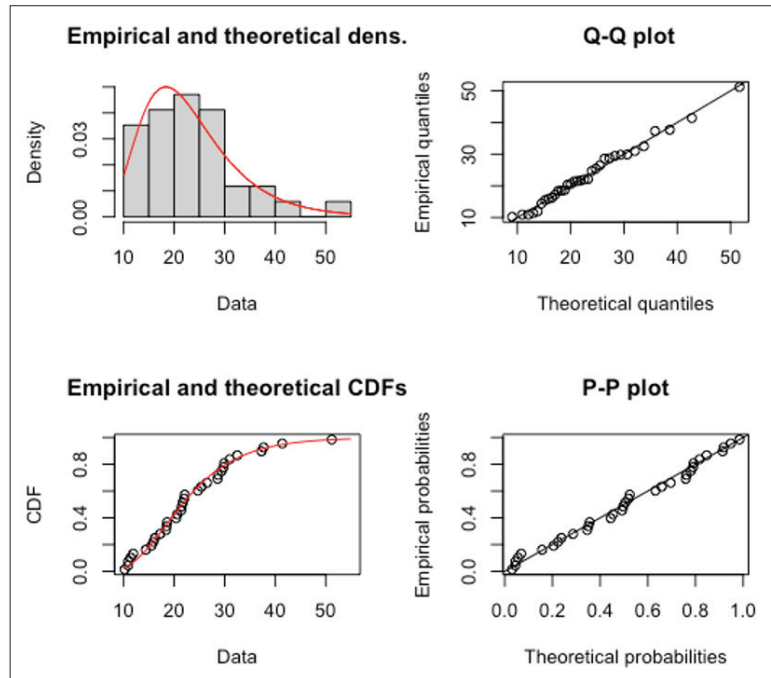


Fig. 3 - Four sample graphs showing X_0 's (AMS) best-fit marginal distribution (log-normal distribution).

Fig. 3 - Quatro gráficos exemplificativos da distribuição marginal de X_0 com melhor ajustamento (distribuição log-normal).

for two random variables, X and Y , with their respective continuous cumulative distribution functions H_1 and H_2 , there is a joint cumulative distribution function H , with $U_1 = H_1(X)$ and $U_2 = H_2(X)$ uniformly distributed random variables in $I \in [0,1]$.

For these premises, with the unit square I^2 being the product of $I \times I$, $\in [0,1]$ (Nelsen, 2007, p. 6), copula C in I^2 is the cumulative distribution function of a random vector $(U_1, U_2)^T$, is expressed by the following equation:

$$H(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y) = P(U_1 \leq H_1(x), U_2 \leq H_2(y))$$

With it its final form as:

$$H(x, y) = C(H_1(x), H_2(y)) = C(u, v)$$

Furthermore, the copula density function $c(u, v)$ can be defined by the joint probability density function h_{xy} (Zeng *et al.*, 2014):

$$c(u, v) = \frac{\partial^2 C(u, v)}{\partial u \partial v} = \frac{\partial^2 C(H_1(x), H_2(y))}{\partial H_1(x) \partial H_2(y)} = \frac{h_{xy}(x, y)}{h_X(x)h_Y(y)}$$

Alongside the various copula family groups, the use of transformed copulas was also considered. Transformations of copulas allow for a more varied approach to modelling the multivariate data. Yamaka *et al.* (2021) give the rendering of a mixed copula that originates from two n^{th} dimensioned copulas with the parameterisation θ_1 and θ_2 which are two generic parameters for their respective copulas C_{θ_1} and C_{θ_2} . For the mixing of two copulas, those authors suggest the use of a single weighting variable instead of a vector as found in Hofert *et al.* (2019, p. 129), where the weight is applied to the first copula, then $1 - w$ is applied to the second copula. His formulation is expressed as follows:

$$C_{mix}(u|\theta_1, \theta_2) = wC_{\theta_1}(u|\theta_1) + (1 - w)C_{\theta_2}(u|\theta_2)$$

The transformation of copulas permitted the bivariate analysis to include survival copulas and rotated copulas. In keeping with standard copula notation, Hofert *et al.* (2019, p. 41) express the survival copula with the following definitions: for $\bar{H}$ a multivariate survival function with n dimensions and their respective marginal distribution functions $(\bar{F}_1, \dots, \bar{F}_n)$ there is a survival copula $\bar{C}$ with n dimensions and x in $\mathbf{R}^n$. Its expression is:

$$\bar{H}(x) = \bar{C}(\bar{F}_1(x_1), \dots, \bar{F}_n(x_n))$$

The same authors define the rotated copula, capable of capturing negative dependencies, as C is an n^{th} dimensioned copula, $U-C$ and r is in I^n . As Hofert *et al.* (2019, p. 118) argue, the survival copula $\bar{C}$ of C is nothing else if not $rot_r(C)$. The mathematical expression is given by:

$$rot_r(C) \sim ((1 - r_1)U_1 + r_1(1 - U_1), \dots, (1 - r_d)U_d + r_d(1 - U_d))$$

After computation, the selected copulas were then studied for nonlinear correlations and return periods. The following 22 copulas were tested (identification

according to the “VineCopula” R package, <https://cran.r-project.org/web/packages/VineCopula/>): Independence copula; Gaussian copula; Student-t copula; Clayton copula; Gumbel copula; Frank copula; Joe copula; BB1 copula; BB6 copula; BB7 copula; BB8 copula; rotated Clayton copula; rotated Gumbel copula; rotated Joe copula; rotated BB1 copula; rotated BB6 copula; rotated BB7 copula; rotated BB8 copula; Tawn type 1 copula; rotated Tawn type 1 copula; Tawn type 2 copula; rotated Tawn type 2 copula. Each rotation was 180° .

The relative fitting quality of the different copulas was assessed based on the three estimators LLF, AIC, and BIC in much the same way as for the analyses of the marginal distributions.

Results

The best 18-fitting copula families adopted for further study were identified, along with the values of their parameters and of Kendall's coefficient, τ , among coupled rainfall series (TABLE III). Kendall, (1938) measures rank correlation, in a similar way to other correlation coefficients, the more similar the observations are by rank the closer the coefficient is to 1. Conversely, the more in disagreement the two rankings, the closer it is to -1; if the two random variables are independent, $\tau=0$. Therefore, τ always belongs in $[-1,1]$. As argued by Hofert *et al.* (2019, p. 57), this calculation is bound to induce a loss of information. However, it is standard practice to consider this rank correlation coefficient in the use of copulas (Chen and Guo, 2019, p. 25). In probabilistic terms, the notion of concordance in Kendall's tau is defined by considering two points (x, y) and (x', y') in $\mathbf{R}^2$. “There points are said to be concordant if $(x_1 - x'_1)(x_2 - x'_2) > 0$ (so if the slope of the line through the two points is positive) and to be discordant if $(x_1 - x'_1)(x_2 - x'_2) < 0$ ” (Hofert *et al.*, 2019, p.52). Therefore, is defined by:

$$\tau = P((X_1 - X'_1)(X_2 - X'_2) > 0) - P((X_1 - X'_1)(X_2 - X'_2) < 0)$$

Based on the copula cumulative distribution functions previously established, joint and conditional return periods were computed. In line with Espinosa *et al.* (2019), the bivariate constitution of the analysis proposed within this paper manifests bivariate results. Thus, the probabilities used for bivariate return periods all come from bivariate copulas.

Two types of joint return periods can be estimated, i.e., the union “or” and the intersection “and” types, both calculated from joint copulas. For two random variables X and Y and their respective cumulative distribution functions F_X and F_Y , their joint distribution H_{xy} and the copula C , the definition for joint “or” (union) return period $T_{(X \text{ or } Y)}$ is written as:

TABLE III - Copula families and parameters and the Kendall rank correlation coefficient between coupled variables.

TABELA III - Famílias e parâmetros das cópulas e coeficientes de correlação de Kendall entre precipitações horárias máximas anuais e correspondentes precipitações acumuladas.

	n	Copula family	Parameter 1	Parameter 2	τ
Rainfall before	1	Gaussian	0,91	-	0,73
	2	Gaussian	0,87	-	0,76
	3	BB7 copula	1,86	2,45	0,60
	4	BB7 copula	1,65	2,38	0,58
	5	BB7 copula	1,56	2,39	0,58
	6	BB7 copula	1,65	2,34	0,58
Rainfall after	1	Gaussian	0,86	-	0,66
	2	Frank copula	7,22	-	0,57
	3	Gaussian	0,68	-	0,47
	4	Rotated Twn type 1	2,45	0,62	0,42
	5	Rotated Twn type 1	2,38	0,59	0,39
	6	Gaussian	0,63	-	0,43

	n	Copula family	Parameter 1	Parameter 2	τ
Rainfall before and after	1	Gaussian	0,82	-	0,62
	2	Gaussian	0,75	-	0,54
	3	Gaussian	0,68	-	0,48
	4	Gaussian	0,64	-	0,44
	5	Gaussian	0,61	-	0,42
	6	Gumbel copula	1,83	-	0,45

$$T_{X \text{ or } Y} = \frac{E(L)}{P(X \geq x \text{ or } Y \geq y)} = \frac{E(L)}{1 - H_{XY}(x, y)} = \frac{E(L)}{1 - C(F_X(x), F_Y(y))}$$

The definition for joint “and” (intersection) return period $T_{(X \text{ and } Y)}$ is defined as:

$$T_{X \text{ and } Y} = \frac{E(L)}{P(X \geq x, Y \geq y)} = \frac{E(L)}{1 - F_X(x) - F_Y(y) + C(F_X(x), F_Y(y))}$$

Furthermore, from a joint copula, the conditional return periods can also be calculated. For the same generic variables stated before, a conditional return period can be understood and calculated as X given Y ($X|Y$) or Y given X ($Y|X$). The definition for conditional return period or X given Y, $T_{(X|Y)}$ can be written by the following equation in relation to T_Y , the univariate return period.

$$T_{X|Y} = \frac{T_Y}{P(X \geq x, Y \geq y)}$$

The definition for the conditional return period Y given X, $T_{(Y|X)}$ can be written in relation to the univariate return period as follows:

$$T_{Y|X} = \frac{T_X}{P(X \geq x, Y \geq y)}$$

With all return periods now calculated, the analysis of the final results can be done. Fig. 4 exemplifies some of the results achieved based on the representation of the contour lines of the “or” and “and” joint return periods as a function of the coupled (X_0, X_n^B) extreme rainfall events and by highlighting from those events the ones that were identified as having originated debris floods. Such a type of representation is the more suitable one since various combinations of the coupled events can have the same return period.

In each diagram, the x-axis refers to the hourly AMS series (X_0) , and the y-axis to cumulative series of rainfall from 1 to 6 h temporarily contiguous to the annual maxima and including the maxima. From the 34 coupled rainfall events, the white circles represent the 23 that

were not identified as debris flood-triggering events, the red circles and slightly bigger orange circle represent the 11 rainfall events of TABLE I that are associated with debris floods, the orange one refers to the late February 2010 flood. The contour lines for the hourly AMS rainfall separately coupled with the series of cumulative rainfalls before, (X_0, X_n^B) , and after, (X_0, X_n^A) , the AMS have similar general shapes.

The figure exemplifies the differences between “or” and “and” joint return periods, the latter ones being always considerably higher because they express the probability of the events formed by each two coupled rainfalls instead of considering separately and alternatively those rainfalls. This demonstrates how relevant it is to consider the association of rainfall events when characterizing the exceptionality of their extreme occurrences.

Fig. 4 also shows that the 2010 late February rainfall event (slightly bigger orange circles) is always set apart from the other 33 extreme rainfall events represented, thus showing its true exceptionality, in relative, but also absolute terms. This is especially evident for the “and” results and values of “n” up to 5, with joint return periods close to 500 years while all the remaining rainfall events that generated debris floods have return periods of ca. 30 years.

There is also a noticeable tendency for rainfall events that were associated with debris floods to have higher return periods than those without such type of floods assigned. Especially for values of “n” from 3 to 5, there is, however, an exception for three events that were not coupled with debris floods which suggests that extreme rainfalls may have different consequences depending on the antecedent wetness conditions of the watersheds. The figure also shows that the coupled extreme rainfall events become less clustered as the duration of the

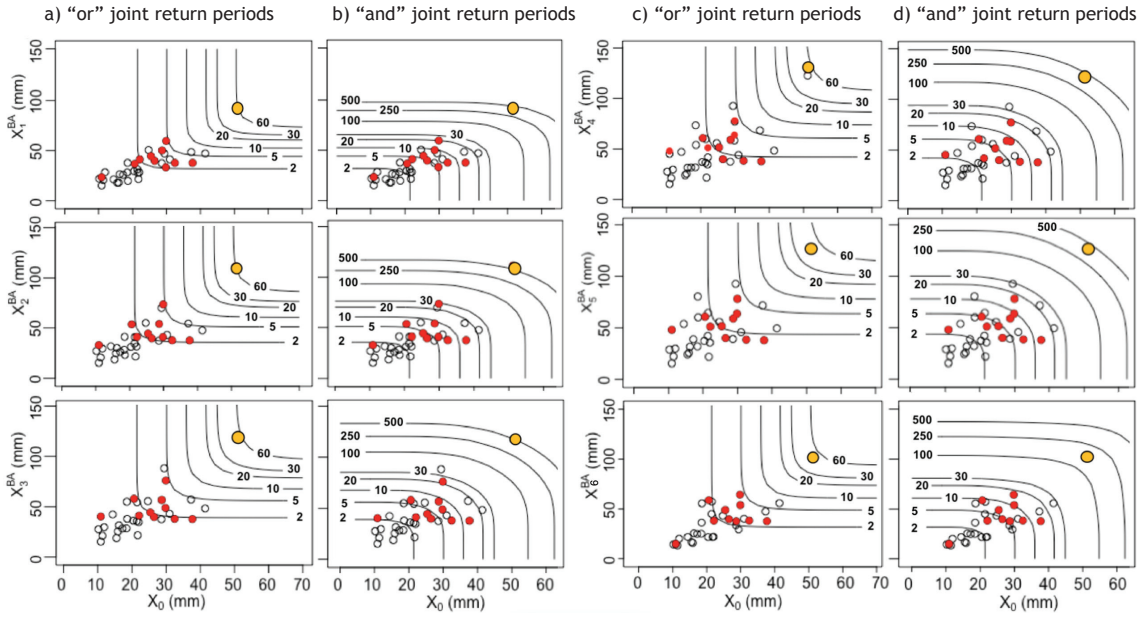


Fig. 4 - Contour lines of joint “or” - a) and c) - and “and” - b) and d) - return periods (years) for coupled hourly AMS (X_0) and cumulative hourly rainfalls in 1 to 6 h before and after the annual maximum, X_1^{BA} to X_6^{BA} . The red and the slightly bigger orange circles represent the coupled (X_0 , X_n^{BA}) extreme rainfall events to which debris floods were coupled, with the orange one referring to the deadly event of late February 2010 (from top to bottom, 1 to 3 h on the left side, and 4 to 6 h on the right side).

Fig. 4 - Isolinhas dos períodos de retorno (anos) conjuntos “ou” - a) e c) - e “e” - b) e d) - para precipitações horárias máximas anuais (X_0) e correspondentes precipitações acumuladas com durações de 1 a 6 h antecedendo e seguindo-se àqueles máximos, X_1^{BA} a X_6^{BA} . Os círculos preenchidos a vermelho e a laranja ligeiramente maiores representam os acontecimentos extremos de precipitação (X_0 , X_n^{BA}) a que foram atribuídas ocorrências de aluviões, sendo que aqueles últimos círculos se referem ao acontecimento mortal de finais de fevereiro de 2010 (de cima para baixo, 1 a 3 h, do lado esquerdo, e 4 a 6 h, do lado direito).

cumulative rainfalls increases. This is expected since there are more hours being observed and analysed, which tends to increase the variability of the data.

As part of this study, two types of conditional return periods were also calculated: the return period of AMS events given the cumulative rainfall events, and the return period of the cumulative rainfall events given the AMS events.

The conditional return periods also identified the 2010 late February event as being truly exceptional. However, the nature of conditional probabilities resulted in return periods far beyond understandable values. This is especially notable for the 2010 February rainfall event with return periods over ten thousand or even over one hundred thousand years. For example, the return period of the AMS given the cumulative rainfall 2 h before and after the annual maximum is:

$$T_{X_0|X_2^{BA}} = \frac{T_{X_2^{BA}}}{P(X_0 \geq x_0, X_2^{BA} \geq x_2^{BA})} = 208396 \text{ years.}$$

All other conditional return periods are in general much larger than those from the joint analyses and are mostly unreasonably higher, making it hard to adopt them as measures of the exceptionality of the rainfall events.

Discussion and Conclusion

The results previously presented exemplify how the copula analysis can contribute to understanding the way the cumulative rainfall during an extreme event constrains its exceptionality, especially with the use of the joint “and” return periods. The analysis stressed the exceptionality of the deadly late February 2010 event.

Joint and conditional probabilities do not result in similar return periods, even in the $\times 10$ to the n^{th} power. Conditional return periods were often unreasonably high, suggesting that they may not be adequate to quantitatively characterize the rainfall events. Though they still seem to describe exceptionality qualitatively, this is, they can identify that one event is less probable than another, they do not give a perceptible measure of its return period values. The joint “and” return periods were larger than their “or” counterparts, which is statistically expected. However, the “or” combination might not provide the most exact probability values when trying to relate extreme rainfalls to another event, in this case, debris floods. This is due to the “or” combination expressing the return period of either the annual maximum (or greater) or the cumulative occurring. Another reason for

the “or” analysis not being the best way to understand the exceptionality of such events is that there is little variability between return period values. It is difficult to distinguish exceptionality, when the probabilities are so clustered, therefore not allowing to distinguish among events. Consequently, the joint “and” return periods might be the best estimates of the exceptionality of the extreme rainfall events and their associated debris floods.

For the late February 2010 rainfall event, fig. 5 was obtained to further compare the “or” and “and” bivariate results, between them but also with those from a univariate approach applied to the cumulative rainfall series, including the hourly AMS. The figure also provides additional insights into the characteristics and exceptionality of such rainfall events.

Based on the previous figure a conclusion can be made that the univariate approach also results in relatively high return periods, particularly for the cumulative rainfall 1 h before the annual maximum (ca. 700 y) and 1 and 2 h before and after this maximum (ca. 275 and 340 y, respectively). The highest return period given by the bivariate “and” approach relates to cumulative rainfalls of 2 h before the annual maximum (ca. 1060 y), which also contributed to the very high return period obtained for 2 h before and after that maximum (ca. 605 y). The differences between joint and univariate return periods and between “or” and “and” joint return periods are seemingly apparent.

In any case, the results indicate that to understand the consequences, in terms of debris floods, of a given rainfall event it is important to look at “coupled” extreme rainfalls, namely under an “and” perspective, as the best way of getting a descriptor of the wetness conditions able of triggering such a type of floods.

Another conclusion can be made regarding the use of the AMS technique: despite its simplicity in terms of models and data requirements, it does not capture the fullness of the extreme rainfall data because it discards values

that, despite being higher than some of the AMS series, are smaller than the maxima in the years they relate to. A possible improvement could be to use of an alternative sampling technique, namely, the Peaks Over Threshold, POT, technique (Liu *et al.*, 2013, Mase, 1996). In the POT technique, any value above a prefixed threshold is considered an extreme event, provided some theoretical prerequisites are met (Silva *et al.*, 2012). This would result in longer extreme rainfall series with, on average, more than one value per year, and, in turn, possibly more accurate fittings for marginal distributions and higher accuracy of the copula models.

In addition to reviewing the AMS criteria, the length of time accounted in the cumulative variables could also be extended. As stated initially, the same study was performed on cumulative rainfalls of up to 6 days before and/or after and the results were similar. However, it would be interesting to analyse how the preceding months’ rainfall relates to debris flooding adjacent to annual maximums or peaks above a threshold.

It should be pointed out that it is important to analyse other areas of Madeira Island. Many of the debris floods identified by Sepúlveda (2011) were not coupled with extreme rainfall events because they were not reported as having affected the Funchal area, i.e., they did not meet the spatial criterion previously mentioned. Further development of the analysis of these additional areas, but also in the Funchal area, could include the implementation of copula models in a “multivariate” perspective, by considering other variables (e.g., related to geomorphology or terrain slopes) able of quantifying the “degree of destruction” or the “intensity” of the debris floods that were coupled with extreme rainfall events. Though presently lacking the data, this would be a possible development from the current binary system of coupled rainfall-alluvium events, because it would allow, in a quantitative manner, to understand if a more exceptional rainfall produced more exceptional debris floods. Currently, only rainfall

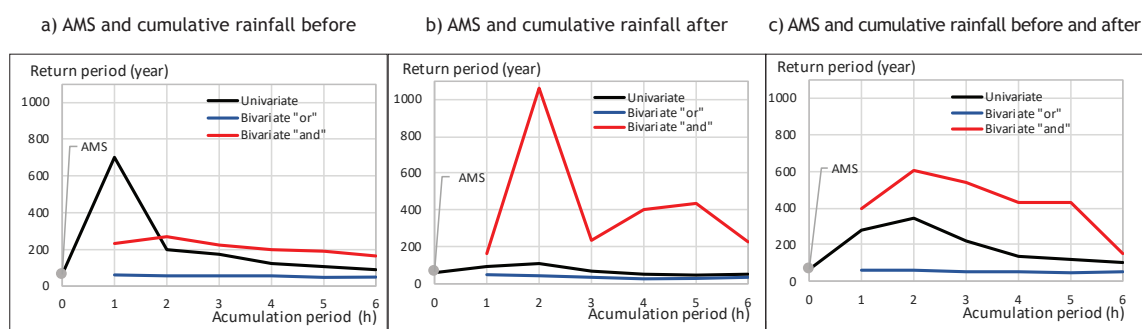


Fig. 5 - Rainfall event of 20 February 2010. Univariate and bivariate return periods for the annual maximum hourly rainfalls (AMS) and the cumulative rainfall, from 1 to 6 h: a) before; b) after; and c) before and after.

Fig. 5 - Acontecimento pluvioso de 20 de fevereiro de 2010. Períodos de retorno univariados e bivariados para precipitações horárias máximas anuais e correspondentes precipitações acumuladas com durações de 1 a 6 h e ocorrendo: a) antes; b) depois; e c) antes e depois daqueles máximos.

variables were quantified and analysed through the copula approach. If the characteristics of the debris floods were also quantified, their relationship with extreme rainfall could return more precise interpretations of the rainfall-debris flooding triggering process.

These conclusions and further research could greatly aid governments and companies (in Madeira) to deal with extreme rainfalls and to investigate ways of mitigating the consequences of those deadly events.

References

- Chen, L., Guo, S. (2019). *Copulas and Its Application in Hydrology and Water Resources*. Germany: Springer Singapore. ISBN 978-981-13-0573-3.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0574-0>
- Embrechts, P. (2009). Copulas: A personal view. *Journal of Risk and Insurance*, 76(3), 639-650.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6975.2009.01310.x>
- Espinosa, L. A., Portela, M. M., Pontes Filho, J. D., Studart, T. M. D. C., Santos, J. F., & Rodrigues, R. (2019). Jointly modeling drought characteristics with smoothed regionalized SPI series for a small island. *Water*, 11(12), 2489. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11122489>
- Fragoso, M., Trigo, R. M., Pinto, J. G., Lopes, S., Lopes, A., Ulbrich, S., & Magro, C. (2012). The 20 February 2010 Madeira flash-floods: synoptic analysis and extreme rainfall assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(3), 715-730.
DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-12-715-2012>
- Gomes, L. R. (2021). *Bivariate analysis of intense rainfall on the island of Madeira and its relationship with alluvium flood events (MSc Thesis)*. Instituto Superior Técnico. Lisbon University.
- Hofert, M., Kojadinovic, I., Mächler, M., & Yan, J. (2019). *Elements of copula modeling with R*. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-89634-2.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-89635-9>
- Kao, S. C., & Govindaraju, R. S. (2010). A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology*, 380(1-2), 121-134.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.029>
- Kendall, M. G. (1938). A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30(1/2), 81-93.
DOI: <https://doi.org/10.2307/2332226>
- Levizzani, V., Laviola, S., Cattani, E., & Costa, M. J. (2013). Extreme precipitation on the Island of Madeira on 20 February 2010 as seen by satellite passive microwave sounders. *European Journal of Remote Sensing*, 46(1), 475-489. DOI: <https://doi.org/10.5721/EuJRS20134628>
- Liu, B., Chen, J., Chen, X., Lian, Y., & Wu, L. (2013). Uncertainty in determining extreme precipitation thresholds. *Journal of hydrology*, 503, 233-245.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.002>
- Lopes, S., Fragoso, M., & Lopes, A. (2020). Heavy rainfall events and mass movements in the funchal area (Madeira, Portugal): Spatial analysis and susceptibility assessment. *Atmosphere*, 11(1), 104.
DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11010104>
- Mase, S. (1996). The threshold method for estimating total rainfall. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*. 48:201-213.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00054785>
- Moffatt, M. (2020). An Introduction to Akaike's Information Criterion (AIC). <https://www.thoughtco.com/introduction-to-akaikes-information-criterion-1145956> (accessed March 2021).
- Nelsen, R. B. (2007). *An introduction to copulas*. Springer science & business media.
DOI: <https://doi.org/10.1007/0-387-28678-0>
- Quintal, R. (1999). Quintal, Raimundo. Aluviões da Madeira. Séculos XIX e XX. *Territorium - Revista de Geografia Física Aplicada no Ordenamento do Território e Gestão de Riscos Naturais*, n.º 6: 31-48.
DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_6_4
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The annals of statistics*, 461-464.
DOI: <https://doi.org/10.1214/aos/1176344136>
- Sepúlveda, S. (2011). *Avaliação da precipitação extrema na Ilha da Madeira (MSc Thesis)*. Instituto Superior Técnico. Lisbon University (in Portuguese).
- Shiau, J. T., & Shen, H. W. (2001). Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity. *Journal of water resources planning and management*, 127(1), 30-40.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2001\)127:1\(30\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:1(30))
- Silva, A. T., Portela, M. M., & Naghettini, M. (2012). Nonstationarities in the occurrence rates of flood events in Portuguese watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), 241-254.
DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-16-241-2012>
- Tahroudi, M. N., Ramezani, Y., De Michele, C., & Mirabbasi, R. (2020). Analyzing the conditional behavior of rainfall deficiency and groundwater level deficiency signatures by using copula functions. *Hydrology Research*, 51(6), 1332-1348.
DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2020.036>
- Yamaka, W., Gupta, R., Thongkairat, S. and Maneejuk, P. (2021). Structural and predictive analyses with a mixed copula-based vector autoregression model. *Working Papers Series* (n.º 202108). University of Pretoria Department of Economics.
- Zeng, X., Ren, J., Wang, Z., Marshall, S., & Durrani, T. (2014). Copulas for statistical signal processing (Part I): Extensions and generalization. *Signal processing*, 94, 691-702.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.07.009>
- Zhang, L., & Singh, V. P. (2007). Bivariate rainfall frequency distributions using Archimedean copulas. *Journal of Hydrology*, 332(1-2), 93-109.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.033>



RISCOS

territorium 31 (I), 2024, 43-58

journal homepage: <https://territorium.riscos.pt/numeros-publicados/>

DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_31-1_4

Artigo científico / Scientific article



INUNDAÇÕES E UNIDADES CONSTRUÍDAS EM MARABÁ: UM ESTUDO DE CASO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA*

FLOODS AND BUILT UNITS IN MARABÁ: A CASE STUDY IN THE BRAZILIAN AMAZON

43

Marlisson Lopes de Araújo

Universidade Federal do Pará-UFPA (Brasil)

Programa de Pós-Graduação em Geografia-PPGEO

ORCID 0000-0003-2560-0435 marlissonla@hotmail.com

Milena Marília Nogueira de Andrade

Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA e Universidade Federal do Pará-UFPA (Brasil)

Programa de Pós-Graduação em Geografia-PPGEO

ORCID 0000-0001-5799-7321 milena.andrade@ufra.edu.br

RESUMO

O objetivo desse artigo versa sobre o mapeamento das unidades construídas expostas (residências, escolas, lojas, restaurantes, bares, comércio e prédios públicos) a inundação dos rios Tocantins e Itacaiúnas na área urbana da cidade de Marabá (estado do Pará, Brasil). A metodologia envolveu o levantamento e o processamento digital de imagem do satélite Cbers 4A (com resolução espacial de 2m, ano de 2021), a vetorização e a correção dos polígonos realizada com o apoio do Google Earth, juntamente com levantamento de campo para validação dos dados. O processamento foi realizado com o auxílio do software Qgis versão 3.16.6 e consistiu no mapeamento das unidades construídas impactadas pelas inundações, tendo como parâmetro a cota de alerta mínima de 82m. Referência para o mapeamento das unidades residenciais situadas abaixo da referida cota. Foram mapeadas um total de 6583 unidades construídas expostas a inundação na área urbana de Marabá. Desse total, 220 estão localizadas no núcleo urbano de São Félix, 1527 no núcleo Nova Marabá, 2684 na Marabá Pioneira e 2152 na Cidade Nova.

Palavras-chave: Desastre, evento hidrológico, exposição, geoprocessamento.

ABSTRACT

The objective of this article is to map built units (residences, schools, stores, restaurants, bars, commerce and public buildings) exposed to the flooding of the Tocantins and Itacaiúnas rivers in the municipality of Marabá (state of Pará, Brazil). The methodology involved the survey and digital processing of the Cbers 4A satellite image (with a spatial resolution of 2 m, year 2021), the vectorization and correction of the polygons carried out with the support of Google Earth, together with a field survey to validate the data. The processing was performed with QGIS software version 3.16.6 and consisted of mapping the built units impacted by the floods, using a minimum alert height of 82 m as a parameter. Reference for mapping residential units located below said quota. A total of 6583 built units exposed to flooding in the municipality of Marabá were mapped. Of this total, 220 are located in the urban centre of São Félix, 1527 in the Nova Marabá urban centre, 2684 in Marabá Pioneira and 2152 in Cidade Nova.

keywords: Disaster, hydrological event, exposure, geoprocessing.

* O texto deste artigo corresponde a uma comunicação apresentada no IV Simpósio Ibero-Afro-Americano de Riscos, tendo sido submetido em 16-12-2022, sujeito a revisão por pares a 18-02-2023 e aceite para publicação em 21-11-2023.

Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 31 (I), 2024, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

Os rios e as inundações fazem parte da história das civilizações, contudo nas últimas décadas, o número de ocorrências e o número de pessoas afetadas vêm aumentando significativamente. Este aumento vem acompanhando a tendência relacionada a todos os tipos de desastres naturais. Este fato pode ser atribuído às alterações da sociedade sobre a natureza, principalmente relacionadas com a intensa urbanização, ocupação de áreas de risco e mudança de uso e cobertura da terra relacionada ao desmatamento (Goerl e Kobiyama 2005).

As mudanças climáticas, associadas as condições do espaço natural e a pobreza urbana atuam na intensificação dos desastres socioambientais, em especial, as inundações urbanas. Dependem exclusivamente das características e da intensidade desses fenômenos, dependem também, da exposição e da vulnerabilidade ao qual o ambiente está condicionado. É justamente a associação de uma sociedade altamente vulnerável e que associado a eventos climáticos extremos formam condições favoráveis ao desenvolvimento de desastres naturais (Costa 2012).

Röthlisberger *et al.* (2017) destacaram que a análise de risco de inundação envolve informações sobre perigo (frequência e intensidade das inundações), exposição (população e infraestrutura localizadas em áreas suscetíveis a inundações) e vulnerabilidade (características dos elementos expostos à ameaça). Para este estudo, foi adotada a definição de exposição como a situação das pessoas, infraestrutura, habitação, capacidades de produção e outros ativos humanos tangíveis em áreas propensas a perigos hidrológicos (UNISDR 2015).

Compreender a exposição e realizar uma análise de dados associada a ela pode influenciar decisões e estratégias baseadas na análise de risco. A análise da exposição depende da disponibilidade, resolução e qualidade dos dados, incluindo informações sobre vulnerabilidade, como pessoas afetadas, edifícios, infraestruturas, e também sobre a natureza da ameaça, extensão e magnitude das inundações (Röthlisberger *et al.* 2017).

A exposição envolve pessoas, propriedades, sistemas viários (ruas, avenidas, travessas, ferrovias) e outros elementos presentes em zonas de ameaça (áreas com alta suscetibilidade a inundações) e que, dessa forma, estão sujeitas a danos potenciais. Como devemos medir a exposição deve estar associada ao número de pessoas ou de infraestruturas públicas nas áreas afetadas. Assim, a combinação da exposição com a vulnerabilidade destes parâmetros permite estabelecer uma estimativa do risco de ocorrência do fenômeno (Miguez *et al.*, 2018).

No Brasil, Segundo a Secretaria Nacional de Defesa Civil/UFSC (2022), nos últimos 30 (1991-2020) anos, as inundações causaram 20,1 bilhões de reais em perdas

materiais, 5,5 bilhões de prejuízos públicos e 15,4 bilhões de prejuízos privados, com 7.865.416 pessoas desabrigadas e desalojadas, 4.307 óbitos e mais de 3 milhões de habitações destruídas ou danificadas, principalmente, em razão da ocupação desordenada das margens de rios e impermeabilização do solo de bacias urbanas.

De acordo com Szlafsztein *et al.* (2010) na Amazônia, em cenários de maior e mais intenso uso das florestas e ocupação das cidades, assim como de mudanças no clima, permitem prever uma acentuação da possibilidade de ocorrência de desastres relacionados as inundações.

Portanto, o desafio é desenvolver e estabelecer cenários que possam auxiliar na implementação de políticas públicas, assim como estratégias e medidas relacionadas à gestão dos riscos, de desastres que respondam às peculiaridades da região Amazônica.

As inundações são frequentes na região norte, sobretudo por esse espaço geográfico apresentar um elevado índice pluviométrico, que podem chegar a máximas de 3.000mm e mínimas de 2.000mm, assim como uma densa rede de bacias e sub-bacias hidrográficas.

A cidade de Marabá (localizada na região sudeste do estado do Pará, fig. 1) é um destaque importante, pois é cortada por dois rios (Tocantins e Itacaiúnas) e seu processo de ocupação se deu em virtude da dinâmica dos rios, obedecendo um padrão de ocupação da região em que várias cidades surgiram a partir dessa dinâmica (Trindade Júnior 2010).

Cabe destacar que, a frequência com que as águas do Rio Tocantins e Itacaiúnas ultrapassam a cota de 10 metros (cota de elevação das águas dos rios) é acima de 70%. Portanto a inundação na cidade de Marabá tem uma probabilidade alta de ocorrer (Bentes 2018). Na cidade de Marabá, no período de 1971 a 2021, a defesa civil registrou esse fenômeno por 41 vezes, de acordo (UFSC; CEPED 2013; Ana 2021).

Marabá enfrenta muitos desafios socioeconômicos, incluindo pobreza (pessoas sem renda mínima) e infraestrutura limitadas em algumas áreas (no geral na periferia da cidade). A infraestrutura urbana apresenta serviços básicos (nas áreas de ocupações espontâneas), como falta de pavimentação adequada e saneamento básico precário é uma realidade desses espaços. A cidade é um importante centro econômico, com destaque para agricultura, mineração, comércio e serviços. As casas do programa minha casa-minha vida foram construídas no bairro São Félix, distantes das áreas de influências dos rios Tocantins e Itacaiúnas.

Na região de Marabá, nos meses de maior índice pluviométrico (janeiro a março), as águas dos rios Tocantins e Itacaiúnas se elevam de forma gradual quando o aumento do nível dos rios aumenta

paulatinamente (Almeida 2011). Essa elevação gradual dos rios está diretamente relacionada a quantidade de chuva que ocorre na região nesse período. Existem também casos de inundações rápidas (Andrade 2014; Andrade e Szlufsztein 2015) que são “[...] *provocadas por chuvas intensas e concentradas, em regiões de relevo acidentado, caracterizando-se por produzirem súbitas e violentas elevações dos caudais, as quais escoam de forma rápida e intensa*” (Castro, 2003).

A junção de pobreza, habitação improvisada (favelização ou Habitações subnormais), pouca infraestrutura (ruas sem pavimentação asfáltica, falta de saneamento básico, falta de redes de esgoto e de tratamento de água, deficiência na iluminação pública) com a ocupação de espaços expostos a perigos naturais (inundações e enchentes), criou territórios de riscos e vulnerabilidades, que estão diretamente ligados com os ambientes fluviais urbanos (Almeida 2010). Para a Unlshr (2004) a vulnerabilidade refere-se às “[...] *condições determinadas por fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade de uma comunidade ao impacto de uma ameaça*”.

De acordo com Bentes (2018), as inundações na cidade de Marabá (estado do Pará, Brasil), causam danos significativos. As edificações são parcial ou totalmente submersas, resultando em danos estruturais muitas vezes irreversíveis. Além disso, há o deslocamento de um grande número de famílias nas diversas áreas afetadas pela inundação nos diferentes núcleos urbanos da cidade.

Este artigo tem como objetivo mapear as unidades construídas expostas ao risco de inundação dos rios Tocantins e Itacaiúnas na cidade de Marabá (estado do Pará, Brasil). As inundações nessas áreas afetam tanto elementos naturais quanto humanos, incluindo estruturas históricas como o Museu Municipal Francisco Coelho localizado no núcleo urbano da Marabá Pioneira.

Área de estudo

A área de estudo corresponde ao espaço urbano da cidade de Marabá, situada na Amazônia Brasileira, na porção ocidental. O município localiza-se no sudeste do estado do Pará, encontra-se dentro da região hidrográfica Tocantins-Araguaia e sub-bacia do rio Itacaiúnas, na margem esquerda do rio Tocantins. Situa-se entre as coordenadas geográficas: 5° 20' 08" Latitude Sul/49° 04' 51" Longitude Oeste e 5° 44' 35" Latitude Sul/49° 13' 50" Longitude Oeste. Possui uma altitude que varia de 56 metros a 782 metros em relação ao nível do mar e sua área urbana totaliza 302,115 km². O perfil topográfico da área urbana é constituído de planícies fluviais, terraços fluviais rebaixados, terraços fluviais parcialmente urbanizados e planaltos dissecados com ocupação consolidada. Possui uma população estimada em 266.536 Habitantes (IBGE 2022). Sendo 118.196 homens e 115.473 mulheres (IBGE 2010). Com uma densidade demográfica de 17,62hab/km² (IBGE 2022). Atualmente o perímetro urbano de Marabá está dividido em 5 núcleos, 1 distrito industrial e 2 áreas de expansão (fig. 1).

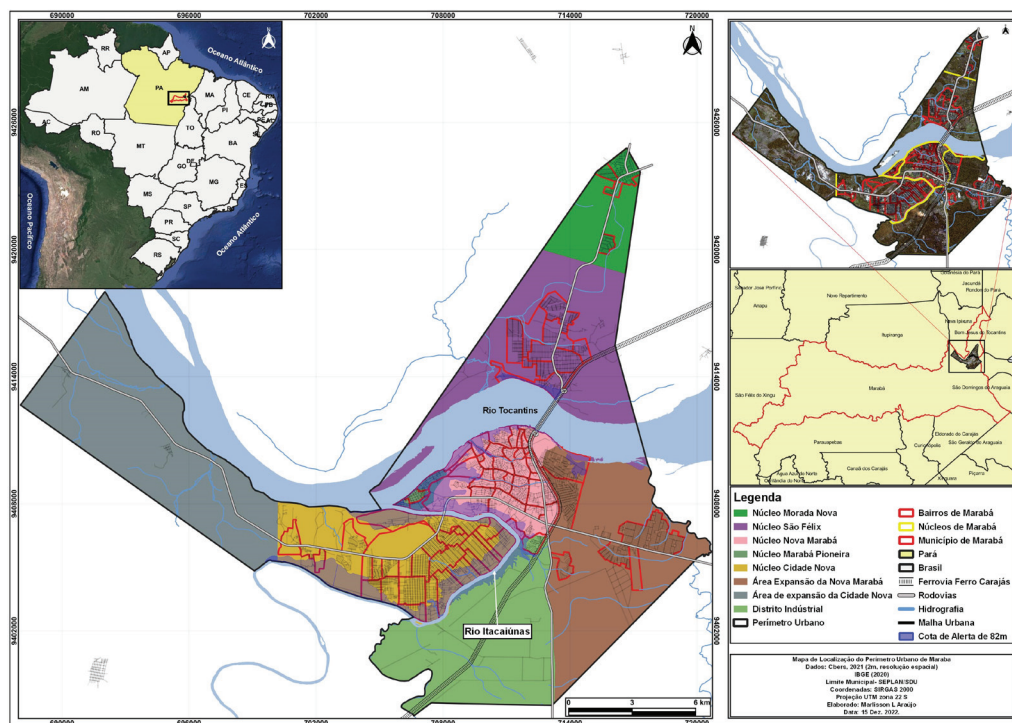


Fig. 1 - Mapa de localização da área de estudo/Perímetro urbano de Marabá-PA.

Fig. 1 - Location map of the study area/urban perimeter of Marabá-PA.

Formação e caracterização da área de estudo

A formação histórica da cidade de Marabá, desde seu surgimento, está relacionada as atividades econômicas e políticas de desenvolvimento que, conduziram a um elevado aumento populacional, em alguns momentos, que deu origem a uma ocupação e uso do solo conflitantes, em algumas áreas, com as condições ambientais locais (Raiol, 2010). De acordo com este autor, a expansão urbana de Marabá está vinculada a quatro períodos distintos de acordo com os ciclos econômicos que ocorreram na cidade (QUADRO I). Nos dias atuais, na cidade de Marabá convivem três grandes eixos de desenvolvimento econômico, oriundos dos ciclos econômicos, que são: agropecuário e madeireiro, Programa Grande Carajás e o eixo industrial, incluindo a indústria de ferrogusa, que produzem alterações no estado do meio ambiente (Raiol, 2010).

O primeiro período vai de 1913 a 1920 caracterizado por uma significativa imigração alterando o uso territorial. Neste intervalo foi ocupada a área oeste da hoje chamada Marabá Pioneira, limitada pelos rios Tocantins e Itacaiunas e pela atual rua Lauro Sodré, que registra a ocupação até 1928, através de uma estrutura viária radial, abrindo-se para o interior (fig. 2).

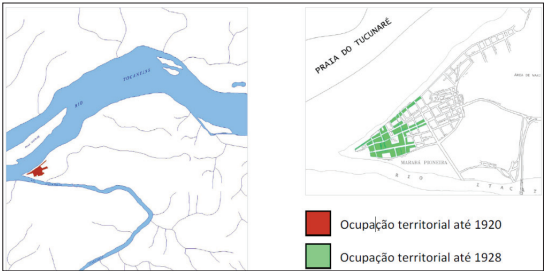


Fig. 2 - Evolução da ocupação territorial de 1913 a 1928
(Fonte: Raiol, 2010).

Fig. 2 - Land occupation from 1913 to 1928
(Source: Raiol, 2010).

O segundo período é marcado pela reconstrução e requalificação urbana da cidade em virtude de ter sofrido em 1926 uma grande inundação. Esse momento marca a concordância, em função de questões econômicas, de se conviver com o evento periódico das cheias e inundações. A estrutura da cidade modificou-se com abertura de novas vias, asfaltamento, construção de prédios escolares, hospitalares, comerciais e residenciais segundo um padrão acima do que existia na cidade. As expansões urbanas, limitadas pelos rios, avançavam no sentido nordeste, de tal forma que em 1947 já ocupava a orla até onde hoje há a travessa Nossa Senhora das Graças, para atender ao crescimento populacional que, em 1950, indicava uma população de 11.130 habitantes (Raiol, 2010).

Durante o governo militar, ocorreu a criação da Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM) e do Banco da Amazônia, em 1966 e, através destes, uma política de incentivos fiscais promoveu transformações significativas no uso do solo urbano e rural. Nessa ocasião iniciou-se a exploração do minério de ferro na Província Mineral dos Carajás e a construção da então PA-70, hoje BR-222, ligando definitivamente Marabá à rede rodoviária nacional, através da rodovia Belém-Brasília, que havia sido aberta em 1960. Até então, todo escoamento da produção, tanto de castanha-do-pará como de outros produtos, era realizado através do rio Tocantins para o porto de Belém do Pará. Com a PA-70, Marabá rompia o isolamento geográfico e, ao mesmo tempo, sua dependência em relação à capital do Estado (Raiol, 2010) (fig. 3).

O terceiro período de expansão urbana da cidade de Marabá aconteceu de 1970 a 1980 e foi marcado por uma nova fase de desenvolvimento econômico baseado nas atividades pecuária e madeireira. Nesse contexto, o Instituto Nacional de Reforma Agrária (INCRA), começa o processo de colonização e passa a oferecer incentivos aos grupos de empresários que chegavam na região, de

QUADRO I - Os Ciclos Econômicos em Marabá.

CHART I - Economic Cycles in Marabá.

1ª Fase	2ª Fase	3ª Fase	4ª Fase
1913-1920	1920-1970	1970-1980	1980- Aos dias atuais
1º Ciclo da Borracha (1910- 1915) 2º Ciclo da Borracha (1945- 1950)	Ciclo da Castanha	Agropecuária e Madeireira	Mineração e Indústria
Principais Projetos	Principais Projetos	Principais Projetos	Principais Projetos
1913 - Criação do município de Marabá	1937 - Construção do Aeródromo; 1940 - Surgimento do bairro Amapá; 1960 - Construção da Rodovia Belém-Brasília; 1966 - Construção da PA-70; 1970 - Implantação dos Projetos de Integração Nacional - PIN	1971 - Implantação do projeto do INCRA; 1971 - Implantação da Transamazônica; 1971 - Implantação do projeto de incentivos fiscais; 1973 - Construção da UHE de Tucuruí; 1974 - Surgimento dos Núcleos urbanos Nova Marabá e Cidade Nova.	1980 - Início da Exploração de ouro em Serra Pelada; 1981 - Implantação do Projeto Grande Carajás; 1990 - Início da Indústria de ferrogusa; 2022 - Construção de Ponte Rodoviária e Implantação do projeto Tecnoled (Vale).

Fonte: Adaptado de Raiol, 2010 / Source: Adapted from Raiol, 2010.

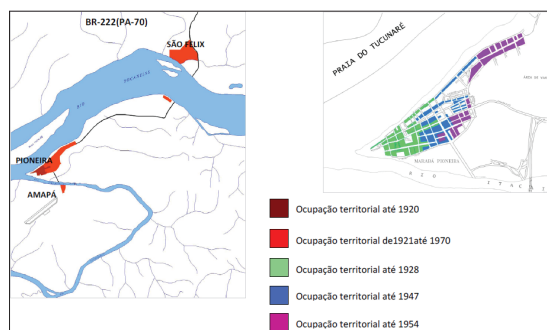


Fig. 3 - Evolução da ocupação territorial até 1970
(Fonte: Raiol, 2010).

Fig. 3 - Land occupation until 1970
(Source: Raiol, 2010).

modo que os colonos e pequenos agricultores ficaram totalmente desassistidos pelo poder público (Raiol, 2010).

O quarto período é caracterizado por um momento geopolítico importante para a região, pois levou o governo federal a implantar, em 1981, o Programa Grande Carajás voltado para exploração mineral através da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), então uma empresa estatal. Em função desse programa, foram construídas duas obras que influenciaram muito na estrutura da cidade: a ponte rodoviária sobre o rio Itacaiunas, interligando o núcleo Cidade Nova aos dois outros, em 1981, e a ponte rodoferroviária sobre o rio Tocantins, juntamente com a ferrovia Carajás-Itaqui, em 1984, destinada a escoar o minério de exportação através do porto de Itaqui, no Maranhão. Decorre desse programa, também, a implantação do Distrito Industrial de Marabá (Raiol, 2010) (fig.4a e 4b).

Aspectos físicos da área de estudo

A geomorfologia predominante no perímetro urbano de Marabá caracteriza-se pelas planícies de inundação, terraços fluviais rebaixados, tabuleiros dissecados e planaltos dissecados. As áreas de planícies possuem as menores cotas topográficas, que variam entre 56 a 85m e margeiam os rios Tocantins e Itacaiunas. A planície em questão encontra-se totalmente ocupada pela mancha urbana, que recebe influência direta das formas de uso e ocupação, sobretudo pela impermeabilização ocasionada para a construção dos imóveis e dos arruamentos (avenidas, ruas, calçamento) (Vidal, 2017) (fig. 5).

As formações geológicas que predominam na área são Couto Magalhães com predominância de rochas metamórficas; depósitos aluvionares, com material superficial e sedimentos inconsolidados e formação Itapecuru constituída de rochas sedimentares/clástica (CPRM, 2012) (fig. 6).

O clima predominante em Marabá segundo a classificação de Köppen é o AW-Tropical ou clima mesotérmico úmido e subúmido com estação seca de inverno. Esse tipo climático é marcadamente sazonal, onde a precipitação anual é de 1.300 a 1.900 mm (Alvares *et al.*, 2013). Isso significa que os períodos mais chuvosos ocorrem durante o verão (Rodrigues, 2012).

O período com os maiores volumes mensais de precipitação pluviométrica na região de Marabá ocorre nos meses de janeiro, fevereiro e março, com totais mensais de chuva, em média, acima de 300 mm (CÂMARA, 2012). Nos últimos 44 anos, a média de precipitação

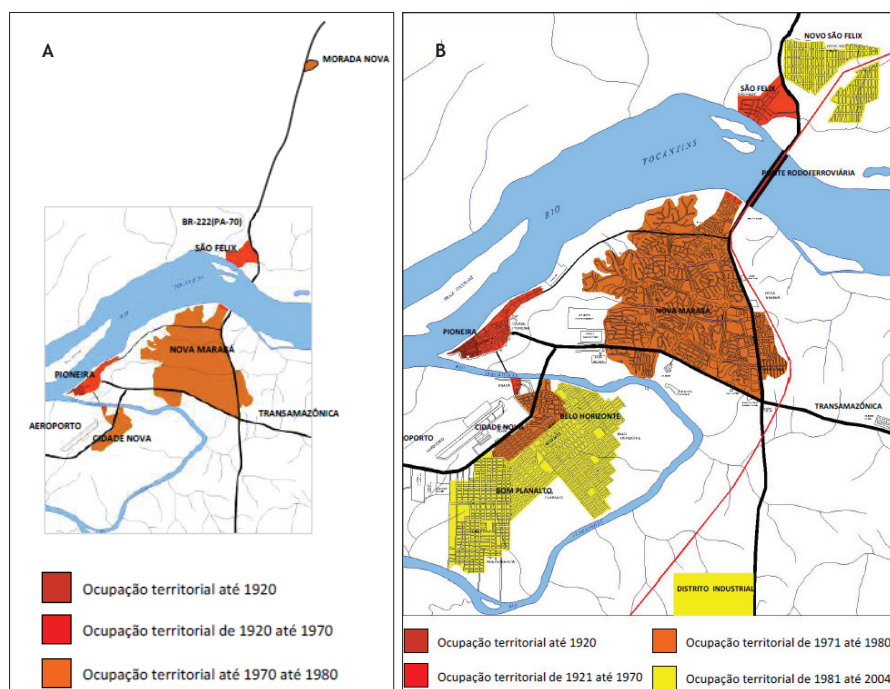


Fig. 4 - Evolução da ocupação territorial de Marabá de 1980 até 2004
(Fonte: Raiol, 2010).

Fig. 4 - Land occupation of Marabá from 1980 to 2004
(Source: Raiol, 2010).

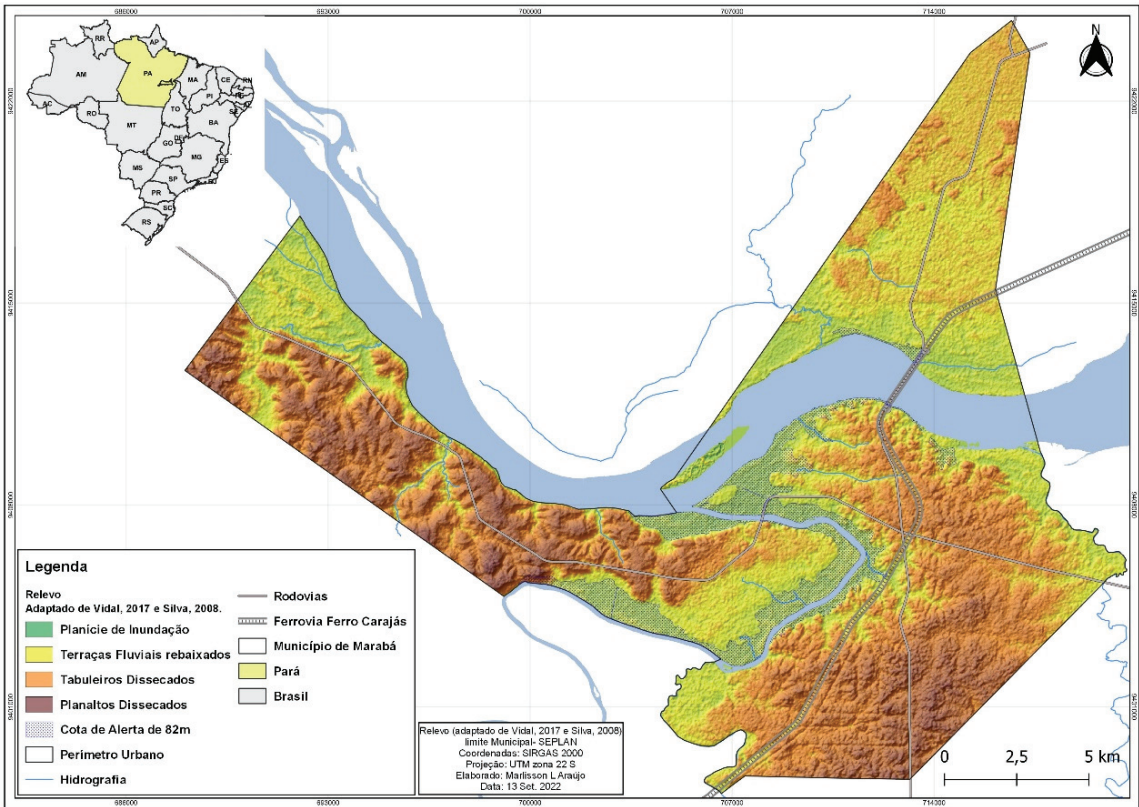


Fig. 5 - Mapa geomorfológico do perímetro urbano de Marabá (Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Vidal (2017) e Silva (2008).

Fig. 5 - Geomorphological map of the urban perimeter of Marabá (Source: Prepared by the author, based on Vidal (2017) and Silva (2008).

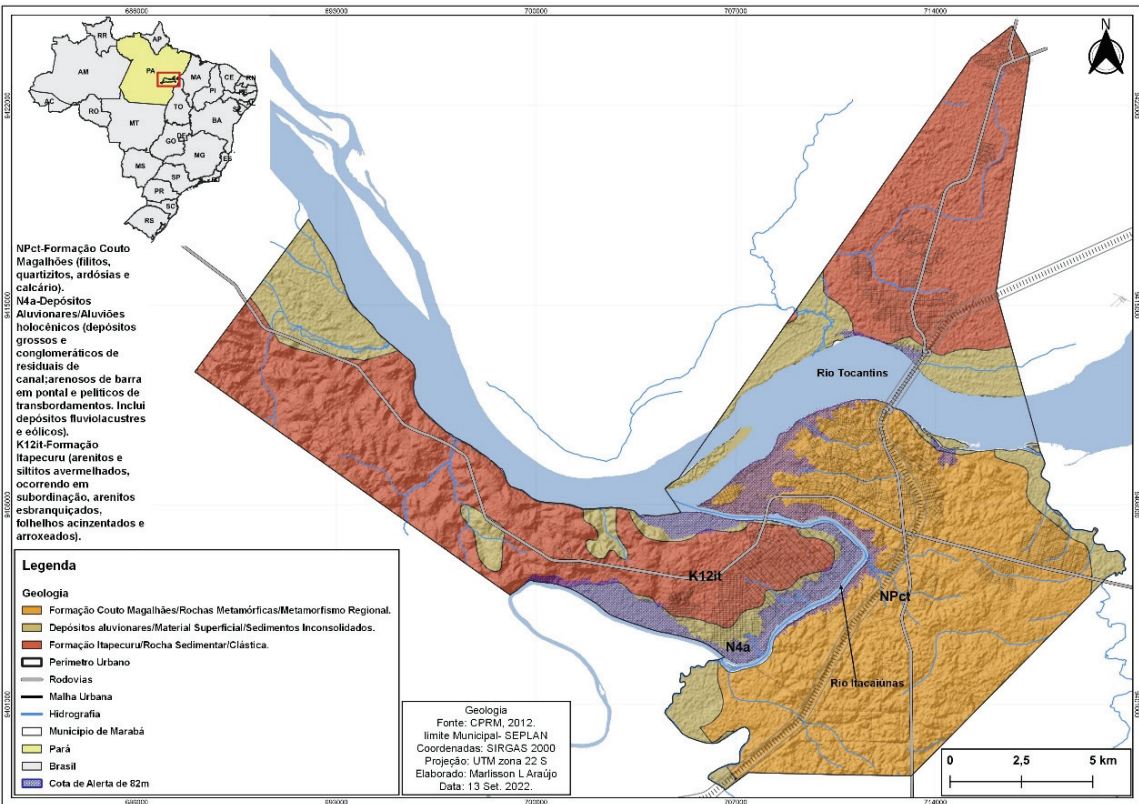


Fig. 6 - Mapa geológico do Perímetro Urbano de Marabá (Fonte: Elaborado pelo autor, com base em CPRM (2012).

Fig. 6 - Geological map of the Urban Perimeter of Marabá (Source: Prepared by the author, based on CPRM (2012).

variou entre 223,75mm a 371,94mm atrelado a esse aumento no volume das precipitações há um acréscimo considerável na vazão e no volume de água nos rios Tocantins e Itacaiúnas, que consequentemente extrapola os limites de seus leitos normais para as áreas marginais (TABELA I e fig. 7).

TABELA I - Precipitação dos últimos 44 anos com destaque para as maiores e menores precipitações em vermelho e azul, respectivamente.

TABLE I - Rainfall over the last 44 years highlighting higher and lower precipitation values in red and blue, respectively.

	1978	1980	1990	2000	2010	2020
jan	332	249	307,1	230,9	259,22	226,7
fev	223,75	311,64	275,38	324,41	304,07	336,2
mar	266,45	371,94	362,63	349,86	334,22	366,2
abr	239,75	248,2	205,02	269,78	223,25	236,5
mai	76,4	74,78	104,16	163,66	101,06	64,7
jun	19,25	35,59	17,47	31,16	23,89	28,5
jul	13,2	7,65	23,45	15,68	16,8	0,8
ago	73,25	17,58	6,99	8,82	12,99	12,3
set	62,6	54,7	64,93	24,98	39,04	52,3
out	53,7	120,01	84,91	71,99	90,84	68,2
nov	91,45	151,71	175,05	115,21	166,26	218,2
dez	175,25	240,5	259,72	187,5	157,05	115,95

Fonte dos dados: Inmet, 2022 / Data source: Inmet, 2022.

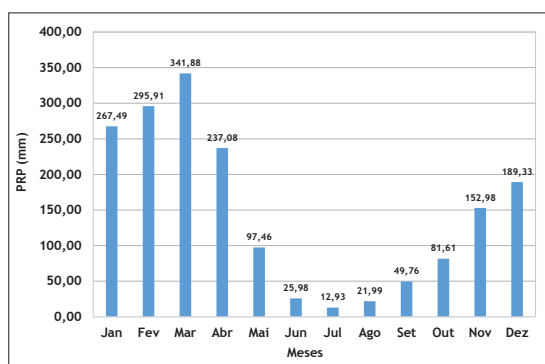


Fig. 7 - Precipitação média mensal de Marabá (1978 - 2021)
(Fonte dos dados: Inmet, 2022).

Fig. 7 - Average Monthly Rainfall in Marabá (1978 - 2021)
(Data source: Inmet, 2022).

Metodologia

A pesquisa documental e bibliográfica foi feita com visitas presenciais em bibliotecas municipais e via acesso digital na rede mundial de computadores. O levantamento digital permitiu realizar levantamentos de dados e documentos nos acervos digitais de instituições públicas e privadas, assim como a consulta em sites de organizações internacionais tais como: EM-DAT, UNISDR, CEPAL, CRED, EIRD, UNISDR, UNDRR; e sites de instituições públicas nacionais tais como: Ministério das Cidades (MINC), CEPED, CEMADEN, EMBRAPA, CPRM, ANA, SEDEC, IPT, UFSC, UFPA, UNIFESSPA, IBGE; sites de revistas e livros sobre o tema da dissertação e jornais de circulação regional como Diário do Pará, Diário de Carajás e Correio do Tocantins. Foram priorizados artigos científicos e trabalhos acadêmicos no tema e área de estudo.

Essas pesquisas foram realizadas com intuito de aprofundar os conhecimentos teóricos e conceituais sobre a temática, assim como levantar dados para a construção dos mapeamentos necessários para obter os resultados do trabalho, além disso, identificar as áreas mais afetadas pelas inundações e compreender as consequências negativas desse fenômeno na população e nas estruturas expostas vulnerável. Realizamos estudos de embasamento teórico em textos de diversos autores, com destaque para as análises que abordam os temas sobre inundações, risco de desastre, vulnerabilidade social, exposição, ameaça, susceptibilidade, bacia hidrográfica e precipitação.

Todos os mapeamentos deste trabalho foram realizados em laboratório com a utilização do software Qgis Hannover versão 3.16.6 - Quantum Geographic Information System. O Qgis é um software livre e gratuito de tratamento de informações geográficas. Para os mapeamentos realizados nesta dissertação foi utilizada como base uma imagem do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Naturais CBERS-4A (Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura-WPM) com 2 metros de resolução espacial. A imagem foi adquirida gratuitamente através do site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/> (TABELA II).

TABELA II - Características do Satélite Cbers 4.

TABLE II - Characteristics of the Cbers 4 Satellite.

Imagem	Sensor	Bandas Espectrais	Resolução espacial	Resolução espectral	Data da Imagem	Cota do rio no dia da imagem
Cbers-4A	WPM	0,45-0,52µm (B) 0,52-0,59µm (G) 0,63-0,69µm (R) 0,77-0,89µm (NIR) 0,45-0,90 µm (PAN)	2m -8m	5-10m	27 de julho de 2021	4,42 m

Fonte dos dados: INPE, 2021 / Data source: INPE, 2021.

Mapeamento da exposição

Para a construção do mapa de exposição foi necessário adquirir as informações das construções expostas à inundação. Inicialmente foi realizado a vetoriza o das unidades constr idas expostas (residências, comércios, bares, restaurantes, hotéis, prédios públicos, escolas, creches), tendo como parâmetro a cota de alerta mínima de 82m. Ou seja, foi mapeado cada moradia exposta localizada abaixo dessa cota de alerta. Esse mapeamento permitiu quantificar as unidades constr idas localizadas nas áreas suscetíveis a ameaça de inunda o dos ríos Tocantins e Itacaiúnas no perímetro urbano de Marabá.

Juntamente com as moradias expostas, têm também foram identificadas e mapeadas as ruas e avenidas localizadas abaixo da cota de alerta, esses dados foram reunidos no mapa de exposi o e em tabelas do Excel divididos por bairros e núcleos. Foram feitas visitas de campo durante o mês de janeiro de 2022 para obten o de imagens com uma câmera de celular das áreas inundadas bem como confirma o de campo das áreas suscetíveis   inunda o previstas na literatura.

Para valida o dos dados foram coletados pontos de GPS nos núcleos Marabá Pioneira, Nova Marabá, Cidade Nova e São Félix. Esses dados foram agrupados em uma tabela do Excel com informa o do número do ponto, rua/avenida, bairro, núcleo e eleva o do terreno.

Utilizou-se como parâmetro a identifica o da área exposta   inunda o sob influência da inunda o dos ríos Tocantins e Itacaiúnas. Consideramos como áreas suscetíveis os que além de expostos apresentam a malha urbana (ruas pavimentadas e não pavimentadas) situadas na área inundável no perímetro urbano de Marabá. Ambos os mapas foram realizados em uma escala de 1:25.000.

Resultados e discussões

Na  rea urbana de Marabá, há um total de 6.583 unidades constr idas expostas ao risco de inunda es. Essas unidades estão distribuídas da seguinte forma: 220 no núcleo urbano de São Félix, 1.527 no núcleo Nova Marabá, 2.684 na Marabá Pioneira e 2.152 no núcleo Cidade Nova, conforme apresentado na (TABELA III, fig. 8).

Na TABELA III, observa-se que algumas linhas estão destacadas em verde, indicando os bairros que apresentam maior quantidade de moradias expostas ao risco de inunda o em Marabá. Essa colora o visa chamar a aten o para áreas onde a vulnerabilidade   inunda o   significativa, ou seja, tem maior potencial (alto risco).

A análise da TABELA III revela que os bairros com o maior número de unidades constr idas e ruas/avenidas expostas são Santa Rosa (1.398), Francisco Coelho (516) na Marabá Pioneira, Folha 33 (698) na Nova Marabá e bairro Da Paz (694) na Cidade Nova. Esses setores foram identificados

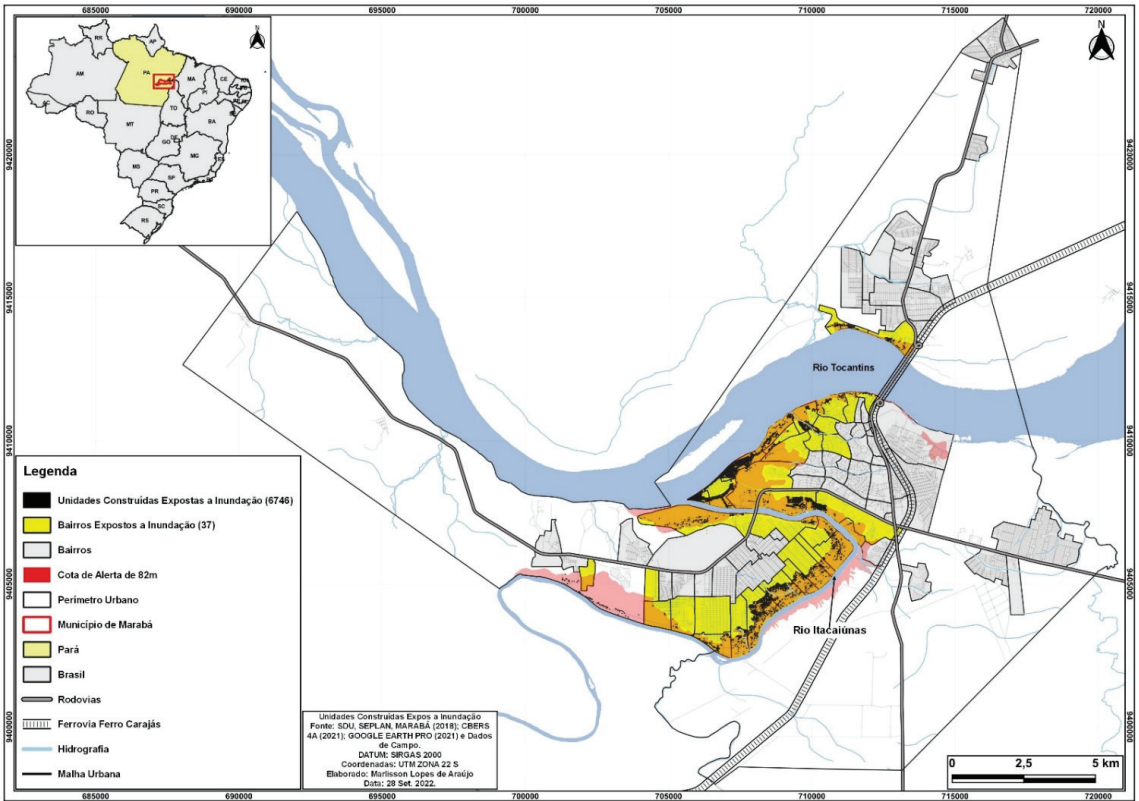


Fig. 8 - Mapa de Unidades Constr idas e Bairros expostos   inunda o no perímetro urbano de Marabá.

Fig. 8 - Map of Built Units and Neighbourhoods Exposed to Flooding in the Urban Perimeter of Marabá.

territorium 31 (I)

TABELA III - Unidades Construídas e Ruas/Avenidas Expostos por Núcleo e Bairro.

TABLE III - Built Units and Exposed Streets/Avenues by Precinct and Neighbourhood.

Núcleo	Bairros	Moradias	Ruas/Avenidas
São Félix	São Félix I	112	Travessa São Miguel, Rua do Geladinho, rua 1º de Maio, Travessa Duque de Caxias e Rua São Félix.
	Geladinho	108	Rua e Estrado do Geladinho
Total: 220			
Nova Marabá	Folha 1	29	Rua da quadra 25
	Folha 6	125	Rua da quadra 48, Rua vila Maurino, Rua da quadra 25.
	Folha 8	14	Rua da quadra 14.
	Folha 13	94	Rua da quadra 1, Rua da quadra 24, Rua da quadra 3.
	Folha 14	174	Rua da Folha 14 (quadra G), Rua da quadra C, Avenida VP 3.
	Folha 25	54	Rua da quadra 6, Rua da quadra 1.
	Vila Militar	6	Rua Jacarandás.
	Varjão	43	Avenida Antônio Maia.
	Folha 33	698	Rua da quadra 34, Rua da quadra 14, Rua da quadra 4, Rua V Cento e Dois, Rua V cento e oito, Rua da quadra 29, quadra 33.
	Folha 36	283	Rua cento e um, Rua cento e dois.
Total: 1527			
Marabá Pioneira	Santa Rita	241	Rua Transmangueira, Travessa Coqueiro.
	Santa Rosa	1398	Avenida Pará, Travessa João Passondas de Carvalho, Rua São Pedro, Avenida Silvino Santis, Rua do Badeco, Travessa Augusto Dias, Rua Moisés Junior, Rua São João, Rua Samuel Monção, Rua Norberto de Melo, Travessa Antônio Pimentel, Rua Cinco de Abril, Avenida Marechal Deodoro, Travessa Nossa Senhora das Graças, Travessa Manoel Moreira, Travessa do Zizi, Travessa dos Coqueiros.
	Centro	103	Rua Benjamim Constant, Rua Magalhães Barata, Rua Bartolomeu Igreja, Avenida Marechal Deodoro, Avenida Getúlio Vargas, Travessa Santa Terezinha, Travessa João Abreu, Travessa Bartolomeu Igreja, Travessa Ambrósio, Travessa Augusto Dias, Rua Barão do Rio Branco.
	Francisco Coelho	526	Travessa Quinze de Novembro, Rua Barão do Rio Branco, Travessa Quinze de Novembro, Rua Cinco de Abril, Avenida Antônio Maia, Rua Quintino Bocaiúva.
	Vila Canaã	416	Avenida Getúlio Vargas, Rua Magalhães Barata, Rua Benjamim Constant, Travessa Santa Terezinha, Travessa João Abreu.
Total: 2684			
Cidade Nova	Amapá	146	Rua do Aeroporto, Rua do Areal, Rua das Cacimbas, Rua Beira Rio, Rua São Raimundo.
	Agrópolis do Incra	55	Travessa do Pescador.
	Filadélfia	58	Rua Piauí, Rua 09, Rua Pernambuco, Rua 04 de Março, Avenida Itacaiúnas, Rua Recife, Rua 08.
	Vale do Itacaiúnas	184	Avenida Fortaleza, Avenida Rio Branco, Avenida Armando Brito, Rua Treze, Rua Doze, Rua Dezesesseis, Rua Piauí, Rua Dezesete,
	São Miguel da Conquista	30	Avenida Brasília, Avenida Amazonas.
	Belo Horizonte	126	Avenida Dois Mil, Rua João Pessoa, Rua Teresina, Rua Maranhão, Avenida Minas Gerais, Avenida Amazonas.
	Carajás II	134	Avenida Manaus, Avenida Minas Gerais, Rua Tuane, Avenida Tocantins, Rua Mato Grosso, Rua Belém.
	Carajás I	377	Rua Afro Sampaio, Rua Monte Alegre, Avenida Manaus, Rua Leblon, Rua Tupi, Rua Paraíba, Rua Alagoas.
	Da Paz	694	Avenida Vital Brasil, Rua Alagoas, Rua Maria da Conceição, Travessa Planalto, Avenida Cruzeiro do Sul, Rua das Palmeiras, Rua Santa Rita, Rua Salvador da Paz, Rua Planalto, Rua Cruzeiro do Sul.
	Novo Planalto	145	Avenida Boa Esperança, Rua Cecília Meireles, Rua Cruzeiro do Sul.
	Independência	105	Avenida Boa Esperança, Rua Alves Maciel, Avenida Antônio Vilhena, Rua Sororó, Rua Marília, Rua Maria Adelina.
	Jardim União	13	Rua Santa Rita.
	Bela Vista	7	Rua Nova Canaã, Rua Marabá.
	Propriedades Particulares/Chácaras	78	Rua Sororó/Beira Rio.
Total: 2152			

como estando total ou parcialmente inseridos na área inundável, considerando a cota de alerta mínima de 82 metros. Ao todo, foram identificados 37 bairros expostos à ameaça de inundação.

O núcleo urbano de São Félix é constituído por treze bairros, sendo que apenas dois (Geladinho e São Félix Pioneiro) é atingido pelas inundações do rio Tocantins. Neste núcleo a área afeada pela inundação totaliza 5,15 km² de seu território em área susceptível à inundação (TABELA IV). Esses bairros localizam-se a margem direita do rio Tocantins e surgiram a partir da década de 1970 em virtude da dinâmica econômica da região e a abertura de rodovias que dinamizaram o fluxo de pessoas para Marabá. Durante os eventos de

inundação mais relevantes os bairros foram afetados diretamente em virtude da sua proximidade com o rio, assim como sua topografia e declividade favorecem a intensidade do impacto desastroso na área. Em Janeiro de 2022, o rio tocantins atingiu a cota de 13,10m acima do seu nível normal e atingiu aproximadamente 220 unidades construídas, além de ruas, avenidas, passagens observado *in loco* durante a pesquisa de campo (fot. 1a/1b e fig. 9).

A TABELA IV apresenta a exposição ao alto risco de inundação no perímetro urbano de Marabá, destacando a área total urbana e a exposição por núcleo. Observe que, a área urbana total dos núcleos abrange 136,12km², dos quais 39,24km², estão expostos ao alto risco de inundação.

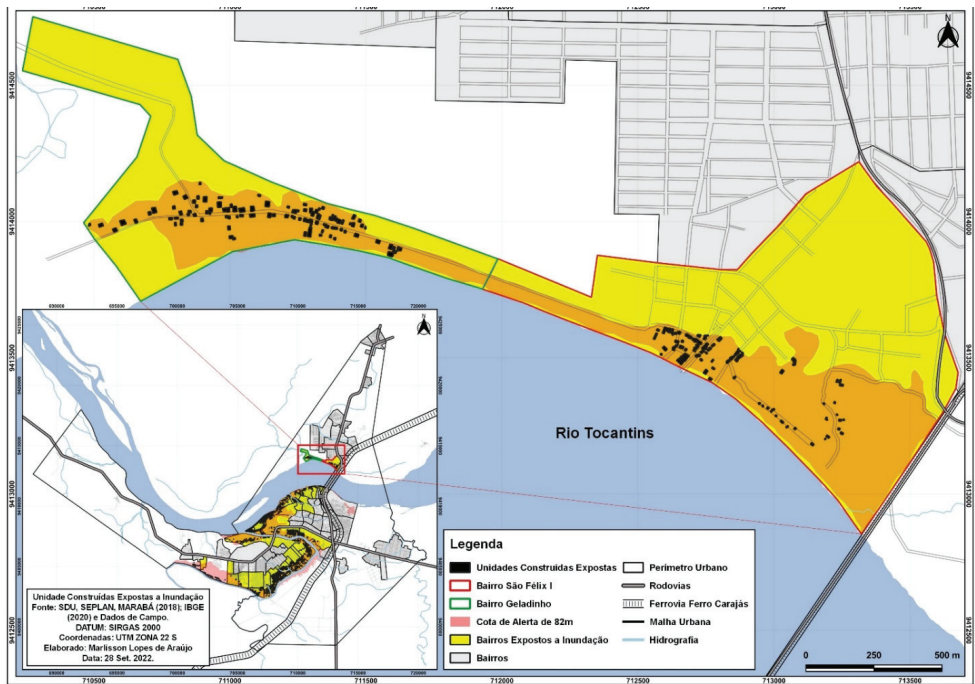


Fig. 9 - Mapa de Unidades Construídas e Bairros expostos a Inundação núcleo São Félix.

Fig. 9 - Map of Built Units and Neighbourhoods Exposed to Flooding São Félix Urban Centre.



Fot. 1 - Moradias expostas à inundação no Núcleo São Félix/2022 (Fonte: Arquivo do Autor, 2022).

Photo 1 - Houses exposed to flooding in São Félix Urban Centre/2022 (Source: Author's Archive, 2022).

Por outro lado, ao analisarmos os diferentes núcleos urbanos, observa-se que a exposição varia entre eles. O núcleo São Félix, com uma área total de 69,46 km², apresenta uma exposição de 5,15 km², representando 7,41% da área. Em contraste, o núcleo Cidade Nova, com uma área total de 41,66 km², registra uma exposição substancial de 29,66 km², alcançando 71,19% de sua área total.

No núcleo Nova Marabá, as áreas de alta ameaça de inundação abrangem uma área total de 3,27 km², como mostrado na (TABELA IV). Esse núcleo urbano é composto por 47 bairros, sendo que 19 deles são diretamente afetados pelas inundações dos rios Tocantins (margem esquerda) e Itacaiúnas (margem direita). Foram mapeadas aproximadamente 1.527 unidades construídas expostas a

TABELA IV - Exposição da área total e por núcleo ao alto risco de inundação no Perímetro Urbano de Marabá.

TABLE IV - Exposure of the total area and by core to high flood risk in the Urban Perimeter of Marabá..

Núcleo	Área Total	Área Exposta à inundação	Percentual da Área Exposta
São Félix	69,46 km ²	5,15 km ²	7,41%
Nova Marabá	22,74 km ²	3,27 km ²	14,37%
Marabá Pioneira	2,26 km ²	1,16 km ²	51,32%
Cidade Nova	41,66 km ²	29,66 km ²	71,19%

Fonte de dados: Prefeitura de Marabá, 2018/dados do autor.
Data source: Marabá City Hall, 2018/author's data.

inundação, além de ruas e avenidas, conforme ilustrado nas fotografias (fot. 2a/2b e fig. 10).

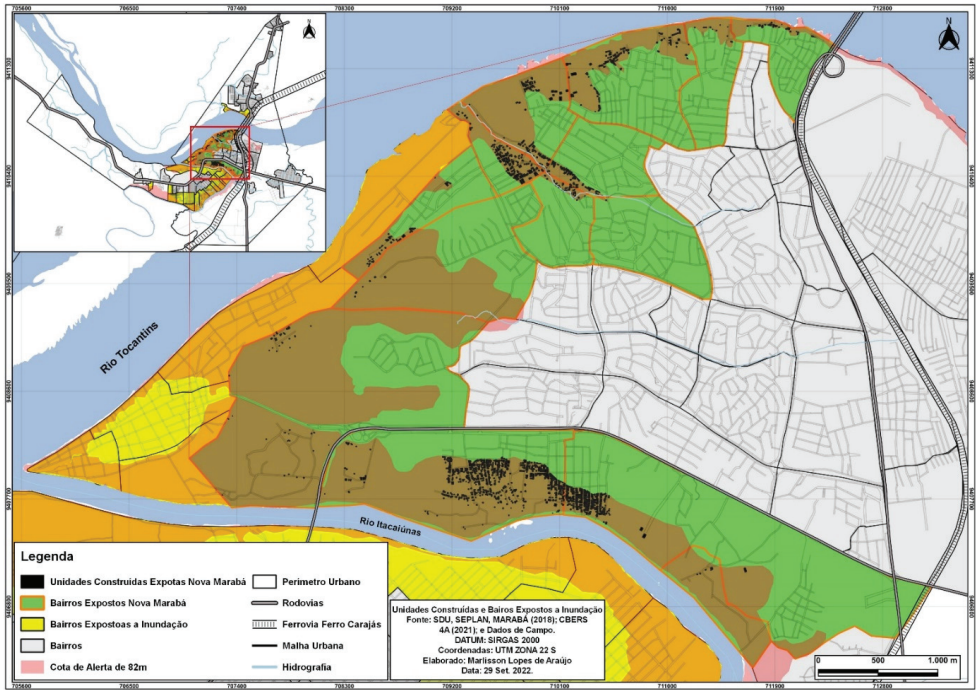
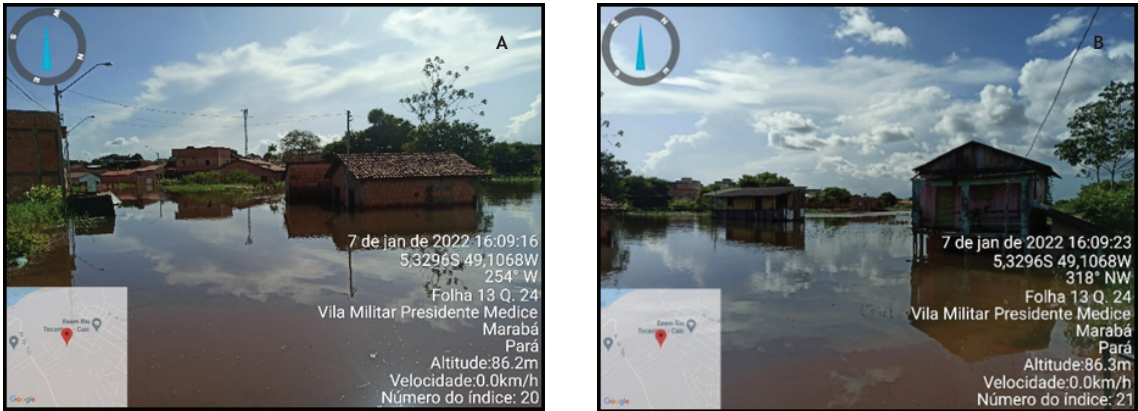


Fig. 10 - Mapa de Unidades Construídas e Bairros expostos a Inundação núcleo Nova Marabá.

Fig. 10 - Map of Built Units and Neighbourhoods Exposed to Flooding in Nova Marabá Urban Centre.



Fot. 2 - Moradias expostas a inundação na Folha 13 no Núcleo Nova Marabá (Fonte: arquivo do autor, 2022).

Photo 2 - Houses exposed to flooding in Folha 13 in Nova Marabá Urban Centre (Source: Author's Archive, 2022).

O núcleo da Marabá Pioneira é o mais antigo da cidade de Marabá, é constituído de cinco bairros, sendo que todos eles possuem elevada exposição às inundações dos rios Tocantins e Itacaiúnas. A área total afetada do núcleo Marabá Pioneira é de 1.16 km² (TABELA IV).

Esse núcleo possui uma baixa topografia que varia de 53 a 70 metros. Observa-se que essas áreas estão localizadas predominantemente na faixa de abrangência da cota de alerta de 82 metros, assim como em áreas de alta e média suscetibilidade a inundação. Foram mapeadas aproximadamente 2684 unidades construídas expostas a inundação, o bairro com maior quantitativo de exposição é o Santa Rosa com 1398 (fig. 11 e fot. 3a/3b).

O núcleo urbano da Cidade Nova é constituído de vinte e oito bairros, sendo que 14 deles está exposto a ameaça de inundação do rio Itacaiúnas. Foram mapeadas aproximadamente 2152 unidades construídas expostas no núcleo urbano, com 694 localizadas no bairro Da Paz; uma área de 29,66 km² expostos à inundação (TABELA IV). Este núcleo urbano localizado na porção centro-sul do perímetro urbano, tem constituído um dos principais vetores de ocupação do processo de expansão urbana da cidade de Marabá (fot. 4a/4b e fig. 12). A área de expansão urbana no núcleo Cidade Nova localiza-se na planície de inundação (leito maior) do rio Itacaiúnas e é periodicamente afetada pelo aumento no nível das águas do rio no

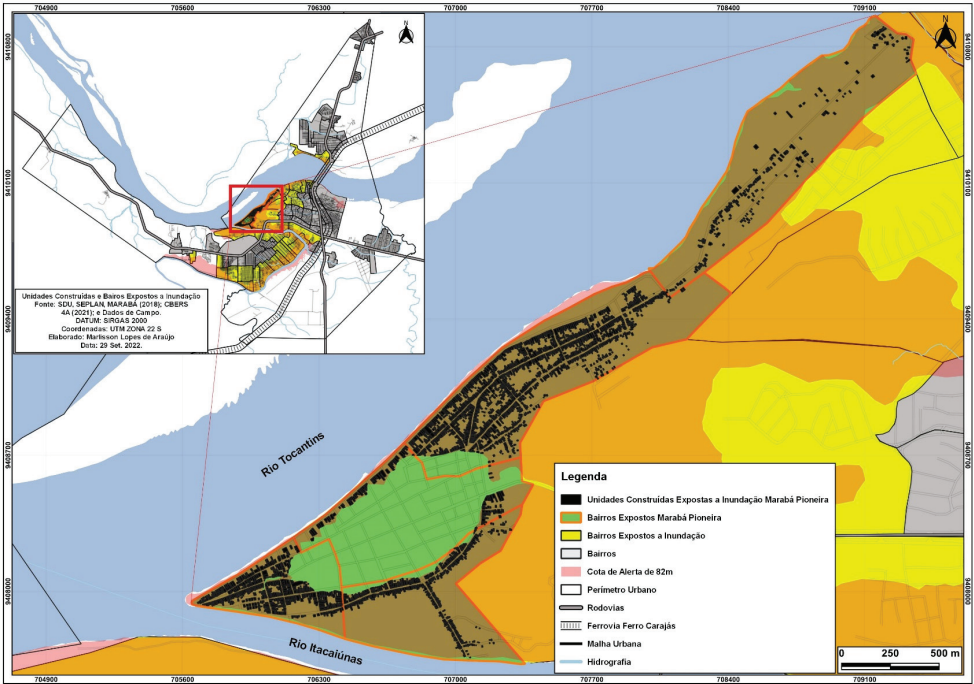


Fig. 11 - Mapa de Unidades Construídas e Bairros expostos a Inundação núcleo Marabá Pioneira.
Fig. 11 - Map of Built Units and Neighbourhoods Exposed to Flooding in Marabá Pioneira Urban Centre.



Fot. 3 - Moradias expostas a inundação no Núcleo Marabá Pioneira (Fonte: Arquivo do autor, 2022).
Photo 3 - Houses exposed to flooding in Marabá Pioneira Urban Centre (Source: Author's Archive, 2022).

período mais chuvoso. Essas áreas estão inseridas nos bairros que possuem maior suscetibilidade a ameaça de inundação do núcleo.

Apesar do tema de riscos e desastres sobre inundação serem estudados na Amazônia de forma extensiva nas cidades (Andrade *et al.*, 2017) ainda há lacunas sobre o detalhamento da exposição de unidades construídas. A compreensão da exposição pode ser entendida como parte do risco de desastres (UNISDR 2011) ou como parte da vulnerabilidade (Turner *et al.*, 2003). De todo modo em escala local pode-se obter essa informação a partir de vetorização ou de dados obtidos por mapeamentos colaborativos e participativos, que podem chegar ao nível de detalhamento dos equipamentos urbanos (ex.

residências, comércio, lojas, bares, restaurantes, escolas, prédios públicos) (Andrade e Szlafsztein 2015; Minucci *et al.*, 2020).

Tal como outras cidades na Amazônia, Marabá possui sua criação ligada a dinâmica fluvial. A formação da cidade as margens do rio e sua periódica inundação faz com que, quando as casas estão submersas, permaneçam fechadas; e é comum as famílias com melhor condição financeira, alugar casas nas áreas mais altas da cidade ou se mudarem para casa de parentes próximos (Vidal e Mascarenhas 2020).

Contudo no caso específico de Marabá a cidade desde os primórdios possui registro das grandes inundações, como em 1926, e mostra que edificar a área na atual Marabá

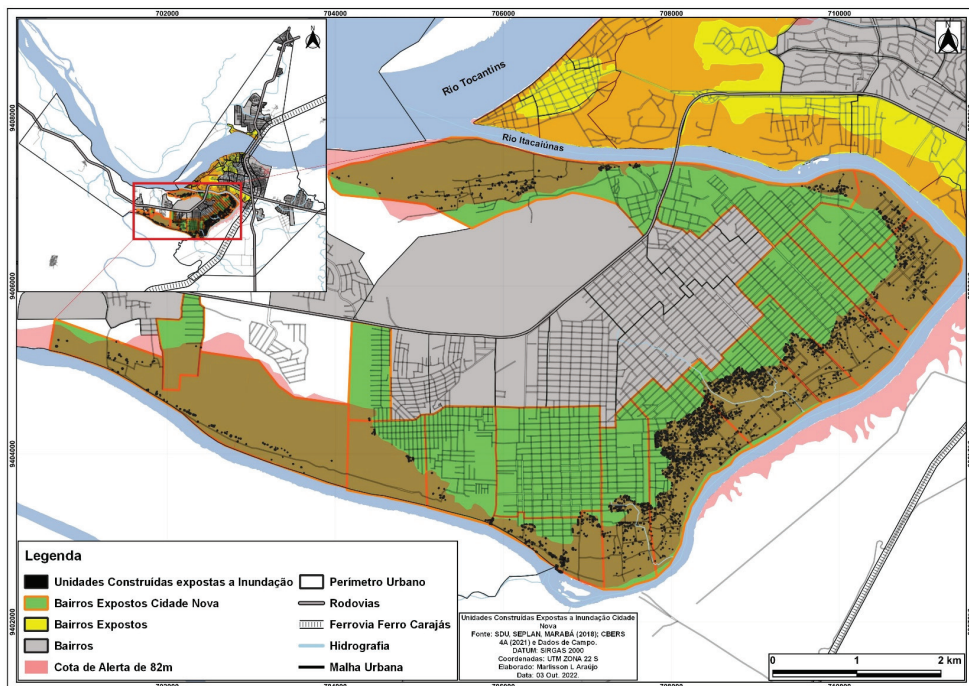


Fig. 12 - Mapa de Unidades Construídas e Bairros expostos a Inundação núcleo Cidade Nova.

Fig. 12 - Map of Built Units and Neighbourhoods Exposed to Flooding in Cidade Nova Urban Centre.



Fot. 4 - Moradias expostas a inundação no Núcleo Cidade Nova (Fonte: Arquivo do autor, 2022).

Photo 4 - Houses exposed to flooding in the Cidade Nova Urban Centre (Source: Author's Archive, 2022).

Pioneira seria expor as construções às inundações periódicas (Almeida 2011a). De acordo com este autor “[...] a memória local e as fontes documentais apontam a enchente de 1926, como uma das piores, além das de 1935, 1947, 1957, 1974, uma sequência de três anos entre 1977 e 1979 e a pior de todas, a de 1980, já na fase da implantação da Nova Marabá. Mais recentemente, as enchentes de 1990 e 1997 afetaram praticamente toda Marabá Velha”. Sendo que a partir da década de 70, os Núcleos Nova Marabá e Cidade Nova começavam a ser implantados. De acordo com Almeida (2011b) a expectativa era de que esses novos núcleos pudessem desmobilizar as pessoas das áreas mais baixas da Marabá Pioneira, o que não ocorreu. Portanto ao longo das décadas houve um aumento das áreas expostas, já que esses os novos núcleos também possuem áreas susceptíveis à inundações às margens do rio Itacaiúnas.

Instrumentos previstos em lei como o Plano Diretor (Lei Federal n.º 10.257/2001) que é o instrumento base para organização das cidades com mais de vinte mil habitantes e a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Lei Federal n.º 10.257/2012) precisam incorporar as ações de mapeamento de risco no planejamento municipal. No estado do Pará a cartografia de risco precisa estar integrada no planejamento das cidades visto os prejuízos orçamentários registrados em decorrência de desastres (Nina e Szlafsztein 2014).

Portanto a produção de uma cartografia de ameaça e de exposição nos permite avaliar de forma mais fiel quais e quantos diferentes elementos de infraestrutura estão em uma área afetada pela inundações. Ao analisar a exposição, devemos identificar as unidades construtivas que de alguma forma sofrem danos diretos, ou seja, que tem contato direto com a água. De todo modo, é possível também identificarmos objetos que possuem danos indiretos, ou seja, aqueles que não possuem um contato direto com a água, mas que é limitado em virtude por exemplo da interrupção de uma rua, que impede o tráfego de veículos.

É urgente na cidade de Marabá que o poder público elabore planos de gestão integrada dos riscos de desastres, pois esses instrumentos permitem compreender melhor o fenômeno e intervir de forma preventiva nas áreas de ocorrências desses eventos. Um instrumento fundamental é a cartografia de risco, que se constitui em uma ferramenta importante para uma visão integrada da área. Pois, a leitura dos mapas facilita a compreensão do fenômeno e agrupa as informações necessárias para fazer uma análise mais detalhada do lugar, informações que são relevantes em caso de situação de desastre. Esse mapeamento é um instrumento essencial para uma melhor gestão do risco de desastre na cidade de Marabá, visto que é uma ferramenta eficiente na leitura do espaço e para a elaboração de políticas públicas direcionadas a prevenção da comunidade.

Conclusão

O estudo realizado neste artigo teve como objetivo identificar e mapear os elementos expostos ao risco de inundações dos rios Tocantins e Itacaiúnas na área urbana de Marabá. Esse estudo é de extrema importância para contribuir com atividades de planejamento socioambiental, gestão territorial e de riscos na cidade de Marabá. A partir da identificação das unidades construídas, é possível implementar políticas de acompanhamento das famílias impactadas pelas inundações e propor alternativas de realocação para áreas mais seguras. Além disso, as autoridades governamentais, juntamente com os órgãos de defesa civil e a sociedade civil, devem buscar ações de mitigação de perdas. A participação da população no planejamento das ações propostas pelo governo é fundamental.

Referências bibliográficas

- Almeida, J. J. (2011). Os Riscos Naturais e a História: O Caso das Enchentes em Marabá (PA). *Tempos históricos*. Volume 15 - 2º Semestre, 205 - 238.
- Almeida, J. J. (2011). Políticas públicas e comunidades da Amazônia: o caso de Marabá (1970-2000). *Revista História & Perspectivas*, [S. l.], v. 24, n. 44.
- Almeida, L. Q. de (2010). *Vulnerabilidades Socioambientais de Rios Urbanos: bacia hidrográfica do rio Maranguapinho, região metropolitana de Fortaleza, Ceará (Tese Doutorado)*. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro/SP.
- Almeida, L. Q. de (2011). Por uma ciência dos riscos e vulnerabilidades na geografia (a science of the risks and vulnerabilities to geography). *Mercator*, v. 10, n. 23, 83 a 99-83 a 99. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/559>. Acesso em 22 Out. 2022.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728. Disponível em: http://www.lerf.eco.br/img/publicacoes/Alvares_etal_2014.pdf. Acesso em: 20 Mar. 2022.
- Andrade, M. M. N. de (2014). *Capacidade adaptativa: uma proposição metodológica de avaliação da vulnerabilidade social às inundações (Tese Doutorado)*. Universidade Federal do Pará, Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido, Belém.
- Andrade, M., Bandeira, I. C. N., Fonseca, D. D. F., Bezerra, P. E. S., Andrade, A. S., Oliveira, R. S. (2017). Flood

- risk mapping in the Amazon. In: Theodore Hromadka; Prasada Rao. (Org.). *Flood Risk Management*. 1ed. Rijeka: Intech, v. 1, 41-54.
- Andrade, M. M. N., Szlafsztein, C. F. (2015). Community participation in flood mapping in the Amazon through interdisciplinary methods. *Natural Hazards* (Dordrecht. Online) ^{JCR}, v. 78, 1491-1500.
- Araújo, J. A. C. o de (2014). *Cultura da terra, cultura das águas: O fenômeno da transumância em Marabá (PA) (Tese Doutorado)*. Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/10479/ARA%C3%9AJOs%C3%A9%20Augusto_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 21 Nov. 2022.
- Bentes, K. L. L. M. (2018). *Inundações em Marabá: avaliação estratégica para declarar situação de emergência (Dissertação de Mestrado)*. Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia, Belém.
- Câmara, R. K. C. (2012). *Previsão estocástica de nível fluviométrico para cidade de Marabá-PA: método de Box-Jenkins (Dissertação Mestrado em Ciências Ambientais)*. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Belém. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11022>. Acesso em: 10 Abr. 2022.
- Castro, A. L. C. de (2003). *Manual de Desastres: Desastres Naturais*. Brasília: Ministério da Integração Nacional, Secretaria de Defesa Civil.
- Costa, J. A. da (2012). *Desenvolvimento de um sistema de alerta de enchente aplicado aos planos de defesa civil em áreas de risco no estado do Pará utilizando Sistema de Informações Geográficas (SIG), caso: cidade de Marabá (Dissertação Mestrado)*. Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém.
- CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa: Marabá, Pará*. [S. l.]: CPRM, 2012. Acesso em 08/12/2021.
- Goertl, R.F., Kobiyama, M. (2005). Considerações sobre as Inundações no Brasil. *XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, João Pessoa. Anais... Porto Alegre, ABRH. Disponível em: https://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005_inundacoes.pdf. Acesso em 12 Mar. 2022.
- Hora, S. B. da, Gomes, R. L. (2009). Mapeamento e avaliação do risco a inundações do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do Município de Itabuna/BA. *Sociedade & Natureza*, v. 21, 57-75. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/wvzfPmYwJXtsRBPWjHsrdJP/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 22 Ago. 2022.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2011). *Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://urbanidades.arq.br/wp-content/uploads/2019/01/documentacao_censo_2010.pdf. Acesso em: 15 Nov. 2021.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 17 nov. 2021.
- Miguez, M.G., Gregório, L. D., Veról, A.P. (2018). *Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos*. 1. ed. atual. Rio de Janeiro: Elsevier, ISBN 9788535287318, 340 p.
- Minucci, G., Molinari, D., Gemini, P. G. S. (2020). Enhancing flood risk maps by a participatory and collaborative design process. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 50, November 2020, 101747.
- Nina, A., Szlafsztein, C. (2014). Efeitos de desastres naturais ao desempenho orçamentário do estado do Pará. *Novos Cadernos Naea^{JRC}*, v. 17, 265-285.
- Raiol, J. de A. (coord.) (2010). *Perspectivas para o meio ambiente urbano: GEO Marabá - Pará, Belém*.
- Rodrigues, J. E. C. (2012). O Clima e o Tempo na Amazônia. Belém, Estudos Amazônicos.
- Röthlisberger, V., Zischg, A. P., Keiler, M. (2017). Identifying spatial clusters of flood exposure to support decision making in risk management. *Science of the total environment*, v. 598, 593-603, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717307374>. Acesso em: 02 Dez. 2022.
- Silva, C. R. da (2008). *Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro*. Rio de Janeiro: CPRM. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/seus@rj.cprm.gov.br>. Acesso em 21/03/2022.
- Szlafsztein, C., Marques, O., Maia, H., Prette, M., Fischenich, P., & Altieri, F. (2010). *Referências Metodológicas para mapeamento de Riscos Naturais na Amazônia: Mapeando as vulnerabilidades*. Brasília: MMA/GTZ, 59.
- Trindade Júnior, Saint-Clair C. (2010). Cidades na floresta: os “grandes objetos” como expressões do meio técnico-científico informacional no espaço amazônico. *Revista IEB*, n.º 50, 2010 set./mar., 13-138. Disponível em: <https://docero.com.br/doc/ne815n0>. Acesso em: 25 Abr. 2022.
- Turner II, B., Matson, P., McCarthy, J., Corell, R., Christensen, L., Eckley, N., Hovelsrud-Broda, G., Kaspersen, J., Kaspersen, R., Luers, A., Martello, M., Mathiesen, S., Naylor, R., Polsky, C., Pulsipher, A., Schiller, A., Selin, H. e Tyler, N. (2003). Illustrating the coupled human-environment system for vulnerability

analysis: three case studies. *U.S. National Academy of Sciences*, v. 100, n. 14, 8080-8085.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (2013). *Centro Universitário de Pesquisa e Estudos sobre Desastres. Capacitação básica em Defesa Civil*. - 4. Edição - Florianópolis: CAD UFSC.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (2013). Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres (CEPED). Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012. 2º ed. ver. ampl. - Florianópolis: UFSC, 126 p.

UNISDR - UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (2011). *Hyogo Framework for Action Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters*. Geneva: United Nation, 107 p.

UNISDR - UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (2015) *The Pocket GAR 2015. Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management*. Geneva, Switzerland: UNISDR.

Vidal, M. R., Mascarenhas, A. L. S. (2017). Paisagens do município de Marabá a partir de uma visão geossitêmica. *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*, v. 1, 4417-4425. Disponível em: <https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/1930>. Acesso em: 23 Nov. 2021.

Vidal, M. R., Mascarenhas, A. L. S. (2020). O melhor das enchentes é isso: outra percepção sobre as cheias do Tocantins. *Confins* [En ligne], 45. DOI: <https://doi.org/10.4000/confins.27854>



RISCOS



ANÁLISE DE MEDIDAS ESTRUTURAIS DE MITIGAÇÃO À EROSÃO COSTEIRA
NO MUNICÍPIO DE BELÉM, PARÁ, BRASIL*

ANALYSIS OF STRUCTURAL MEASURES TO MITIGATE COASTAL EROSION
IN THE MUNICIPALITY OF BELÉM, PARÁ, BRAZIL

Walmira Ferreira Lopes

Instituto Tecnológico Vale - Desenvolvimento Sustentável (ITV-DS) (Brasil)

ORCID [0000-0001-6039-0248](https://orcid.org/0000-0001-6039-0248) walmira.lopes@aluno.itv.org

Milena Marília Nogueira de Andrade

Univ. Federal Rural da Amazônia, Grupo de Pesquisa e Extensão em Desastres e Geotecnologias na Amazônia (Brasil)

Instituto Ciberespacial, Programa de Pós-Graduação em Gestão de Risco e Desastre na Amazônia

ORCID [0000-0001-5799-7321](https://orcid.org/0000-0001-5799-7321) milena.andrade@ufra.edu.br

RESUMO

A presente pesquisa objetiva analisar as medidas estruturais de mitigação à erosão costeira adotadas no município de Belém, Pará, Brasil. Foram realizadas quatro visitas de campo para observação e preenchimento de uma ficha dividida em 3 secções: característica da estrutura, tipo da medida e estado da estrutura. Com o apoio de um GPS teve-se a coleta das coordenadas geográficas dos pontos analisados e com o uso de câmara fotográfica digital, foi realizado o registo da paisagem. Os resultados obtidos mostram que dos 42 pontos analisados, as medidas de mitigação frente a erosão costeira, caracterizadas em obras estruturais, possuem um total de 47 estruturas presentes. Dessas medidas, 19 são muros de proteção costeira de caráter convencional, 15 estruturas denominadas muro de arrimo com contrafortes, 5 do tipo gabiões, 4 do tipo enrocamento, 2 do tipo espigão, além da presença de 2 estruturas improvisadas. A análise de medidas compõe uma etapa de diagnóstico importante na gestão do risco e pode ser utilizadas para nortear ações estruturais futuras a partir da efetividade do funcionamento atual.

Palavras-chave: Zona costeira, carta-imagem, estruturas rígidas.

ABSTRACT

This research aims to analyse the structural measures for mitigating coastal erosion adopted in the municipality of Belém, Pará, Brazil. Four field trips were made for observation and filling out a form divided into 3 sessions: characteristic of the structure, type of measure and state of the structure. With the support of a GPS, the geographic coordinates of the analysed points were collected and the landscape was recorded with the use of a digital camera. The results showed that of the 42 points analysed, the mitigation measures against coastal erosion, characterised in structural works, involve a total of 47 structures. Of these measures, 19 are coastal protection walls of a conventional nature, 15 are structures called retaining walls with buttresses, 5 are gabion type structures, 4 are rockfill type, 2 are spike type, in addition there are 2 improvised structures. Measure analysis is an important diagnostic step in risk management and can be used to guide future structural actions based on the effectiveness of current operations.

Keywords: Coastal zone, image chart, rigid structures.

* O texto deste artigo corresponde a uma comunicação apresentada no IV Simpósio Ibero-Afro-Americano de Riscos, tendo sido submetido em 16-12-2022, sujeito a revisão por pares a 18-02-2023 e aceite para publicação em 13-06-2023.

Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 31 (I), 2024, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

No Brasil as Zonas Costeiras são consideradas, de acordo com a Constituição Federal vigente, patrimônio nacional, constando do Artigo 225, parágrafo 4º (Santos *et al.*, 2003) e “[...] sua utilização se faz, na forma da lei, dentro de condições que assegurem a preservação do meio ambiente, inclusive quanto ao uso dos recursos naturais” (Brasil, 1988). Todavia, apesar das planícies litorâneas serem um dos ecossistemas mais frágeis conhecidos, contraditoriamente, apresentam o maior índice de uso, ocupação, urbanização e densidade demográfica em todo o mundo (Moura, 2012).

O acelerado processo de ocupação urbana na Zona Costeira (ZC) é um dos principais fatores de impacto ambiental na orla marítima (Kalindi *et al.*, 2011) e, pode intensificar o processo, o erosivo na costa. A erosão costeira tem acarretado mudanças na paisagem, trazendo dificuldades para o desenvolvimento das atividades produtivas locais, como o turismo, a recreação e o comércio (Medeiros *et al.*, 2014).

O processo de erosão ocorre a partir de múltiplos fatores geomorfológicos, climáticos, oceanográficos e antrópicos (Silva e Farias Filho, 2019). Dentre estes fatores, o balanço sedimentar negativo, ou seja, quando a praia perde mais sedimentos do que recebe, caracteriza o recuo da linha de costa e consequentemente o processo de erosão costeira (IOUSP, 2022). Contudo, no Brasil, com a ocupação e urbanização das planícies costeiras para o desenvolvimento de atividades como as atividades portuárias, industriais, petrolíferas, pesqueira, imobiliárias e de exploração turística, os riscos costeiros se tornam uma realidade (MMA, 2008; GI-GERCO, 2018, p. 14).

A zona costeira brasileira é bem dividida em termos de feições geomorfológicas e processos oceanográficos. No litoral norte são marcantes as macromarés, a baixa densidade populacional na região atlântica e um maior volume de literatura sobre essa região geográfica (Souza Filho *et al.*, 2003; Szlafsztein *et al.*, 2006; Ranieri & El-Robrini, 2020; Rosa *et al.*, 2021). Contudo, em um contexto diferente, as praias estuarinas têm sido recentemente estudadas na análise de características particulares da sua morfologia e sedimentação (Ramos & Ranieri, 2021). Além disso, a região estuarina se destaca pela maior densidade populacional, dentre as cidades mais ocupadas a capital Belém, do estado do Pará.

A Zona Costeira Paraense (ZCP) é caracterizada pela complexidade da sua dinâmica do meio físico e social e marcada pela existência de riscos naturais à erosão e inundação (Espírito Santo, 2016). O processo de erosão costeira pode ser caracterizado, sob o ponto de vista do planejamento e ordenamento do território visto que grande parte da população reside neste espaço (Koerner *et al.*, 2013). Diante disso, habitações e infraestrutura

podem ser diretamente afetadas e intensificadoras dos processos de erosão resultantes de sua dinâmica natural (Souza *et al.*, 2005). Exemplos da influência na dinâmica da erosão são: a retirada de vegetação das margens, construção próximas a linha de costa, retirada de areia e de componentes da praia, a exemplo de rochas da plataforma de abrasão que podem ser utilizadas como material de construção (Pinheiro *et al.*, 2020).

Como prevenção do risco de erosão o monitoramento da morfodinâmica costeira visa identificar e mapear essas tendências de variação do balanço sedimentar local (Rudorff e Bonetti, 2010). Na ZCP pesquisas de mapeamento da susceptibilidade, de vulnerabilidade, de risco e da percepção de risco a erosão tem sido desenvolvidos e visam dar suporte a gestão costeira na tomada de decisão sobre medidas para minimizar os impactos da erosão (Santos *et al.*, 2020; Ranieri e El-Robrini, 2020; Negrão *et al.*, 2022). Contudo, trabalhos sobre a efetividade das medidas realizadas para mitigar e conter o processo de erosão são incipientes.

As medidas frente aos impactos da erosão costeira são diversas, no entanto, podem ser organizadas sob o ponto de vista da prevenção e da mitigação (GI-GERCO, 2018; Souza, 2009). As medidas de prevenção são necessariamente voltadas para se evitar os impactos da erosão já existente, e as medidas para abrandar o fenômeno pode-se conceituar de mitigação (Ogura, 2006). Atualmente muito tem-se falado em Soluções Baseadas em Natureza (SBN) como parte integrante da gestão costeira na prevenção da erosão. Em especial no papel dos manguezais como redutores dos riscos costeiros (Gijssman *et al.*, 2021). De acordo com estes autores, em zonas costeiras com áreas muito baixas, a presença e extensão desta fitofisionomia ajuda a reduzir os níveis de ondulação, atenuam as ondas, e fornecem uma variedade de co-benefícios para as comunidades costeiras.

Contudo, na Amazônia ainda predominam as medidas rígidas de contenção a preservar o ambiente contra riscos costeiros. As medidas de mitigação podem ser divididas em medidas estruturais e medidas não estruturais, as quais o Ministério das cidades, (2006) define como: “As medidas estruturais são aquelas onde existe a aplicação de soluções da engenharia [...], enquanto as não estruturais são aquelas onde se aplica um rol de medidas relacionadas às políticas urbanas, planejamento urbano, legislação, planos de defesa civil e educação [...]”. Na ZCP os municípios que recebem maior influência marinha possuem suas estruturas de mitigação costeiras identificadas (Szlafsztein *et al.*, 2006). Mas os municípios como maior influência estuarina ainda carecem dessas informações, diante disso, o presente trabalho tem por objetivo identificar e analisar presença de medidas de mitigação à erosão costeira, no município de Belém do Pará.

Metodologia

Área de Estudo

O município de Belém está localizado no estado do Pará, na região Norte do Brasil (fig. 1), possui uma população estimada em 1.506.420 milhões de habitantes em uma área de aproximadamente de 1.059 km², sendo sua densidade demográfica de 1.315 hab/km² (IBGE, 2021). Em termos de divisão territorial o mesmo é dividido em 8 Distritos Administrativos (Belém, Guamá, Sacramenta, Entroncamento, Benguí, Icoaraci, Outeiro e Mosqueiro) e 71 bairros distribuídos em uma porção continental e outra porção insular com 39 ilhas (BELÉM, 2010). Em termos meteorológicos, o clima em Belém é classificado como tropical chuvoso de monção, do tipo Am ou seja, com médias anuais de precipitação em torno de 3000mm/ano, com temperatura média de 25°C e marés normais variando entre 2 e 3,5m de altura (Ananias *et al.*, 2010; Pegado *et al.*, 2012; CHM, 2013). A hidrografia principal na porção sul da cidade está localizada as margens do rio Guamá que desagua na Baía do Guajará; e as maiores ilhas estão defronte a Baía do Marajó (Belém, 2010).

Em termos físicos, a geomorfologia é composta pelas unidades: tabuleiros com baixa declividade e amplitude de relevo de 20 a 50m, e planícies fluviais ou fluvio-

lacustres com declividade de 0-3° e zero amplitude topográfica (IBGE, 2021). O uso do solo é constituído por áreas não vegetadas, que são as áreas urbanizadas; agropecuária, relacionada a pastagem e agricultura; tendo predominância de cobertura florestal e corpos d'água (MapBiomias, 2021).

Materiais e Métodos

A metodologia adotada para essa pesquisa incluiu atividades de laboratório e de campo. As atividades pré-campo ocorreram no Prédio de Engenharia Ambiental, localizado na Universidade Federal Rural da Amazônia, onde foram feitas as pesquisas bibliográficas sobre o tema e a cartografia temática. A elaboração da ficha para se usar em campo foi adaptado com base no trabalhos anteriores realizados no contexto amazônico de Szlafsztein *et al.* (2006) e Andrade e Szlafsztein (2019). O uso de fichas de campo tem como descrição e listagem das estruturas. Esse método foi escolhido como ferramenta, pois padroniza e organiza as informações a serem coletadas, sistematizando a análise da área estudada (Scudelari *et al.*, 2005). Para o presente trabalho, o inventário das medidas estruturais à erosão costeira adotadas no município de Belém consistiu em identificar as características das estruturas, o tipo da obra estrutural e o estado de conservação (TABELA I).

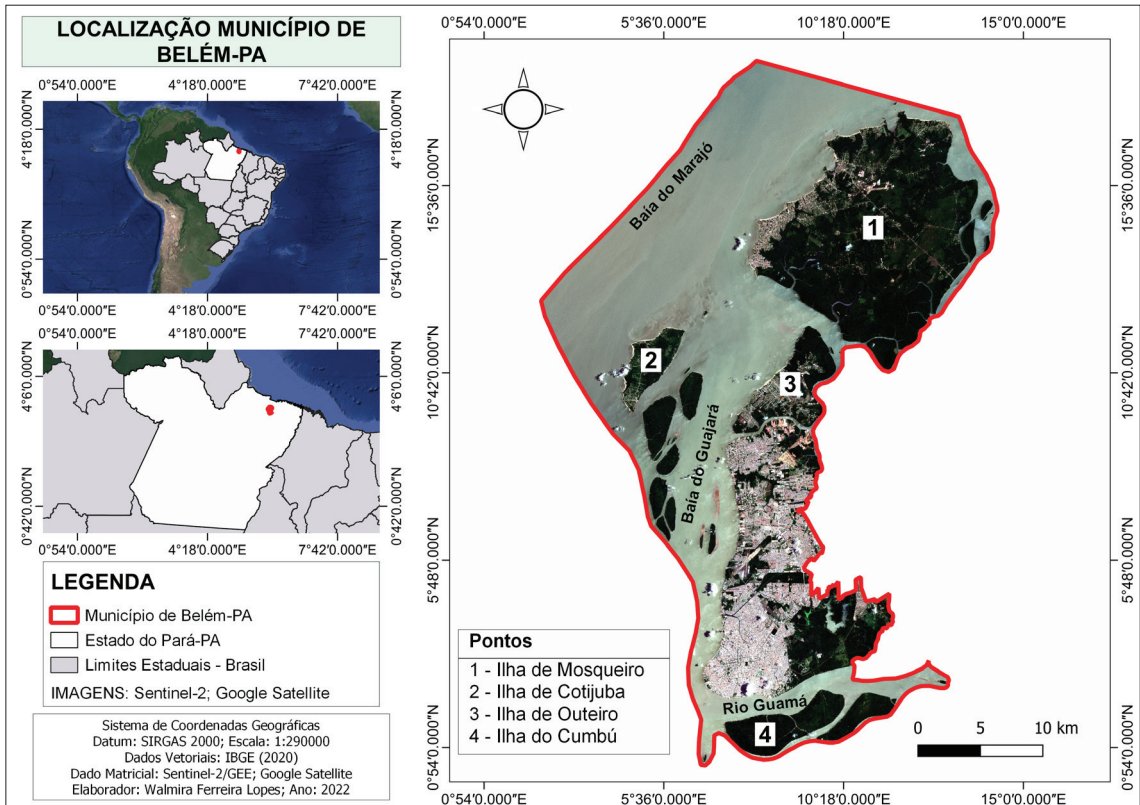


Fig. 1 - Localização da área de estudo.

Fig.1 - Location of the study area.

TABELA I - Ficha utilizada em campo.

TABLE I - Checklist Model.

FICHA DE CAMPO		Descrição e importância
Responsável pelas informações: _____ Local: _____ Ponto _____; Coordenadas: _____		
1. Características das estruturas	Individual/Coletiva	Feito a observação sobre a presença ou ausência da estrutura, é necessário definir se é individual ou coletiva. Quando a solução for construída apenas por um tipo de estrutura, foi considerada como individual e quando foi construída tendo em vista mais de uma solução estrutural, foi considerada coletiva. Desse modo, em se tratando de medidas voltadas a Zona Costeira, seja de caráter individual ou coletivo, “[...] as obras costeiras podem ter função de proteção, recuperação ou de infraestrutura e lazer” (Farinaccio, 2008).
	Pública/Privada	Se a obra for construída com financiamento governamental, é considerada pública. Mas, se o financiamento for por parte dos cidadãos, a obra é considerada privada. As iniciativas visando a adaptação local, no contexto de gerenciamento de zonas costeiras, é definida como um tipo de resposta humana perante as ações dos processos costeiros e marinhos (Szlafsztein <i>et al.</i> , 2006).
2. Tipo de obras estruturais	Espigões, molhes, quebra mares, anteparos submersos, alimentação artificial, muro, enrocamento, gabião, soluções mistas.	Refere-se as obras de engenharia rígidas que são construídas com materiais de concreto, rochas e madeira para mitigar os efeitos da erosão costeira. As medidas estruturais destinam-se a evitar ou a minimizar o efeito erosivo do mar, de maneira a proteger as construções humanas do efeito fortemente erosivo do mar (Guimarães, 2012).
3. Estado de conservação da estrutura	Deteriorado/Em bom estado/ Manutenção/Em construção	O estado de conservação indica a efetividade de medida de contenção, bem como seu cumprimento no agir perante a erosão. Sendo a medida deteriorada: medida contendo limitações de suas funções devido rachaduras, trincas, danos ou envergamento estrutural; em bom estado: vem atingindo seus objetivos e a construção não apresenta danos aparentes; em construção: execução de medida no momento do trabalho de campo. As obras ou as intervenções costeiras, já construídas, demandam manutenções em frequências adequadas para que possam perdurar, evitando intervenções futuras de maior magnitude e mais onerosas, o que poderia ensejar novo processo de licenciamento ambiental e aumento de gastos (GI-GERCO, 2018).

Preparado pelos autores, 2022 / Prepared by the authors, 2022.

Durante a aplicação da ficha de campo foram obtidas as informações acerca da identificação de medidas mitigadoras ao processo de erosão na zona costeira do município de Belém. O registro do posicionamento geográfico foi feito com o auxílio de um GPS (*Sistema de Posicionamento Global*) Garmin, modelo GPSMAP 76CSx, e o registro das estruturas foi feito com o auxílio de uma câmera fotográfica. As informações

espaciais foram inseridas na cartografia final por meio do software QGIS (versão 3.16.7). A imagem utilizada como base dos mapas foi a Sentinel-2 com composição colorida 4R3G2B, data de imageamento em 27-09-2021, resolução espacial de 10 metros e resolução radiométrica de 12 bits, sem cobertura de nuvem, obtida gratuitamente da plataforma *Google Earth Engine* (GEE).

Resultados e Discussão

Para uma melhor descrição e entendimento dos resultados acerca do levantamento de informações de mitigação à erosão costeira na Zona Costeira do município de Belém, cada localidade é apresentada, como observado na carta-imagem (fig. 2). O mapeamento dos locais estudados resultou em um quantitativo de 42 pontos (P1 a P42) distribuídos entre as localidades do município visitadas: Ilha de Mosqueiro, 21 pontos (Praia do Areião, Porto da Vila, Praia Grande, Prainha, Praia do Farol, Praia do Chapéu Virado, Praia

de Porto Artur, Praia do Murumbira, Praia do Ariramba, Praia de São Francisco, Praia de Carananduba, Praia do Marahú, Praia do Paraíso, Praia da Baía do Sol e Praia do Bacuri); Universidade Federal do Pará (UFPA), 4 pontos; Praça Princesa Isabel, 1 ponto (Terminal Hidroviário de Belém); Portal da Amazônia, 1 ponto (Nova orla); Casas das Onzes Janelas, 1 ponto (Centro Histórico); Complexo Turístico Ver-O-Rio, 1 ponto; Orla de Icoaraci, 2 pontos; Ilha de Outeiro, 5 pontos (Praia do Barro Branco e Porto); Ilha de Cotijuba, 4 pontos (Praia do Farol e Praia do Vai Quem Quer); Ilha do Combú, 1 pontos (Escola Milton Monte).

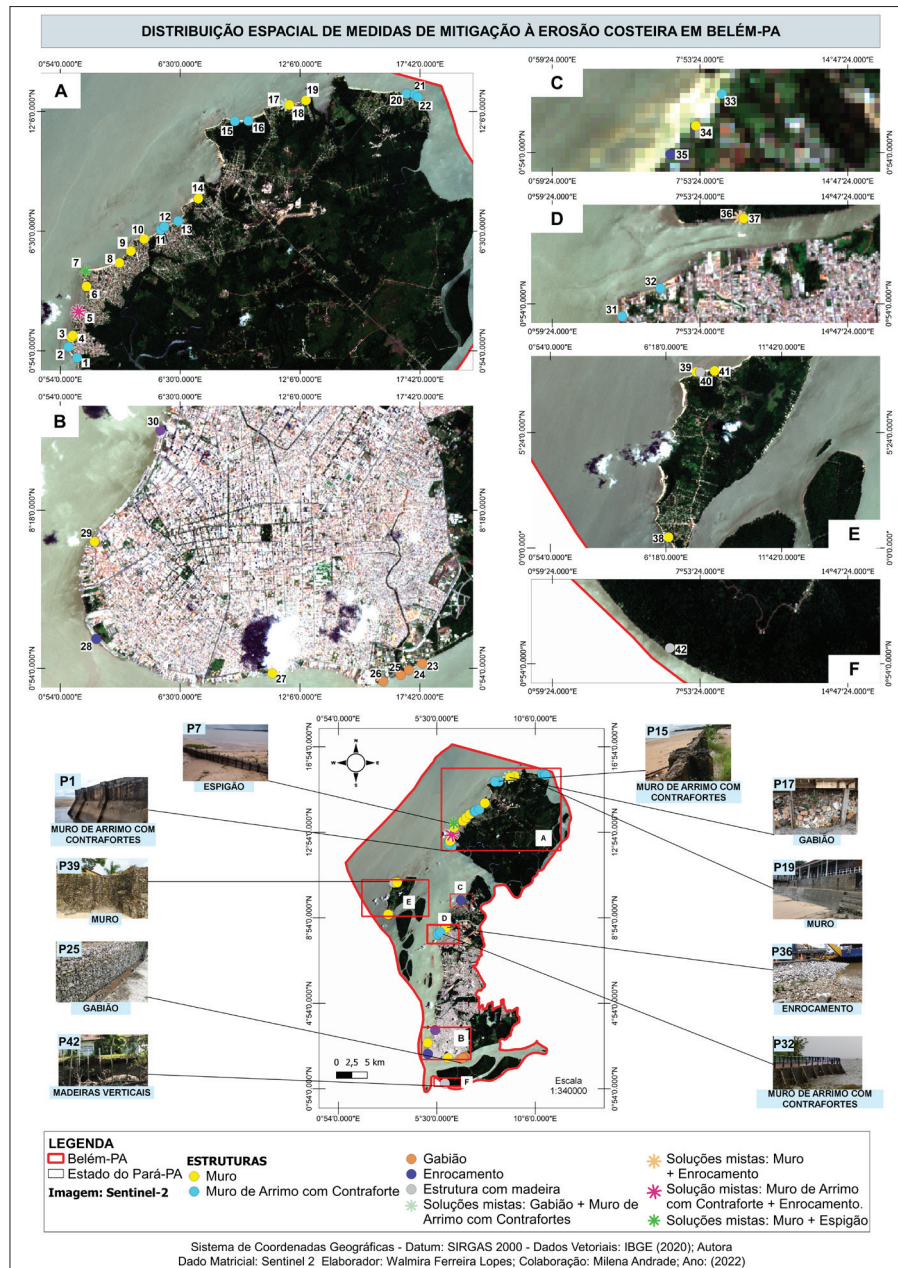


Fig. 2 - Carta-imagem dos pontos de coleta de dados de mitigação à erosão costeira.

Fig. 2 - Image map of coastal erosion mitigation data collection points.

Identificação e descrição de medidas de mitigação

Os pontos que possuem medidas de mitigação nas localidades investigadas são: Ilha de Mosqueiro (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P19, P20, P21, P22), referentes aos trechos das localidades da Praia do Areião, Porto da Vila, Praia Grande, Prainha, Praia do Farol, Praia do Chapéu Virado, Praia de Porto Artur, Praia do Murumbira, Praia do Ariramba, Praia de São Francisco, Praia da Baía do Sol, Praia do Paraíso e Praia do Marahú, respectivamente; UFPA (P23, P24, P25, P26) referentes aos trechos da orla; Terminal Hidroviário (P27); Nova orla (P28); Casa das Onzes Janelas (P29); complexo Ver-O-Rio (P30); Orla de Icoaraci (P31, P32); Ilha de Outeiro (P33, P34, P35, P36, P37), referentes aos trechos das localidades da Praia do Barro Branco e porto de embarcações; Ilha de Cotijuba (P38, P39, P40 e P41), referentes aos trechos das localidades da Praia do Farol e Praia do Vai Quem Quer; Ilha do Combú (P42) cuja localização, situa-se a Escola Milton Monte.

Analisando a carta-imagem (fig. 2), percebe-se que há localidades que apresentam maior quantitativo espacial de medidas estruturais, a exemplo da Ilha de Mosqueiro (enquadramento “A” da carta-imagem). Porém, isso não significa que as mesmas não apresentam indícios de erosão, em diversos pontos, por exemplo, observa-se que há trechos necessitando de medidas de mitigação para prevenir ou conter o processo de erosão costeira, uma vez que o processo vem acometendo residências próximas, sujeitas a perdas, características de área de risco (TABELA II).

Vale ressaltar que, a erosão costeira pode trazer várias consequências não somente à praia, a localidade, mas também a vários ambientes naturais e aos próprios usos e atividades antrópicas na ZC. Destaca-se, como principal impacto a redução na largura da praia e retrogradação ou recuo da linha de costa (Souza *et al.*, 2005; Souza, 2009). Para regiões estuarinas, as praias

arenosas estuarinas paraenses apresentam alterações em suas morfologias, devido principalmente ao domínio das marés, já que essa porção geográfica é formada por reentrâncias, baías e promotórios (El-Robrini *et al.*, 2018; Ramos e Ranieri, 2021).

Na UFPA (fot. 1), na Ilha de Outeiro (fot. 2) e na Ilha de Cotijuba (fot. 3) esse recuo da linha de costa se intensifica, à medida que o tempo passa, haja vista a ausência de medidas a conter o processo e constância de agentes atuantes na ZC. A ação de agentes, tais como as marés, ondas, correntes e ventos são um conjunto de processos ativos que compõem a dinâmica costeira consistindo num conjunto de mudanças no relevo, na cobertura vegetal e nos solos da costa estuarina paraense (França *et al.*, 2020).

Em se tratando das localidades citadas em ambientes de praia, sem medidas mitigadoras e com indício de erosão, as mesmas fazem parte de um conjunto de destino turístico da zona costeira paraense. Nas áreas que não são ocupadas a dinâmica natural atua sem maiores perdas. Contudo nas áreas ocupadas em que os processos erosivos são atuantes os registros de consequências negativas são voltadas para a perdas de infraestrutura e aumento do risco de acidentes (Santos *et al.*, 2020).

A tendências dessas áreas, quando habitadas, haja vista a ausência de medidas rígidas a frear o processo de recuo da linha de costa é tender para o afastamento de construções/habitações para seguimentos pouco mais afastados da área afetada diretamente. Para a Ilha de Mosqueiro a análise da linha de costa demonstrou, por exemplo, que o dinamismo costeiro é resultante da complexa interação de processos deposicionais e erosionais, os quais estão intimamente relacionados às forçantes: ondas, marés, correntes litorâneas, como também as influências antrópicas (Braga, 2019). E embora fosse importante pensar uma outra forma de ocupação urbanística nessa área, a prioridade tem sido destinar orçamento governamental nacional para medidas de adaptação costeira.

TABELA II - Trechos com indícios de erosão visualizados.

TABLE II - Sections with visible signs of erosion.

			
Fot. 1 - POEMA, Universidade Federal do Pará. Photo 1 - POEMA, Federal University of Pará.	Fot. 2 - Praia do Barro Branco, Ilha de Outeiro. Photo 2 - Barro Branco Beach, Outeiro Island.	Fot. 3 - Praia do Vai Quem Quer, Ilha de Cotijuba. Photo 3 - Vai Quem Quer Beach, Cotijuba Island.	Fot. 4 - Restaurante, Ilha do Combú. Photo 4 - Restaurant, Combú Island.

Fonte: Fotografias do arquivo dos autores, tiradas a 07/05/2022.
Source: Photographs from the authors' archive, taken on 07/05/2022.

No que se refere a ocorrência da erosão costeira, não só nas áreas inseridas no município de Belém há indícios de processos erosivos e de acreção resultando no recuo de moradores, e em adoção de alternativa a evitar perdas e deterioramento de residências. Fazendo comparações com outros municípios da área costeira atlântica, em Salinópolis-PA, por exemplo, em algumas praias, periodicamente os donos de estabelecimentos (bares e restaurante) recuam suas barracas em direção ao pós praia (Ranieri, 2014). Conforme estudo, houve retrogradação costeira, mas por serem trechos de costa com residências e hotéis, e com estruturas de contenção de erosão colocadas à frente deles, obteve-se um recuo bem mais gradativo na linha de costa.

Na Ilha de Marajó, as modificações causadas pela erosão resultam na formação de falésias, plataformas de abrasão e bancos de cascalho (Lisbôa, 2011). No município de Salvaterra - PA, por exemplo, ruas situadas nas proximidades da linha de costa são atingidas pela erosão das falésias, havendo a destruição de muros, residências e demais elementos da estrutura urbana. Já em Marudá - PA, conforme estudo, o grau de danos obtém variação entre moderado na região central onde existe o muro de contenção, pois ele exerce a função de proteger a linha de costa, embora pequenos danos possam ser observados no próprio muro (Negrão *et al.*, 2022).

Vale ressaltar que em se tratando da linha de praia, o ideal seria impedir, conter e fiscalizar a ocupação antrópica, uma vez que existe uma dinâmica costeira e processo erosivos atuando de forma natural. Instrumentos como o zoneamento geoambiental através do Zoneamento Ecológico-Econômico precisam ser utilizados na zona costeira da Amazônia para um melhor planejamento territorial de sua ocupação (Abreu *et al.*, 2020). Além disso a recente Política Estadual de Gerenciamento Costeiro (PEGC/PA) instituída pela Lei N° 9.064, de 25/05/2020 prevê o Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro como instrumento básico de ordenamento dessa área territorial. Em seu artigo 8° consideram que como parte da gestão costeira e competência dos entes públicos *“fiscalizar os empreendimentos na Zona Costeira baseado em padrões de qualidade ambiental exigidos pela legislação pertinente”*.

Em dada área, em caso de intervenções físicas, mesmo de forma provisória, para manter o funcionamento das atividades naturais e atividades antrópicas ali exercidas, estudos anteriores e modelos da dinâmica da costa são desejáveis (Farinaccio, 2008; Nascimento e Lima, 2010). Além disso, o nível de proteção do litoral depende da opção escolhida, dos recursos disponíveis, das dimensões do projeto e das condições específicas da área acometida por erosão (Bulhões, 2020, p. 661). Outra forma de evitar danos seria a desocupação dessas áreas, contudo essa solução seria onerosa para as instituições governamentais

responsáveis. Ademais, a percepção de risco à erosão costeira das pessoas que habitam e trabalham nessas áreas são de que as estruturas rígidas favorecem a atividade turística na região (Santos *et al.*, 2020).

Dessa maneira, em se tratando da natureza da medida de mitigação, os responsáveis pela construção podem ser agentes públicos ou privados. No município de Belém tem-se os pontos P1, P2, P3, P6, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P15, P16, P20, P21, P22, P23, P24, P25, P26, P27, P28, P29, P30, P31, P32, P33, P36, P37, referindo-se como obras de responsabilidade pública-governamental, enquanto que os pontos P4, P7, P14, P18, P19, P34, P38, P39, P40, P41 e P42 são de natureza privada, ou seja, obras financiadas pelos proprietários, moradores e empresários (donos de barracas de praias) da área. Enquanto os pontos P5 e P17, são pontos cujas características detêm de responsabilidade do governo e da sociedade, sendo trechos construídos pelo poder público e trechos pelo proprietário da área. Ou seja, a população e o poder público tomando medidas no intuito de reduzir os danos. E P35 sendo sua natureza indefinida, uma vez que não foi possível caracterizar, haja vista não haver informações precisas para inferir sua natureza (pública/privada).

Em se tratando da população, as medidas estabelecidas muitas vezes ocorrem nas áreas com barracas e estabelecimentos comerciais que são fonte de renda familiar, como pode-se destacar o P17, P18, P19 e P34. A ação da população, com construção de estruturas com orçamento privado reflete a ausência de medidas governamentais de proteção na área, transferindo a responsabilidade à população, uma vez que objetivam garantir a seguridade do seu imóvel. Em se tratando de medidas por parte dos moradores, são utilizadas diversas estratégias e materiais, como pneus, estacas, muros de madeira e concreto, e enrocamentos, sendo, na maioria das vezes feitas sem um estudo prévio dos métodos mais adequados e sem o conhecimento técnico devido (Santos *et al.*, 2020). Na Ilha de Mosqueiro, por exemplo, existem setores mais atingidos por erosão, onde comerciantes e moradores investem em obras de contenção, como muros de arrimo, pilares de sustentação, aterros, empilhamento de sacos de areia e cimento, reforço de alicerces e de calçamentos (França *et al.*, 2020).

Ao contrário das medidas privadas, as medidas governamentais apresentam-se como maior dimensão, ocupando maior extensão na faixa costeira. As ações Governamentais, por exemplo, geralmente são concretizadas por meio de obras que já envolvem alta tecnologia, o que não significa que sua eficácia também seja alta, mas porventura conseguem trazer algum resultado pontual (De Paula, 2015). Algumas estruturas por exemplo, tendem a ser mais eficazes em detrimento de outros tipos, dependendo da localidade a ser instalada, podendo ter seus objetivos de proteção alcançados.

Tipos de estruturas

As medidas estruturais estudadas enquadraram-se em obras individuais (estruturas que apresentaram apenas uma medida de resposta), não sendo adotadas pelo responsável outros mecanismos juntos em defesa do litoral. Enquanto que, somente em dois pontos caracterizados como detentores de estruturas coletivas (P7 na Ilha de Mosqueiro e P36 na Ilha de Outeiro).

As características das soluções presentes nos pontos detentores de medidas mitigadoras nos trechos analisados foram do tipo muro (construções convencionais, concreto armado ou muro de arrimo), muro de arrimo com contrafortes, enrocamento, gabião, espigão, inclinação com madeira, madeira vertical e soluções mistas (presença de mais de uma medida estrutural) (TABELA III). Ao todo foram descritas 47 estruturas, as quais estão distribuídas nos 42 pontos com presença de medidas, destaca-se a construção de muros (com contrafortes ou não) como a medida de engenharia mais frequente na área de estudo com 34 estruturas existentes dentre os locais estudados (fig. 3).

A presença significativa de estruturas do tipo “muro”, reflete o principal tipo de padrão construtivo voltado a mitigação no município de Belém, com inclinações variadas e verticalmente, representam a forma de enfretamento local. De maneira genérica, as estruturas do tipo “muro” são estruturas corridas de contenção de parede vertical ou quase vertical, apoiadas em uma fundação rasa ou profunda, podendo ser construídos em alvenaria (tijolos ou pedras) ou em concreto (simples ou armado), ou ainda, de elementos especiais (Pontes *et al.*, 2021). Assim como os muros de caráter construtivo convencionais, tem-se em destaque os muros de arrimos com contrafortes, visto em 15 pontos do município, encontrado em grande parte nos pontos da Ilha de Mosqueiro e em um ponto da Ilha de Outeiro e na orla de Icoaraci. Os muros de arrimos com contrafortes são construções rígidas aplicadas. Conforme estudos, quando trata-se de conter locais com alturas maiores é evidente a utilização de contrafortes para reforçar a estabilidade da medida. Um exemplo disso, são os pontos P12 e 13 (Praia do Ariramba - Ilha de Mosqueiro), em que esse trecho apresenta alturas elevadas em comparações aos demais pontos da ilha.

TABELA III - Quantitativos das estruturas presentes na área de estudo.

TABLE III - Features of the studied hydrographic basins.

Tipo de estrutura	Quantitativo	Distribuição
Muro	17 Pontos	P3, P4, P6, P8, P9, P10, P14, P18, P19, P27, P29, P30, P34, P37, P38, P39, P41.
Muro de arrimo com contrafortes	13 Pontos	P1, P2, P11, P12, P13, P15, P16, P20, P21, P22, P31, P32, P33.
Enrocamento	02 Pontos	P28 e P35
Gabião	04 Pontos	P23, P24, P25 e P26
Espigão	01 Ponto	P7
Soluções mistas	04 Pontos	P5 (muro de arrimo com contrafortes e enrocamento), P7 (muro e 2 espigões), P17 (gabião e muro de arrimo com contrafortes), P36 (Muro e enrocamento)
Outros	02 Pontos	P40 (inclinação com madeira) e P42 (madeiras verticais)

Fonte/Source: Preparado pelos autores, 2022 / Prepared by the authors, 2022.

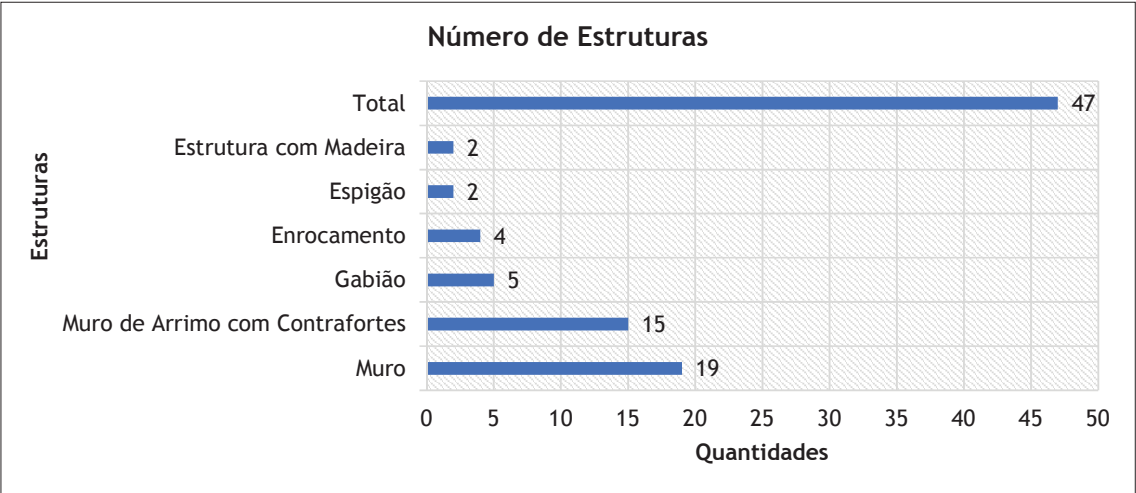


Fig. 3 - Tipos de estrutura de contenção (preparado pelos autores em 2022).

Fig. 3 - Types of retaining structures (prepared by the authors in 2022).

Todavia, apesar da importância de mitigação à erosão, tendo em vista os efeitos da dinâmica costeira, os muros em geral, tem seus possíveis impactos em muitos casos. Conforme estudo, esse tipo de estrutura pode acarretar em alteração da dinâmica natural de transporte de sedimentos pela limitação do espreadimento, sendo propenso a acúmulo de sedimento e alteração do perfil praiar, colapsos de estruturas e alteração no regime de deposição eólica (Farinaccio, 2008). Além disso, em muros de caráter verticais, seus efeitos no balanço sedimentar podem ser: negativo como resultado da turbulência da onda e interação e reflexão da onda na base da estrutura, escavamento da base das estruturas e rebaixamento do perfil praiar (GI-GERCO, 2018, p.33).

As estruturas do tipo enrocamento (P5, P28, P35 e P36), na área de estudo, apresentam-se sem padrão tecnológico e planejamento técnico, como frequentes em litorais de outros estados. Sendo somente no P34 (nova orla) inserida por meio de planejamento, por conta do planejamento urbanístico da orla de Belém, a qual foi inaugurada no ano de 2012. Entretanto, após 10 anos de construção foi possível notar durante o campo o desgaste da estrutura em alguns pontos. O principal objetivo desse tipo de estrutura é proteger temporariamente as construções a beira mar (Guimarães, 2012). Este tipo de proteção, conforme o autor, pode ter a desvantagem de fazer com que a praia desapareça com o avanço do mar, podendo o enrocamento ser posteriormente danificado e levando em alguns casos a ter que ser construído um paredão ainda de maior dimensão na área. O efeito que os enrocamentos causam na inclinação da praia nem sempre é uma desvantagem, sendo esta técnica por vezes utilizada para aumentar a profundidade nas margens, facultando a construção de ancoradouros onde barcos possam atracar (Guimarães, 2012).

As estruturas do tipo Gabião, apresenta-se em quatro pontos: P17, P24, P25 e P26 (P23 que se encontra em construção), contendo diferença de altura, sendo 4 destas localizadas no campus da Cidade Universitária José da Silveira Netto, UFPA. Adjacente a estrutura estão os instrumentos urbanísticos de calçadas e ciclovias, espaço usual de atividades físicas e caminhadas, aberto a sociedade civil. Os gabiões, por não haver concreto nem qualquer outro material em sua estrutura, além de pedras e a própria armação da gaiola, se caracterizam por ser bastantes permeáveis, não necessitando sistema de drenagem, ao contrário do muro de arrimo (Sila *et al.*, 2018).

O espigão encontra-se somente em um ponto (P7 - praia do farol, Ilha de Mosqueiro) das áreas visitadas. Estruturas, do tipo espigão, podem ser construídas utilizando blocos rochosos, cimento/concreto, madeira, metal ou tecidos sintéticos resistentes e preenchidos com areias ou outros materiais como os geotêxteis

(Bulhões, 2020, p. 662). No caso do P7 (dois espigões encontrados), por ser uma medida realizada pelo próprio proprietário da área, dependências do Hotel Farol (Ilha de Mosqueiro), tem-se utilizado alternativas diferentes das encontradas em obras públicas em litorais, tendo em sua estrutura madeira, preenchida por pedras de tamanhos variados, a fim de resguardar o imóvel de forças atuantes na área. Os espigões são estruturas que agem diretamente no transporte de sedimentos longitudinal podendo ser empregado isoladamente ou em conjunto (campo de espigões) (GI-GERCO, 2018, p. 60). Contudo, os espigões podem ser responsáveis pela alteração da dinâmica natural longitudinal à costa, pelo aprisionamento de sedimento junto a estrutura rígida de orientação, e pelo surgimento de fenômenos erosivos e escalonamento da linha de costa.

Quando se trata de ambiente costeiros, não somente soluções construtivas técnicas são vistas, mas também soluções baseadas em disponibilidade de materiais e conhecimento empírico por moradores, as quais ganham destaque na região insular do município de Belém. Essas soluções podem ser de vários tipos, sendo visto *in loco* medidas frente as residências (muros de proteção) e, também, com o uso de madeiras (inclinação com madeira (P40- Ilha de Cotijuba) e madeiras verticais (P42 - Ilha do Combú). Essas duas últimas soluções são exemplos de alternativas aplicadas, muitas vezes por moradores, sendo necessários mais estudos para concluir sobre a efetividade dessa estrutura.

No entanto, algumas obras improvisadas e desprovidas de orientação técnica, contribuem para fragilizar a estrutura urbana diante das forças erosivas (França *et al.*, 2020). Todavia, a falta de conhecimento a respeito da erosão, de sua evolução, de mecanismo de defesa contribui para que os moradores continuem a construir técnicas por conta própria como estas citadas, sendo também reforçada pela ausência de respostas eficazes pelas autoridades competentes. Além disso, a falta de conhecimento sobre a realidade vivida e a vulnerabilidade da população que habita áreas de risco à erosão pode ser um dos fatores que dificulte ações o gerenciamento costeiro (Negrão *et al.*, 2022).

Estado das estruturas

No município de Belém, das estruturas contidas nos pontos estudados com presença de medida de mitigação, foi possível reconhecer quais as que obtiveram bom estado, deteriorada, em manutenção ou em construção. Do total das estruturas analisadas (fig. 3), obteve-se 31 estruturas em bom estado, 15 estruturas deterioradas, 0 ponto em manutenção e 1 em construção. Sendo inclusas as estruturas dos pontos P5, P7, P17 e P36 com soluções mistas. P5 e P17 apresentam uma de suas estruturas em bom estado e outra deteriorada, sendo P5 com muro de

arrimo com contraforte em bom estado e estrutura de enrocamento deteriorada; enquanto P17 com muro de arrimo com contraforte em bom estado e a estrutura gabião apresentando aberturas na armação de arame; já em P7 ambas em bom estado (muro e 2 espigões) e P36 ambas deterioradas (muro e enrocamento).

Das 15 estruturas deterioradas, 08 dessas estruturas são privadas, ou seja, soluções aplicadas pelos próprios moradores. Estas estruturas em comparação com as obras governamentais foram identificadas como obras de padrão construtivo inferior, com construções pontuais, uma vez que ocupam apenas a área do imóvel sem continuidade lateral. As estruturas construtivas públicas-governamentais apresentam-se deterioradas em P2 (muro de arrimo com contraforte), P15 (muro de arrimo com contraforte), P28 (enrocamento), P33 (muro de arrimo com contraforte) e P36 (muro e enrocamento); já P35 (enrocamento/blocos de pedras) encontra-se deteriorada, porém sem responsabilidade definida.

A deterioração dessas estruturas pode estar relacionada a fatores, como o tempo de exposição, ao tipo de materiais utilizados e aos desgastes por conta de fatores naturais, relacionados a dinâmica costeira. À vista disso, manutenção de tais estruturas precisam ser viabilizadas, visando a garantia de seus propósitos quanto ação de proteção do ambiente costeiro. Os muros, gabiões os paredões de enrocamento necessitam de manutenção de acordo com suas particularidades técnicas. Tendo em vista os enrocamentos, os mesmos necessitam ser renovados e/ou reforçados com uma periodicidade que pode ser maior ou menor consoante a sua exposição à energia do mar (Guimarães, 2012). Adicionalmente, estudos a respeito de quais estruturas se apresentam com melhor eficácia no município de Belém são extremamente importante, assim como o entendimento a respeito da vulnerabilidade de áreas do município que se encontram em processo de erosão ou sujeita a mesma. Entende-se que o estudo da erosão costeira é importante não apenas por ser um fenômeno de ordem física, mas, sobretudo porque os processos erosivos têm frequentemente efeitos de cunho social e econômico (Neves *et al.*, 2019).

Tendo em vista essas estruturas presentes no município de Belém, diversas outras medidas também são adotadas para conter o processo de erosão costeira. Tais quais destacam-se os quebra-mares, alimentação artificial de praias (Bulhões, 2020, p. 677). Como tendências atuais tem-se a aplicação de eco-engenharia e projetos híbridos, as denominadas soluções baseadas na natureza por meio da contribuição dos ecossistemas costeiros e estuarinos para a defesa do litoral.

A execução de soluções para proteção costeira baseadas na natureza e de baixo custo poderá permitir o controle e a minimização do movimento de sedimentos, assim

como uma melhor proteção contra a erosão costeira, aumentando a resiliência das praias e dunas, aspectos de grande importância num contexto de adaptação às alterações climáticas (Vinagre, 2019). Tais soluções buscam entender os aspectos da natureza como um meio de promover soluções para a mitigação das mudanças climáticas e cooperar nos desafios da adaptação humana (IUCN, 2012; Bulhões, 2020, p. 678).

As soluções baseadas na natureza são distintas das soluções mais tradicionais por tentarem minimizar os seus efeitos negativos utilizando elementos naturais existentes (Vinagre, 2019). São cada vez mais visualizadas por sua importância, uma vez que está atrelada a diminuição de impactos provenientes da erosão costeira por meio da manutenção dos ecossistemas existentes. Porém, para que sua implementação seja bem-sucedida, é necessária uma profunda compreensão do funcionamento dos processos e fluxos de matéria e energia dos ecossistemas (Néto *et al.*, 2020). Tampouco, na área de estudo as soluções de mitigação costeira ainda tem priorizado estrutura rígidas de engenharia no lugar de soluções baseadas na natureza.

Conclusão

Essa pesquisa buscou identificar as medidas de mitigação a erosão costeira existentes no município de Belém do Pará. Com isso, foi possível observar que dos 42 pontos de coletas de dados realizados em localidades do município, com uso de *checklist* de campo, 47 tipologias de medidas mitigadoras foram encontradas, tendo em vista as denominadas de obras estruturais. As medidas mitigadoras encontradas estão distribuídas em pontos da Ilha de Mosqueiro, Ilha de Cotijuba, Ilha de Outeiro, Ilha do Combú, distrito de Icoaraci, Universidade Federal do Pará, porto de embarcações (Praça P. Isabel), Complexo Ver-O-Rio, Nova orla de Belém e Casas das Onze Janelas.

As tipologias de estruturas encontradas no município foram do tipo muro (construção convencionais, uso de concreto armado, cimento, arrimo), 19 estruturas; muro de arrimo com contrafortes, tendo um quantitativo de 15 estruturas; gabião com 5 estruturas; enrocamento com 4 estruturas, espigão e estruturas com madeira, ambas com 2 estruturas presente. Todas as estruturas observadas fazem parte de um rol de alternativas de resposta, sendo de responsabilidade governamental e privada, todavia obtendo diferenças técnicas construtivas, o que favorece que umas tenham maior eficácia em detrimento de outras.

Em suma, estrutura de proteção costeira é fundamental para adaptar as localidades frente a eventos extremos e futuros cenários de aumento do nível do mar. Embora no município de Belém, a maioria das alternativas presentes sejam estruturas rígidas clássicas de proteção, observa-se uma resposta no que tange a proteção da costa à erosão.

Já que os muros de arrimo com contrafortes e espigões, em geral não estavam apresentando deterioramento e ruptura das mesmas. Todavia, desgastes pontuais e deterioramento foram identificados associados a falta de manutenção da estrutura.

Dessa forma, essa pesquisa busca contribuir para conhecimento acerca de medidas de mitigação a erosão costeira e apoio a ações voltadas ao gerenciamento costeiro do município.

Referências bibliográficas

- Abreu, W. I. De, Rocha, G de M., Flores, M. S. A., Ribeiro, E. R. F., Tamasauskas, C. E. P. & Gass, S. L. (2020). Zoneamento Geoambiental a partir das Unidades de Conservação: subsídios para a Gestão Integrada da Zona Costeira Paraense -Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Vol.13, n.º 6, 3042-3059. Disponível: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>
- Ananias, D. S., Souza, E. B., Souza, P. F. S., Souza, A. M. L., Vitorino, M. I., Teixeira, G. M. & Ferreira, D. B. S. (2010). Climatologia da estrutura vertical da atmosfera em novembro para Belém-PA. *Revista brasileira de meteorologia*, Vol. 25, n. 2, jun. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200006>
- Andrade, M. M. N. & Szlafsztein, C. F. (2019). Coping and adaptation strategies and institutional perceptions of hydrological risk in an urban Amazonian city. *Disasters*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/disa.12414>
- BELÉM. COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO E ADMINISTRAÇÃO DA ÁREA METROPOLITANA DE BELÉM (CODEM) [s.a]. Disponível: <https://codem.belem.pa.gov.br/mapas/distritos-administrativos/>. Acesso em 02 de fevereiro de 2022.
- BELÉM. SECRETARIA DE COORDENAÇÃO GERAL DE PLANEJAMENTO E GESTÃO (2010). <http://www.belem.pa.gov.br/planodiretor/paginas/brasao.php>
- Braga, C. A. O. (2019). *Análise das variações da linha de costa na Ilha de Mosqueiro-PA ao longo de 17 anos. Orientador: Francisco de Souza Oliveira (Dissertação de Mestrado em Gestão de Risco e Desastre na Amazônia)*. Universidade Federal do Pará, Belém, 89 p. Disponível: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/12113>
- BRASIL. Constituição Federal 22 de Setembro de 1988. Artigo 225. *Congresso Nacional do Brasil*. Brasília.
- Bulhões, E. (2020). Erosão costeira e soluções para a defesa do litoral. In: Muehe, D., Lins-de-Barros, F. M., Pinheiro, L. (orgs.) *Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos*. Rio de Janeiro: PGGM, 655-688. Disponível: https://www.researchgate.net/publication/345765641_Cap_29_Erosao_Costeira_e_Solucoes_para_a_Defesa_do_Litoral
- CHM - CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (2013). *Tábuas de marés: Porto de Belém*. Disponível: <http://www.mar.mil.br>
- De Paula, D. P. (2015). Erosão costeira e estruturas de proteção no litoral da região metropolitana de fortaleza (Ceará, Brasil): Um contributo para artificialização do litoral. *REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA*, Fortaleza, Brasil, Vol. 9, n. 1, 73-86, jan./jun. Disponível em: <http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/306>
- El-Robrini M., Ranieri, L. A., Silva, P. V. M., Alves, M. A. M. S., Gerreiro, J. S., Oliveira, R. R. S., Silva, M. S. F., Amora, P. B. C., El-Robrini M. H. S. & Fenzl, N. (2018). Pará. In: Muehe, D. (Ed.). *Panorama da Erosão Costeira no Brasil*. Brasília, 65-166. Disponível em: https://www.bivica.org/files/5975_11.%20TerraMar_Panorama%20da%20Eros%C3%A3o%20Costeira%20do%20Brasil_PDF.pdf
- Espírito Santo, C. M. & Szlafsztein, C. F. (2016). Gestão de risco de desastres em planos diretores de três municípios da zona costeira do estado do Pará, Brasil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, Vol.16, n. 2, 223-229. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388346765009>
- Farinaccio, A. (2008). *Impactos na dinâmica costeira decorrentes de intervenções em praias arenosas e canais estuarinos de áreas densamente ocupadas no litoral de São Paulo, uma aplicação do conhecimento a áreas não ocupadas (Tese (Doutorado em Ciências, Programa de Oceanografia Química e Geológica)*. Univ. de São Paulo.
- França, C. F., Silva, R. R. P., Ferreira Junio, J. L. A. & Araújo, F. A. (2020). Erosão da orla costeira Grande-Bispo, ilha de Mosqueiro, Belém-PA, através da análise de indicadores. *Geografia Ensino e Pesquisa*, Santa Maria, Vol.24, ed.20. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236499433940>
- GI-GERCO. *Guia de Diretrizes de Prevenção a Proteção à Erosão Costeira*. (2018). Grupo de Integração do Gerenciamento Costeiro. Brasília-DF, 114 p. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/Final_Guia-de-Diretrizes_09112018-compressed.pdf
- Gijsman, R., Horstman, E. M., van der Wal, D., Friess, D. A., Swales, A. & Wijnberg, K. M. (2021). Nature-based Engineering: a review on reducing coastal flood risk with mangroves. *Frontiers in Marine Science*, Vol.8, 1-26. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.702412/full>

- Guimarães, B. F. C. (2012). *Erosão costeira e produção de blocos para obras de proteção com enrocamento*. (Dissertação de mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente, Orientador: Alexandre Júlio Machado Leite. Coorientador: Prof. José Cardoso Guedes). Universidade do Porto, Portugal, 111 p.
- IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2021). *Banco de Dados de Informações Ambientais - BDIA*. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>
- IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2021). *IBGE Cidades*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/belem/panorama>
- IOUSP-INSTITUTO OCEANOGRÁFICO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (2022). *Erosão Costeira*. Disponível em: <https://www.io.usp.br/index.php/infraestrutura/museu-oceanografico/50-portugues/publicacoes/series-divulgacao/gestao-costeira/823-erosao-costeira.html>
- Kalindi, D., Pilo, G. S. & Farrenberg, C. C. A. (2011). *Erosão costeira por ação antrópica e suas implicações para o desenvolvimento sustentável: uma revisão bibliográfica*. *Oceanografia e Políticas Públicas*, Santos, SP, Brasil. Disponível em: <https://docplayer.com.br/19543332-Erosao-costeira-por-acao-antropica-e-suas-implicacoes-para-o-desenvolvimento-sustentavel-uma-revisao-bibliografica.html>
- Koerner, K. F., Oliveira, U. R. & Gonçalves, G. (2013). Efeito de estruturas de contenção à erosão costeira sobre a linha de costa: Balneário Hermenegildo, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada*. Novembro. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3883/388340143005.pdf>
- Lisbôa, T. F. P. (2011). Vulnerabilidade Ambiental da Orla Costeira do Município de Salvaterra, Ilha de Marajó-PA, no Trecho Compreendido entre a Foz do Rio Paracauari e a Ponta do Tapariuaçu. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 074-089. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v4i1.232663>
- MapBiomias. (2021). *Coleção 7*. Disponível: *Plataforma - MapBiomias Brasil*
- Medeiros, E. C. S., Pantalena, A. F., Miola, B., Lima, R. S. & Soares, M. O. (2014). Percepção ambiental da erosão costeira em uma praia no litoral do Nordeste do Brasil (Praia da Taíba, CE). *Revista de Gestão Costeira Integrada / Journal of Integrated Coastal Zone Management*, Vol.14, n.3, 471-482. Disponível em: http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-488_Medeiros.pdf
- MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2008). *Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil*. Brasília: MMA. 242 p. Disponível em em: https://gaigerco.furg.br/images/Arquivos-PDF/MDZC__Biodiversidade.pdf
- Moura, M. R. (2012). *Dinâmica costeira e vulnerabilidade à erosão do litoral dos municípios de Caucaia e Aquiraz, Ceará*. Orientador: Fátima Maria Soares Kelting. Co-Orientador: Jäder Onofre de Moraes (Tese Doutorado em Geografia). Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 210 p.
- Nascimento, F. C. & Lima, J. J. F. (2010). Diretrizes técnicas para locação de limites edificados em praias. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, Vol. 10, n. 4, 197-218, out./dez. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000400014>
- Negrão, Y. S., Sousa, H. C. & Ranieri, L. A. (2022). Vulnerabilidade à erosão costeira em praias amazônicas e a ocupação populacional em áreas de riscos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Vol.23, n. 2, abr-jun. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i2.1951>
- Néto, N. C. G., Souza, L. N., Castro, C. A. F., Costa, D. A. & Ferreira, M. I. P. (2020). Soluções Baseadas na Natureza aplicadas à conservação e à gestão integrada das águas - um estudo prospectivo à luz da Agenda 2030 da ONU. *Revista Principia*, n. 51.
- Neves, S. C. R., França, C. F. & Silva, R. R. P. (2019). Morfologia e dinâmica da orla costeira do Maraú, Ilha de Mosqueiro, Belém, Pará. *Geosul*, Florianópolis, Vol. 34, n. 73, 107-125, set./dez. DOI: <https://doi.org/10.5007/1982-5153.2019v34n73p107>
- Ogura, A. (2006). *Apostila do Curso de Capacitação em Mapeamento e Gerenciamento de Risco na modalidade à distância*. Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT, Centro de Pesquisas Sobre Desastres Naturais-CEPED.
- PARÁ. Lei Estadual nº9604/2020 que instituiu a Política Estadual de Gerenciamento Costeiro - PEGC/PA. Belém: Semas, 2020.
- Pegado, R., Blanco C., Roehrig J., Caroça, C., Costa F. & Tostes W. (2012), The importance of physical indicators in areas of urban flood: the case of the metropolitan region of Belém. *Int J Civ Environ Eng*. c.12, n.2, 42-48. Disponível: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/22590>
- Pinheiro, C. D. P. S., Rosa, A. G. & Sousa, A. M. L. (2020). Análise dos impactos socioambientais na zona costeira do município de Salinópolis/PA. *DRd - Desenvolvimento Regional em debate*, Vol. 10, 222-244. DOI: <https://doi.org/10.24302/drd.v10i0.2553>
- Pontes, R. R., Alves, B. C. S., Barcellos, P. C. L., Silva, J. C. & Brasil, F. C. (2021). Análise de Estabilidade de Talude em Bairro Residencial de Duque de Caxias - RJ. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, Vol.7, n.7, jul., p. 74330-74345. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n7-557>

- Ramos, C. C. & Ranieri, L. A. (2021). Morfologia e sedimentação de uma praia estuarina amazônica (Marahú/PA) durante amplitudes de marés distintas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Vol.14, n.5. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.5.p2916-2930>
- Ranieri, L. A. & El-Robrini, M. (2020). Morfologia e sedimentação em praias oceânicas da Amazônia oriental durante a variação anual de chuvas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Vol.13, n.5. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.5.p2086-2102>
- Ranieri, L.A. (2014). *Morfodinâmica costeira e o uso da orla oceânica de Salinópolis (Nordeste do Pará, Brasil)* (PhD Thesis). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 195 p.
- Rosa, A. G., Andrade, M. M. N et al. (2021). Avaliação da dinâmica de ocupação da terra em Salinópolis/PA com base no modelo Pressão-Estado-Impacto-Resposta (PEIR). *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, Vol.12, n.7, jul. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.007.0037>
- Rudorff, F.M. & Bonetti, J. (2010). Avaliação da suscetibilidade à erosão costeira de praias da Ilha de Santa Catarina. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, Vol. 14, 9-20. DOI: <https://doi.org/10.14210/bjast.v14n1.p9-20>
- Santos, I. R., Silva, C. V. & Andrade, M. M. N. (2020). Avaliação da vulnerabilidade social e percepção de risco à erosão costeira na Ilha do Mosqueiro - PA, *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales*, agosto. Disponível em: <https://www.eumed.net/rev/cccss/2020/08/ilha-mosqueiro.html>
- Scudelari, A. C., Braga, K. G. & Costa, F. A. A. (2005). O uso de checklist como ferramenta de identificação dos processos erosivos na praia da pipa - RN. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Sila, I. G., Moraes, F. S. & Struminski, E. (2018). Comparação de técnicas de contenção de ondas. *Caderno de Graduação - Ciências exatas e tecnológicas*, Alagoas, Vol. 4, n.3, 25-34, maio. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/5563>
- Silva, J. S. & Farias Filho, M. S. (2019). Expansão urbana e impactos ambientais na zona costeira norte do município de São Luís (MA). *R. Ra'e Ga*. Curitiba, Vol.46, n.1, 7-24, mar. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v46i1.52552>
- Souza Filho, P. W. S., Tozzi, H. A. M. & El-Robrini, M. (2003). Geomorphology, land-use and environmental hazards in Ajuruteua macrotidal sandy beach, Northern Brazil. *Jornal Of Coastal Research*, SI 35 (Proceedings of the Brazilian Symposium on Sandy Beaches: Morphodynamics, Ecology, Uses, Hazards and Management), Itajaí, SC-Brazil, 580-589. DOI: <https://www.jstor.org/stable/40928810>
- Souza, C. R. G., Suguio, K., Oliveira, A. M. S, Oliveira, P. E. (2005). (ed.) *Quaternário do Brasil* / editores, Celia Regina de Gouveia Souza, Kenitiro Suguio, Antonio Manoel dos Santos Oliveira, Paulo Eduardo De Oliveira. Ribeirão Preto: Editora Holos. 382 p. Disponível em: <http://biblioteca.ifes.edu.br:8080/pergamumweb/vinculos/000015/00001530.pdf>
- Souza, C. R. G. (2009). A Erosão Costeira e os Desafios da Gestão Costeira no Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management*, Vol.9, n.1, 17-37. Disponível em: https://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-147_Souza.pdf
- Szlafsztein, C., Sterr, H. & Lara R. (2006). Estratégias e medidas de proteção contra desastres naturais na zona costeira da região Amazônica, Brasil. *Terra Livre*. Goiânia, Vol. 1, n. 26, 109-125. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/index.php/terralivre/article/download/210/194>
- Vinagre, P. M. T. (2019). *Avaliação de soluções para proteção costeira baseadas na natureza para adaptação às alterações climáticas* (Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil). Universidade do Porto, Porto, Portugal, 161 p.

(Página deixada propositadamente em branco)



RISCOS

territorium 31 (I), 2024, 73-86

journal homepage: <https://territorium.riscos.pt/numeros-publicados/>

DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_31-1_6

Artigo científico / Scientific article



APLICAÇÃO DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS DE SENTINEL-2 NA MONITORIZAÇÃO DO JACINTO-DE-ÁGUA:
ESTUDO DE CASO NO BAIXO MONDEGO (PORTUGAL)*

APPLICATION OF SENTINEL-2 MULTISPECTRAL IMAGES FOR MONITORING WATER HYACINTH:
A CASE STUDY IN THE LOWER MONDEGO (PORTUGAL)

Romeu Gerardo

Universidade de Coimbra, CERIS (Portugal)
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil
ORCID 0000-0002-9619-4940 romeu.jorge@itecons.uc.pt

Isabel Pedroso de Lima

Universidade de Coimbra, MARE-Centro de Ciências do Mar e do Ambiente/ARNET (Portugal)
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil
ORCID 0000-0002-5134-4175 iplima@uc.pt

RESUMO

As espécies exóticas com grande potencial invasor constituem uma séria ameaça à redução da biodiversidade, resultando em custos ambientais e económicos elevados. No caso de plantas invasoras aquáticas, a extensão desta problemática a massas de água superficiais vulneráveis apresenta-se como especialmente gravosa. Dificuldades inerentes à monitorização dessas plantas com métodos convencionais têm levado à utilização de ferramentas de deteção remota para este fim. Neste estudo explora-se o papel dos dados obtidos pelo satélite Sentinel-2, nomeadamente na deteção, mapeamento e monitorização do jacinto-de-água (*Eichhornia crassipes*) em meio fluvial, dando-se como exemplo a aplicação desta tecnologia no estudo desta invasora aquática em cursos de água na região do Baixo Mondego (Portugal). Para o efeito usam-se índices de vegetação calculados a partir de imagens multiespectrais. Esta abordagem pode dar uma contribuição importante na definição de medidas oportunas de gestão com vista ao controlo da infestação de massas de água por jacinto-de-água, que são fundamentais ao pleno desempenho das múltiplas funções dessas massas de água, e prevenção do risco ambiental associado.

Palavras-chave: Recursos hídricos, infestantes aquáticas, deteção remota, satélite, índices de vegetação.

ABSTRACT

Highly invasive exotic species have become a severe threat in many regions of the world due to the consequent reduction of biodiversity, resulting in high environmental and economic costs. Regarding aquatic weeds, especially in vulnerable surface water bodies, this problem is particularly serious. Inherent difficulties in monitoring aquatic invasive plants with conventional methods have led to the use of remote sensing tools for this purpose. This study explores the role of Sentinel-2 satellite data in detecting, mapping, and monitoring the water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in rivers, giving as an example the use of this technology to study this aquatic weed in watercourses in the Lower Mondego region (Portugal). Multispectral-based vegetation indices are used for this purpose. This approach can contribute significantly to the timely definition of management measures aimed at controlling the water hyacinth's infestation of water bodies, such measure being crucial to ensuring the multiple functions of these water bodies and preventing associated environmental risks.

Keywords: Water resources, invasive aquatic plants, remote sensing, satellite, vegetation indices.

* O texto deste artigo corresponde a uma comunicação apresentada no IV Simpósio Ibero-Afro-Americano de Riscos, tendo sido submetido em 02-02-2023, sujeito a revisão por pares a 18-02-2023 e aceite para publicação em 04-07-2023.

Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 31 (I), 2024, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

O jacinto-de-água (fot. 1), botanicamente conhecido como *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laubach, é uma planta macrófita aquática que se tornou uma enorme ameaça para muitos ambientes aquáticos em todo o mundo. Esta planta aquática de água doce, nativa da bacia amazónica, na América do Sul, espalhou-se para outras partes do mundo desde o século XIX (Penfound e Earle, 1948; GISD, 2006; Hill e Coetzee, 2008; Dersseh *et al.*, 2019), permanecendo como uma das plantas invasoras aquáticas mais problemáticas, local e globalmente (Holm *et al.*, 1977; Navarro e Phiri, 2000; Julien, 2001; Julien *et al.*, 2014). Atualmente, o jacinto-de-água encontra-se em todos os continentes, exceto na Antártica, e invadiu um elevado número de países tropicais e subtropicais, bem como algumas áreas da bacia do Mediterrâneo (Gopal, 1987; Parsons e Cuthbertson, 2001; Kriticos e Brunel, 2016). A União Internacional para a Conservação da Natureza classifica o jacinto-de-água como uma das cem espécies invasoras mais prejudiciais para os ecossistemas (Téllez *et al.*, 2008).

Esta planta cresce de forma mais significativa quando a temperatura do ar permanece aproximadamente entre os 20°C e os 30°C, mas o crescimento é interrompido ou fortemente prejudicado por baixas temperaturas, abaixo de cerca de 15°C (Owens e Madsen, 1995). O jacinto-de-água pode tolerar pH da água de até 6 a 8 e existir em sistemas de água doce eutróficos, parados ou lentos (Malik, 2007), com elevada carga de nutrientes. Em algumas geografias a espécie pode crescer e reproduzir-se durante todo o ano (Tiwari *et al.*, 2007), embora a floração ocorra principalmente durante a primavera e o verão. O jacinto-de-água é um membro da família das monocotiledóneas *Pontederiaceae* (Patel, 2012) e reproduz-se assexuadamente por estolhos e sexuadamente por sementes (Penfound e Earle, 1948; Havel *et al.*, 2015). É uma das plantas fotossintéticas mais produtivas do mundo. Apresenta uma rápida

capacidade de multiplicação que lhe permite duplicar a sua biomassa entre 6 e 14 dias, em condições de crescimento (climáticas e hídricas) favoráveis (Keller e Lodge, 2009). Destaca-se o seu poder fitoremediador da água contaminada por metais pesados e elementos tóxicos provenientes por exemplo de efluentes industriais e domésticos (Tiwari *et al.*, 2007).

A sua natureza emergente a flutuante (fot. 1) torna o jacinto-de-água um competidor muito eficaz quando invade ecossistemas de água doce (Pyšek e Richardson, 2010). Esta planta invasora tem a capacidade de superar outras espécies de plantas aquáticas e forma tapetes densos e flutuantes (fot. 1), que em muitos casos cobrem completamente as superfícies de água doce, como lagos, rios, pântanos e reservatórios criados por açudes e barragens (Malik, 2007; Shekede, 2008). A presença e distribuição desta macrófita domina e reduz a vegetação submersa existente. Esta invasora apresenta a maior parte de sua massa vegetativa submersa, competindo com o fitoplâncton por nutrientes e luz solar (Mitchell, 1985; Roijackers *et al.*, 2004). A fácil propagação do jacinto-de-água e a correspondente ameaça aos ecossistemas de água doce, nomeadamente, pelo incremento de eutrofização, exigem uma atenção urgente sobre estas plantas invasoras.

O crescimento descontrolado e excessivo do jacinto-de-água causa vários impactos ambientais (incluindo ecológicos e socioeconómicos) que são uma ameaça constante para os sistemas aquáticos e podem inviabilizar o uso humano das águas superficiais (Chander *et al.*, 2018); por exemplo: i) causa hipóxia, ii) ameaça a qualidade e disponibilidade de água doce (Hill e Coetzee, 2008; Ndimele *et al.*, 2011; Dube *et al.*, 2014; Getsinger *et al.*, 2014; Mirona *et al.*, 2014; Hill e Coetzee, 2017), iii) degrada a qualidade dos ecossistemas de água doce (Halstead *et al.*, 2003), incluindo a qualidade da vida aquática (Murkin e Kadlec, 1986; Meerhoff *et al.*, 2006; Mirona *et al.*, 2014), afetando espécies de



Fot. 1 - Infestação por jacinto-de-água em meio fluvial: à esquerda, pormenor da planta; ao centro e à direita, diferentes graus de infestação por esta espécie do rio Velho do Mondego (vista, no sentido Ereira-Montemor-o-Velho, Portugal), evidenciando o tapete denso tipicamente formado por esta invasora aquática (Fotografias de Romeu Gerardo, tiradas a 25/10/2021).

Photo 1 - Water hyacinth infestation in a fluvial environment: left, detail of the plant; middle and right, view of different levels of water hyacinth infestation of the Old Mondego River (seen in the direction Ereira to Montemor-o-Velho, Portugal), showing the typical formation of a dense water hyacinth carpet (Photographs by Romeu Gerardo, taken on 25/10/2021).

macroinvertebrados (Stiers *et al.*, 2011) e perda de biodiversidade (Pyšek e Richardson, 2010; Villamagna e Murphy, 2010; Khanna *et al.*, 2011), e iv) promove a propagação de pragas e seus vetores (Chandra *et al.*, 2006; Minakawa *et al.*, 2008). Além disso, a expansão do jacinto-de-água pode obstruir rios e sistemas de rega e drenagem (Wilcock *et al.*, 1999; Thouvenot *et al.*, 2013), reduzindo a sua capacidade de transporte, aumentando o risco de inundação, e dificultando a navegação (Holm *et al.*, 1969) e as atividades aquáticas recreativas. Em locais onde existam barragens hidroelétricas, as invasões por jacinto-de-água têm provocado danos a equipamentos eletromecânicos, resultando na redução da produção hidroelétrica (Rushing, 1974; Clayton e Champion, 2006) e ameaças ao fornecimento de energia elétrica (Lu *et al.*, 2007; Tewabe, 2015). Em sistemas agrícolas, a biomassa do jacinto-de-água cria frequentemente dificuldades ao funcionamento de estações elevatórias (Spencer e Ksander, 2005). Esta espécie invasora reduz igualmente até 95% o caudal em canais de rega (Jones, 2009) e promove a perda de água por evapotranspiração.

Uma correta compreensão da distribuição espaço-temporal do jacinto-de-água, é, portanto, essencial para o estudo do impacto da infestação e a gestão eficaz de massas de água, particularmente no apoio à modelação do risco de cheias (Vermuyten *et al.*, 2020).

A monitorização desta planta aquática invasora é fundamental para conhecer a cobertura superficial que provoca em massas de água e adotar práticas de gestão adequadas e economicamente viáveis. No entanto, o uso de métodos convencionais de levantamentos de campo associados à monitorização de infestações de jacinto-de-água traduzem-se num custo económico elevado, constituindo uma atividade demorada, trabalhosa e limitada em termos de cobertura espacial (Ritchie *et al.*, 2003; Shekede *et al.*, 2008; Dube *et al.*, 2015).

A presença do jacinto-de-água em massas de água em Portugal foi relatada pela primeira vez no final da década de 30 do século XX, na bacia do rio Sado (Monteiro *et al.*, 2003), e atingiu a sua maior expansão na bacia do rio Tejo, problema que terá começado em meados dos anos 70 desse século. Esta planta invasora tornou-se um problema em sistemas aquáticos naturais e em sistemas hidráulicos agrícolas, como a Reserva do Paúl de Boquilobo, na região da Golegã, e canais de drenagem e rega de áreas agrícolas de regadio das bacias hidrográficas dos rios Tejo, Sado, Mondego (fot. 1) e Lis. Atualmente, a infestação por jacinto-de-água é generalizada na região centro de Portugal, mas rara em troços fluviais no norte do país devido à dificuldade de a planta sobreviver a baixas temperaturas (Monteiro *et al.*, 2003).

Na última década, o jacinto-de-água tem repetidamente marcado a sua presença em cursos de água no Baixo Mondego, onde domina o sector agrícola, estando-lhe

associadas alterações no ciclo de nutrientes, redução da penetração da luz, aumento de situações de anoxia e redução da qualidade da água. Nesta região, a infestação tem, destacadamente, implicações no fornecimento de água através dos canais de rega e no funcionamento do sistema de drenagem.

Atualmente, a monitorização do jacinto-de-água é efetuada no Baixo Mondego através de equipas de vigilância da presença desta infestante, mas a utilização de métodos convencionais para este fim enfrenta muitas dificuldades. Face à considerável extensão do território e densidade da rede hidrográfica, esta estratégia revela-se dispendiosa e pouco eficaz na deteção precoce deste problema ambiental e na recolha de informação oportuna à adoção de medidas para combater a sua propagação e crescimento.

Atendendo à esperada contribuição de ferramentas de deteção remota na obtenção de um melhor conhecimento da presença de plantas invasoras no meio hídrico, este estudo dedica-se a explorar metodologias alternativas para monitorizar remotamente e categorizar a propagação do jacinto-de-água. Pretendem-se estudar novas abordagens na deteção, observação e mapeamento desta planta invasora usando índices de vegetação e índices de água calculados a partir de dados multiespectrais do satélite Sentinel-2 (S2). O estudo incide sobre uma pequena massa de água localizada num troço do antigo leito do rio Mondego (Portugal), que faz parte integrante do sistema de drenagem principal da zona agrícola do Baixo Mondego.

Aplicação de deteção remota na monitorização de massas de água

Durante a última década, a crescente disponibilidade de dados de satélite em código aberto criou novas possibilidades na monitorização de massas de água. Vários estudos (Hestir *et al.*, 2008; Shekede *et al.*, 2008; Turner, 2013; Dube *et al.*, 2014) mostram que os dados de satélite têm a capacidade de identificar a distribuição espacial e temporal de macrófitas aquáticas, destacando-se o baixo custo e a larga escala das observações e abordagens usadas. A colheita e análise desses dados é mais rápida do que outras abordagens observacionais usadas para inspecionar massas de água. Além disso, a cobertura contínua oferecida pela passagem frequente dos sensores óticos de satélite proporciona elementos para identificar e avaliar a curto e longo prazo os pontos fortes e fracos das medidas de gestão ambiental aplicadas (Penatti *et al.*, 2015). Os registos de longo prazo são úteis para fundamentar decisões sobre a aplicação de medidas de controlo, uma vez que as observações permitem avaliar a eficácia dessas medidas (Ghaderpour *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2020). Essas informações são importantes para órgãos governamentais e de gestão ambiental, bem como para as comunidades locais. O desenvolvimento de métodos

sustentáveis para combater a propagação do jacinto-de-água deverá ser prioritário.

Vários estudos discutem que as ferramentas multiespectrais de deteção remota são capazes de localizar, identificar e fornecer detalhes adequados sobre a intensidade da invasão do meio hídrico por espécies de plantas exóticas, no tempo e no espaço (Carson *et al.*, 1995; Mladinich *et al.*, 2006; Cuneo *et al.*, 2009; Kimothi *et al.*, 2010; Giardino *et al.*, 2015; Palmer *et al.*, 2015), e auxiliar no mapeamento e monitorização de surtos de plantas invasoras em determinados ecossistemas (Müllerová *et al.*, 2013). Especificamente, os sensores óticos de resolução espacial média disponíveis, por exemplo, o Landsat 8 e o S2, fornecem dados úteis à monitorização de componentes hidrológicas, à escala local. Tem sido argumentado que esses sensores são capazes de detetar melhor a distribuição espacial de certas espécies de plantas invasoras e as mudanças dinâmicas ao longo do tempo associadas à sua propagação, em comparação com levantamentos clássicos, baseados em observações de proximidade, *in situ* (Joshi *et al.*, 2006; Hestir *et al.*, 2008; Cheruiyot *et al.*, 2014), dada a extensão espacial e a inacessibilidade de alguns rios e outras massas de água, entre outros fatores. Assim, é fundamental estabelecer tecnologias adequadas para auxiliar na caracterização geoespacial de espécies invasoras, emergindo a deteção remota como a principal fonte de dados para realizar esta tarefa com custos mínimos, nomeadamente em amplas áreas geográficas (Dube *et al.*, 2014; Hestir *et al.*, 2008).

Em particular, no caso do jacinto-de-água, essa abordagem pode ajudar a identificar áreas de risco (Lodge *et al.*, 2006), melhorar a compreensão do comportamento sazonal dessa planta invasora, prever a sua distribuição espacial (Bradley e Mustard, 2006) e quantificar os seus impactos ecológicos e hidrológicos. A maioria dos estudos existentes concentra-se no mapeamento de jacinto-de-água em grandes massas de água (por exemplo, lagos e reservatórios), enquanto estudos em cursos de água (Pádua *et al.*, 2022) ainda são reduzidos.

No entanto, os últimos desenvolvimentos na tecnologia de deteção remota oferecem novas perspetivas e benefícios para detetar e mapear a distribuição espaço-temporal do jacinto-de-água em pequenas massas de água, o que auxiliará na avaliação, gestão e acompanhamento desse problema ambiental. Ao contrário dos dados multiespectrais de banda larga, os sensores de resolução espectral e espacial aperfeiçoados, como é o caso do S2, que proporciona dados com uma resolução espacial de 10 m, melhoraram significativamente a capacidade de compreensão da distribuição espacial do jacinto-de-água, especialmente em pequenas massas de água doce, cuja escala de interesse tem excedido o alcance da típica resolução dos sensores multiespectrais de banda larga. O satélite S2 tornou-se um novo instrumento de deteção

remota para detetar, mapear e monitorar a infestação e cobertura de jacinto-de-água, podendo ser útil em rios (Thamaga e Dube, 2018; Datta *et al.*, 2021).

Vários índices de vegetação, calculados a partir de diferentes bandas espectrais, foram testados no mapeamento da distribuição espacial do jacinto-de-água (Venugopal, 1998; Cho *et al.*, 2008; Shekede *et al.*, 2008; Cheruiyot *et al.*, 2014; Dube *et al.*, 2014; Giardino *et al.*, 2015; Dube *et al.*, 2017), destacando-se o uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que se correlaciona positivamente com a fitossanidade ou vigor das plantas, ou seja, plantas que exibem grande concentração de pigmentos verdes ou elevada atividade fotossintética.

Materiais

Área de Estudo

A área de estudo selecionada (centrada no ponto com coordenadas 36°56'39"N, 10°22'39"W) é um troço do antigo leito do rio Mondego (fig. 1), conhecido como rio Velho do Mondego, localizado perto da aldeia de Ereira (Montemor-o-Velho, Portugal). Este troço de canal fluvial tem a extensão de 1 km e cobre aproximadamente 6,5 ha. Esta massa de água, que integra o sistema de drenagem local, tem sido afetada nos últimos anos por uma infestação de jacinto-de-água. No extremo jusante deste dreno, onde se junta também o rio Foja, existe uma estação elevatória de drenagem (Estação Elevatória do Foja), cujo funcionamento é crucial, nomeadamente em situação de cheia (fig. 1).

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima na área de estudo é temperado com verões secos e amenos (Csb) (IPMA, 2022a). Para o período de 1971 a 2000, dados da estação meteorológica mais próxima (IPMA, 2022b) revelam que a precipitação média mensal da área variou entre 128,9 mm em dezembro e 9,6 mm em julho; a temperatura média diária variou de 9,7°C no inverno a 20,8°C no verão (fig. 2).

Nos últimos anos, principalmente durante o verão, o jacinto-de-água encontra-se fortemente presente no rio Velho do Mondego, transformando o canal fluvial entre a aldeia da Ereira e a Estação Elevatória do Foja num imenso e espesso “tapete” verde (fot. 1). Embora as temperaturas locais sejam inferiores à temperatura ótima de crescimento do jacinto-de-água (25°C a 30°C) (Kasselman, 1995), esta planta consegue crescer e invadir o antigo troço do rio Mondego. Ainda que se saiba que esta planta invasora é bastante sensível quando se atingem valores de salinidade do meio aquático superiores a 0.2‰ (Haller *et al.*, 1974), a Estação Elevatória do Foja funciona como uma barreira à intrusão de águas salobras do leito principal do rio Mondego para os cursos de água adjacentes, por isso a salinidade neste local não parece ser fator limitante ao seu desenvolvimento.

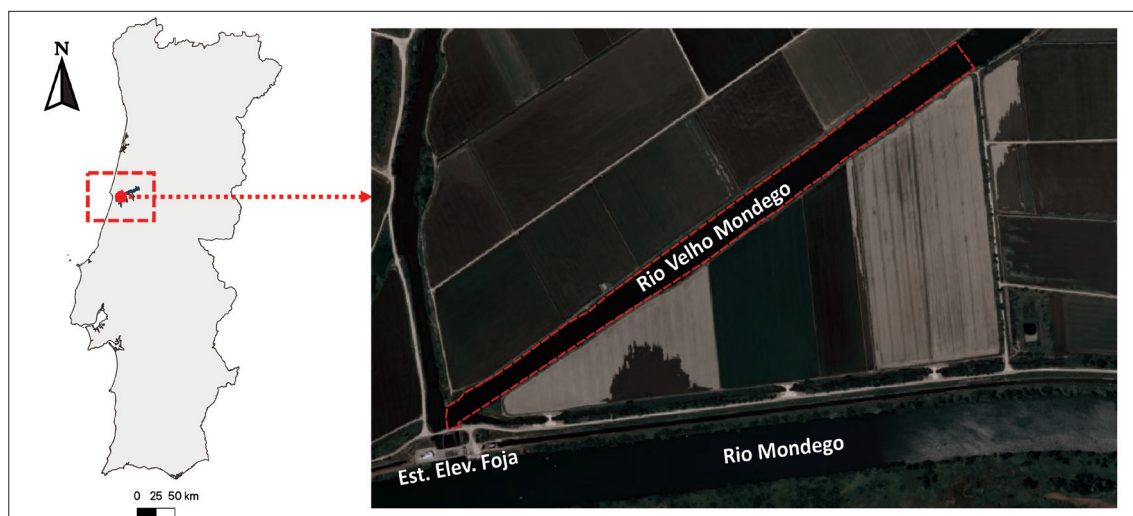


Fig. 1 - Localização da área de estudo (caixa vermelha) no troço do antigo leito do rio Mondego e da Estação Elevatória do Foja, junto à vila de Ereira (Montemor-o-Velho, Portugal).

Fig. 1 - Location of the study area (red box) in the downstream stretch of the old Mondego River bed and the Foja Pumping Station, near the village of Ereira (Montemor-o-Velho, Portugal).

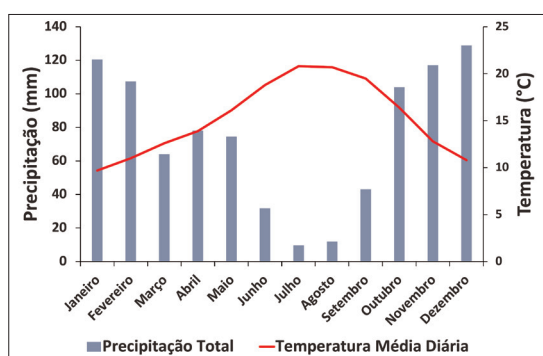


Fig. 2 - Temperatura média diária e precipitação mensal média em Montemor-o-Velho (Portugal), durante o período 1971-2000 (Fonte dos dados: Instituto Português do Mar e da Atmosfera).

Fig. 2 - Average daily temperature and average monthly precipitation in Montemor-o-Velho (Portugal) in the period 1971-2000 (Data source: Instituto Português do Mar e da Atmosfera).

A presença recorrente desta planta invasora neste troço fluvial, principalmente junto à Estação Elevatória do Foja (fot. 2), cria problemas graves e prejudiciais, não só no verão (estação seca) como também no inverno (estação húmida). Por um lado, a presença do jacinto-de-água reduz a capacidade de escoamento dos cursos de água. E, por outro lado, a estação elevatória encontra-se obstruída por jacinto-de-água e outros resíduos, o que dificulta fortemente o seu funcionamento e o necessário escoamento das águas tanto do rio Foja como do antigo troço do rio Mondego, que são descarregadas no leito central do rio Mondego.

Uma das principais consequências dos problemas referidos é a inundação da povoação de Ereira e áreas agrícolas próximas. Devido às obras de proteção contra cheias realizadas no leito principal do rio Mondego na década de 80, e à proximidade do oceano Atlântico que



Fot. 2 - Acumulação de jacinto-de-água junto da Estação Elevatória do Foja (Portugal) (Fotografias de Romeu Gerardo, tiradas a 15/09/2021).

Photo 2 - Infestation of water hyacinth plants near the Foja Pumping Station (Portugal) (Photographs by Romeu Gerardo, taken on 15/09/2021).

afeta o nível das águas do rio (i.e., efeito de maré) (Cunha e Dinis, 2002), o funcionamento desta estação, como parte do sistema de drenagem desta área, é de extrema importância, já que a descarga por gravidade é limitada. No geral, a presença de jacinto-de-água nesta região ainda não é totalmente compreendida, o que dificulta a aplicação de medidas eficientes para lidar com esse problema ambiental e socioeconómico.

Dados e Pré-processamento

Dados de deteção remota obtidos por satélites têm sido cada vez mais incorporados em estudos do meio ambiente e utilizados para fins de gestão operacional ambiental. Uma aplicação comum é o cálculo de índices com base em sinais espectrais, obtidos a escalas espaciais e temporais de interesse para uma variedade de aplicações, como é o caso de índices de vegetação e índices de água.

Neste estudo foram usadas trinta imagens (orto-imagens na projeção Universal Transverse Mercator/World Geodetic System-84) extraídas de dados do S2, que cobrem toda a área de estudo com resolução espacial de 10 m. Essas imagens continham menos de 15% da sua área coberta por nuvens, no entanto, nas imagens utilizadas não se observava a presença de nuvens na área de estudo. As imagens de S2 que possuem dados de reflectância multiespectral foram descarregadas da plataforma online SentinelHub da Agência Espacial Europeia (ESA, 2022). A frequência de aquisição das imagens (correspondente a passagens do satélite) é de 5 dias.

Metodologia

A metodologia utilizada neste estudo para monitorizar e categorizar a propagação do jacinto-de-água é baseada no cálculo de índices de vegetação e de água, calculados com dados das bandas espectrais do S2. Os dois índices selecionados (TABELA I) são índices normalizados e assumem valores entre -1,0 e +1,0; ambos os índices são calculados usando princípios semelhantes.

A reflectância da vegetação é baixa nas regiões do Azul (0,35 a 0,50 µm) e Vermelho (0,62 a 0,69 µm) do espectro visível, atinge o pico localmente na região do Verde (0,50 a 0,62 µm) e é mais alta na região do Infravermelho NIR (0,75 a 1,3 µm). Assim, combinando algebricamente essas bandas no cálculo de índices de vegetação, as diferentes assinaturas espectrais traduzem diferentes propriedades da vegetação.

O NDVI é frequentemente usado (por exemplo, na agricultura) para mapear a vitalidade da vegetação e analisar a mesma quantitativa e qualitativamente. Baseia-se na absorção do pigmento clorofila na banda espectral do Vermelho e na alta reflectância de materiais vegetais na banda NIR. Como a alta atividade fotossintética leva a valores mais baixos de coeficientes de reflectância na região espectral do Vermelho e grandes valores na região NIR, a razão entre esses indicadores (TABELA I) permite separar claramente a vegetação de outros objetos naturais (Ghaderpour *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2020). Assim, o NDVI está diretamente relacionado com a capacidade fotossintética das plantas e, portanto, à absorção de energia das plantas. Como resultado da análise espectral, este índice tem o potencial de avaliar o crescimento, ou vigor, e a densidade da vegetação. Os valores de NDVI sugerem o seguinte: (i) valores positivos mais altos indicam picos de crescimento de plantas, enquanto valores positivos mais baixos podem revelar a existência de plantas não saudáveis; (ii) valores em torno de zero (-0,1 a +0,1) geralmente correspondem a áreas estéreis (por exemplo, rocha e areia) ou plantas mortas; (iii) valores negativos, aproximando-se de -1, indicam a presença de água. Uma limitação do NDVI é que ele mostra baixa sensibilidade para detetar pequenas diferenças no alto teor de clorofila e biomassa, o que é conhecido como “efeito de saturação” (Gao, 1996; Schaefer e Lamb, 2016); este efeito ocorre quando o NDVI é aplicado a imagens sobre áreas com vegetação densa, ou seja, quando o índice de área foliar (LAI, Leaf Area Index) se torna alto (ou seja, LAI ≥ 3) (Gao, 1996).

TABELA I - Descrição dos índices NDVI e NDWI calculados a partir de bandas multiespectrais do satélite Sentinel-2. Essas bandas estão centradas nos seguintes comprimentos de onda: banda 3, 560 nm; banda 4, 665 nm; banda 8, 842 nm.

TABLE I - Description of the satellite-based NDVI and NDWI, calculated from multispectral wavelength bands of Sentinel-2. Those bands are centred in the following wavelengths: band 3, 560 nm; band 4, 665 nm; band 8, 842 nm.

Abreviatura	Índice	Equação	Fórmula	Objeto	Referências
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{(NIR - Vermelho)}{(NIR + Vermelho)}$	$\frac{(Banda\ 8 - Banda\ 4)}{(Banda\ 8 + Banda\ 4)}$	Biomassa, área foliar, teor de clorofila	Rouse <i>et al.</i> , 1984
NDWI	Índice de Água por Diferença Normalizada (Normalized Difference Water Index)	$\frac{(Verde - NIR)}{(Verde + NIR)}$	$\frac{(Banda\ 3 - Banda\ 8)}{(Banda\ 3 + Banda\ 8)}$	Teor de azoto, águas superficiais	McFeeters, 1996

O NDWI é geralmente usado para delimitar massas de água e realçar a sua presença em imagens digitais de detecção remota. A seleção dos comprimentos de onda usados no NDWI (TABELA I) maximiza as propriedades de reflectância da água (Serrano *et al.*, 2019). Ou seja: (i) maximiza a reflectância típica de superfícies de água usando comprimentos de onda da banda do Verde e NIR; (ii) minimiza a baixa reflectância do NIR pela água; e (iii) maximiza a alta reflectância do NIR pela vegetação e características do solo. Como resultado, a presença de superfícies de água é destacada por valores positivos de NDWI, enquanto valores nulos ou negativos de NDWI revelam a presença de vegetação e solo. O uso do NDWI no estudo de superfícies de água cobertas por jacinto-de-água serve como complemento à análise do NDVI.

O software de sistema de informação geográfica Quantum Geographic Information System (QGIS) foi utilizado para delimitar a área de estudo e calcular o NDVI e NDWI para os dados recolhidos, incluindo estatística descritiva básica.

Foi elaborado um fluxograma simplificado (fig. 3) que proporciona uma visão geral das diferentes etapas da metodologia aplicada neste estudo.

Resultados e Discussão

A presença recorrente de infestações de jacinto-de-água na área de estudo foi explorada com recurso à avaliação do NDVI e NDWI no período de 2017 a 2022, a partir

de dados multiespectrais obtidos pelo satélite S2; os dados apresentados na fig. 4 dizem respeito a um pixel centrado nas coordenadas 40°8'55.22"N e 8°44'9.98"W, selecionado aleatoriamente no troço da linha de água inspecionada neste estudo, o antigo leito do rio Mondego, e localizado nas proximidades da Estação Elevatória do Foja (fig. 1). O ciclo anual de crescimento, domínio e declínio do jacinto-de-água é claramente observável na fig. 4. A invasão dominante do jacinto-de-água, cobrindo a superfície da água (fot. 2), conduz aos valores mais altos de NDVI e, correspondentemente, aos valores mais baixos de NDWI observados na fig. 4. Em cada ano é possível observar a redução significativa da presença de jacinto-de-água na linha de água, o que está fortemente associado a caudais elevados, que promovem o transporte desta planta invasora para jusante. Esses caudais resultam da resposta hidrológica à forte variabilidade que caracteriza a precipitação na bacia hidrográfica do Mondego (de Lima e de Lima, 2002), e observam-se geralmente durante a época chuvosa, no inverno (fig. 2).

No entanto, duas situações podem ser destacadas nas figs. 4(a) e 4(b), a saber, o ciclo “longo” do jacinto-de-água em 2017 e o ciclo “curto” em 2020, manifestados nas séries temporais do NDVI e NDWI. O ano de 2017 foi excecionalmente quente (o segundo ano mais quente desde 1931) e, também, extremamente seco (está entre os quatro anos mais secos desde 1931); em 2017 a precipitação anual foi de cerca de 60% da precipitação



Fig. 3 - Esquema simplificado da metodologia aplicada neste estudo.

Fig. 3 - Simplified flowchart of the methodology used in this study.

média anual (IPMA, 2017). A acentuada (e persistente) anomalia da precipitação foi reduzida em dezembro de 2017, mas a situação de seca manteve-se, embora com menor gravidade. Acredita-se que estas condições ambientais possam explicar o comportamento particular do NDVI em 2017, nomeadamente i) a presença dominante de jacinto-de-água na área de estudo durante um período mais longo, manifestada pelo “plateau” mais longo na curva NDVI em 2017, em comparação com outros anos, e ii) a queda faseada da curva NDVI (fig. 4(a)).

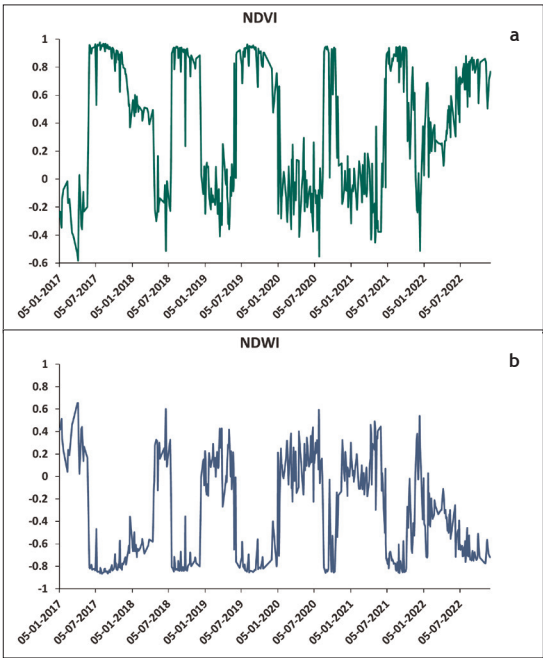


Fig. 4 - Variação temporal da presença de jacinto-de-água junto à Estação Elevatória do Foja (vale do Baixo Mondego, Portugal), para o período de 2017 a 2022, avaliada utilizando (a) NDVI e (b) NDWI (Fonte de dados: Sentinel Hub EO Browser, 2022).

Fig. 4 - Temporal variation of the presence of water hyacinths near the Foja Pumping Station (Lower Mondego valley, Portugal), for the period 2017 to 2022, assessed using (a) NDVI and (b) NDWI (Data source: Sentinel Hub EO Browser, 2022).

Por outro lado, a situação revelada pela curva NDVI em 2020, que mostra uma infestação dominante na linha de água menos prolongada do que em outros anos tem, pelo contrário, origem antropogénica, pelo menos em parte: o município de Montemor-o-Velho decidiu proceder à limpeza do canal fluvial através de dispositivos mecânicos entre a povoação de Ereira e a Estação Elevatória do Foja durante o verão de 2020, o que reduziu significativamente a presença de jacinto-de-água durante o ano de 2020 na área de estudo (fot. 3). A cheia registada em meados de dezembro de 2019 e que afetou esta região (Gerardo *et al.*, 2022) como resultado da rotura dos diques de proteção existentes nas margens do rio Mondego a montante do local de estudo não terá tido influência significativa na diminuição da presença desta espécie invasora em 2020. Porém, a precipitação elevada ocorrida nesse inverno e consequente aumento do caudal no rio Velho terá conduzido a uma menor expansão da infestação em 2020 do que em anos anteriores (fig. 4(a)).

No entanto, a ação de remoção do jacinto-de-água levada a cabo no curso de água em 2020 não resolveu o problema da infestação, pois a presença dominante do jacinto-de-água no curso de água foi restabelecida no período favorável ao crescimento da planta que se seguiu, apresentando-se, logo em 2021, semelhante aos anos anteriores (fig. 4(a)). As curvas NDVI e NDWI (fig. 4) confirmam a presença massiva da cobertura da superfície da água por jacinto-de-água, durante um período longo, o que foi confirmado no local, por observação direta. O facto dos índices estudados (fig. 4) revelarem que durante os anos de 2021 e 2022 o canal fluvial se manteve, em média, com níveis de infestação mais elevados do que em outros anos estará relacionado com o período prolongado em que se observaram anomalias negativas de precipitação, que atingiu todo o território continental português. Essa situação conduziu a um evento de seca severa na maior parte do território durante este período, o que não terá

Fot. 3 - Vista do troço do antigo leito do rio Mondego após ação de limpeza do jacinto-de-água efetuada pelo Município de Montemor-o-Velho durante o verão de 2020 (Fotografia de Romeu Gerardo, tirada a 07/07/2020).

Photo 3 - View of stretch of the old Mondego riverbed after the action to remove the water hyacinths carried out by the Municipality of Montemor-o-Velho in the summer of 2020 (Photograph by Romeu Gerardo, taken on 07/07/2020).



conduzido a caudais suficientemente elevados para favorecer o habitual arrastamento da planta invasora com o escoamento.

O estudo da infestação com jacinto-de-água no troço do canal fluvial selecionado incluiu igualmente o mapeamento do NDVI, calculado com base nos dados do S2, o que permitiu obter informação sobre a distribuição e variabilidade espaço-temporal da presença desta invasora aquática no local. Em particular, os mapas na fig. 5 permitem comparar a extensão da cobertura da superfície da água com jacinto-de-água em agosto de 2019 e agosto de 2020. A menor incidência da presença da invasora aquática em agosto de 2020 é explicada pela operação mecânica de remoção da infestante conduzida no verão de 2020, o que impediu neste ano o desenvolvimento do padrão habitual de propagação da infestação, tendo como referência os outros anos analisados, em que o canal não foi intervencionado com operações de limpeza. A escala NDVI usada nos mapas da fig. 5 aplica uma paleta vermelho-amarelo-verde às imagens processadas, que geralmente é vista como intuitiva: verde sinaliza vegetação saudável e vermelho destaca áreas sem vegetação. Em comparação com outros satélites, a maior resolução espacial do S2 permite a compreensão mais detalhada da superfície da Terra observada, tornando os índices multiespectrais estudados úteis para o estudo de pequenos objetos, como pequenos cursos de água.

Para os anos de 2019 e 2020, a fig. 6 mostra as séries temporais do NDVI médio calculado para a área sinalizada no canal fluvial; a área é descrita por 645 pixels. A análise dos dados revela a tendência observada

na fig. 4, nomeadamente, em 2019, uma forte expansão de jacinto-de-água no início do verão e a incursão da planta invasora no canal fluvial até ao inverno, quando o NDVI diminuiu abruptamente. Esta diminuição estará associada a caudais elevados observados em janeiro de 2020, aumentando a sua capacidade de transporte do jacinto-de-água. A fig. 6 mostra que o valor de NDVI médio registado no início de 2020 foi inferior ao observado no ano transato, o que pode igualmente ser observado em Gerardo e de Lima (2022), e que o aumento desse índice se deu em 2020 a uma taxa notoriamente mais baixa do que o valor normal. Terá também contribuído para esse facto a influência antrópica no processo de infestação da massa de água, decorrente da limpeza conduzida no verão desse ano. Os valores médios de NDVI oscilaram entre $-0,01$ e $+0,91$ em 2019 e entre $-0,08$ e $+0,61$ em 2020. Valores de NDVI próximos de zero e negativos indicam a presença de superfície de água. Quanto mais alto é o valor médio do NDVI, mais a superfície da água se encontra coberta por jacinto-de-água, tal como observado na fig. 5, no mapa correspondente a 26/8/2019.

Adicionalmente, a fig. 6 mostra que a cobertura massiva da superfície de água por esta planta invasora aquática em 2019 ocorreu durante vários meses, o que constituiu um problema grave, não apenas para o ecossistema, mas igualmente para o normal funcionamento do canal e de operações nas infraestruturas hidráulicas existentes no local. Nos últimos anos esta situação é recorrente, sendo da maior urgência a adoção de medidas de gestão sustentáveis das massas de água afetadas por esta infestante aquática.

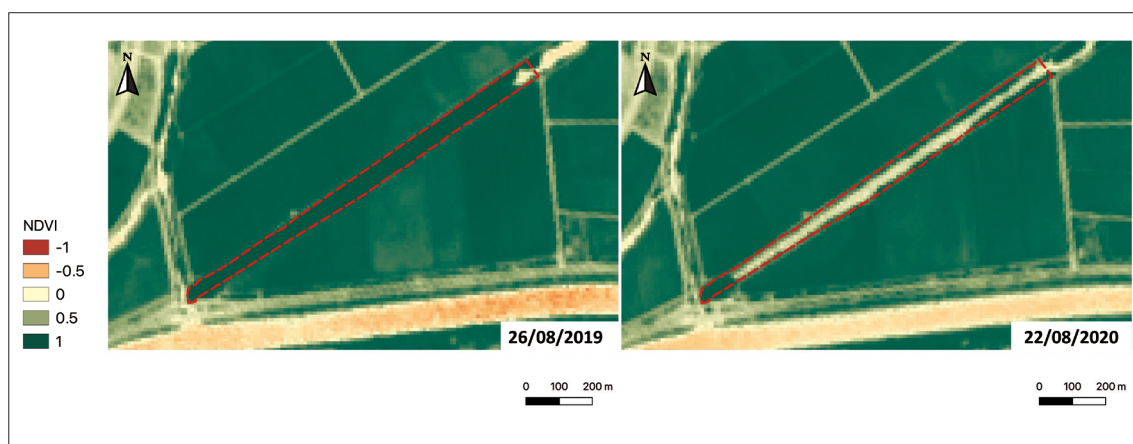


Fig. 5 - Mapeamento do NDVI na área de estudo, mostrando a diferença entre o grau de infestação pelo jacinto-de-água em agosto de 2019 e agosto de 2020, no troço do antigo leito do rio Mondego, delimitado a vermelho. Em julho/agosto de 2020, decorreu uma operação mecânica de remoção da planta invasora neste troço de rio que impediu o padrão típico de desenvolvimento da propagação da infestação.

Fig. 5 - Mapping of NDVI in the study area, showing the difference between the level of water hyacinth infestation in August 2019 and in August 2020, in the downstream stretch of the old Mondego river bed, outlined in red. In July/August 2020, a mechanical operation was carried out to remove the invasive plant in this stretch of the river, which prevented the typical spread of infestation from developing.

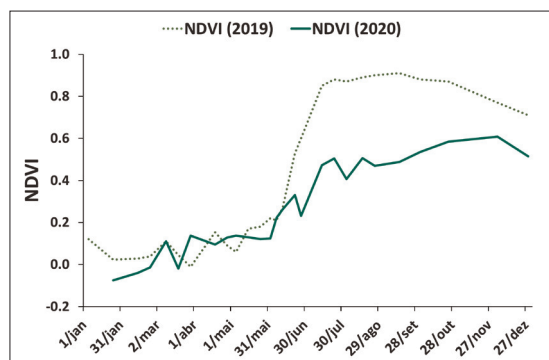


Fig. 6 - Variação temporal do NDVI médio obtido para o troço da linha de água estudada, durante os anos de 2019 e 2020.

Fig. 6 - Temporal variation of the mean NDVI obtained for the stretch of the studied water course, during 2019 and 2020.

Conclusões

O jacinto-de-água, que se espalhou por quase todos os continentes, frequentemente após introdução, tem impactos negativos substanciais na hidrologia, sócio-economia e ecossistemas aquáticos das áreas afetadas por esta infestante aquática. Este estudo debruça-se sobre a situação observada num sector de um canal fluvial localizado no Baixo Mondego, explorando o uso de ferramentas de deteção remota para monitorizar o jacinto-de-água.

Os resultados confirmam que os dados obtidos pelo satélite S2 têm o potencial de investigar a distribuição espacial e temporal de jacinto-de-água em cursos de água. No entanto, a resolução espacial dos dados de deteção remota disponíveis dificulta ainda a aplicabilidade da metodologia proposta neste estudo de caso a cursos de água de pequena dimensão (por exemplo, ribeiras). Espera-se que os desenvolvimentos tecnológicos disponibilizem de forma gratuita dados de deteção remota com resolução suficiente para ultrapassar rapidamente esta dificuldade.

Face à singularidade típica da cobertura vegetal da superfície da água estabelecida pelo jacinto-de-água, o índice NDVI mostrou-se adequado para analisar a presença desta infestante aquática em massas de água superficiais.

Espera-se que a abordagem utilizada para avaliar a distribuição espaço-temporal do jacinto-de-água com base nos dados de deteção remota, e os resultados obtidos, possam contribuir para abrir novos caminhos na investigação científica focada no estudo da modificação de massas de água doce e no impacto de mudanças climáticas e atividades antropogénicas em sistemas aquáticos. Adicionalmente, prevê-se que este estudo seja útil a gestores e decisores, na definição e implementação de estratégias apropriadas para monitorizar e controlar a floração e invasão de jacinto-de-água em diversos tipos de massas de água superficiais, de pequenos rios a lagos ou reservatórios artificiais. Em particular, a oportunidade para a erradicação precoce

(por exemplo, por métodos mecânicos) da planta invasora pode ser mais facilmente avaliada e planeada fazendo uso de informações valiosas de deteção remota, disponíveis em plataformas de satélite. Embora as estratégias preventivas de infestações de jacinto-de-água sejam as melhores, em massas de água infestadas recomenda-se a adoção de medidas de gestão integradas.

Agradecimentos

A investigação descrita neste artigo teve o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia ao abrigo da bolsa PRIMA/0006/2018 (Projeto MEDWATERICE: Utilização sustentável da água nos agroecossistemas de orizicultura na região mediterrânica), com o apoio do Programa PRIMA.

Referências bibliográficas

- Boothroyd, R. J., Nones M., Guerrero, M. (2021). Deriving planform morphology and vegetation coverage from remotesensing to support river management applications. *Frontiers in Environmental Science*. 9, 657354. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.657354>
- Bradley, B. A., Mustard, J. F. (2006). Characterizing the landscape dynamics of an invasive plant and risk of invasion using remote sensing. *Ecological Applications*. 16 (3), 1132–1147. DOI: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[1132:CTLDOA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[1132:CTLDOA]2.0.CO;2)
- Carson, H. W., Lass L. W., Callihan R. H., (1995). Detection of yellow hawkweed (*Hieracium pratense*) with high resolution multispectral digital imagery. *Weed Technology*. 9, 477–483. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0890037X0002371X>
- Ceccato, P., Flasse S., Grégoire, J. M. (2002). Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: part 2. Validation and applications. *Remote Sensing Environm.* 82, 198–207. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00036-6)
- Chander, S., Pompapathi, V., Gujrati, A., Singh, R. P., Chaplot, N., Patel, U. D. (2018). Growth of invasive aquatic macrophytes over Tapi river. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, XLII-5, 829-833. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-829-2018>
- Chandra, G., Ghosh, A., Biswas, D., Chatterjee, S. N. (2006). Host plant preference of *Mansonia* mosquitoes. *Journal of Aquatic Plant Management*. 44, 142-144.
- Cheruiyot, E. K., Mito, C., Menenti, M., Gorte, B., Koenders, R., Akdim, N. (2014). Evaluating MERIS-based aquatic vegetation mapping in Lake Victoria. *Remote Sensing*. 6, 7762–7782. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6087762>

- Cho, H. J., Kirui P., Natarajan N. (2008). Test of multispectral vegetation index for floating and canopy-forming submerged vegetation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 5, 477–483. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph5050477>
- Clayton, J. S., Champion P. D. (2006). Risk assessment method for submerged weeds in New Zealand hydroelectric lakes. *Hydrobiologia*. 570, 183–188. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0179-z>
- Cuneo, P., Jacobson, C. R., Leishman, M. R. (2009). Landscape scale detection and mapping of invasive African Olive (*Olea europaea* L. ssp. *cuspidata* Wall ex G. Don Ciferri) in SW Sydney, Australia using satellite remote sensing. *Applied Vegetation Science*. 12, 145–154 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2009.01010.x>
- Cunha, P. P., Dinis, J. Sedimentary dynamics of the Mondego estuary. *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin: Global Importance of Local Experience*. 43–62 Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra (2002).
- Datta, A., Maharaj, S., Prabhu, G. N., Bhowmik, D., Marino, A., Akbari, V., Rupavatharam, S., Sujeetha, J.A.R.P., Ananrao, G.G., Poduvattil, V.K., et al. (2021). Monitoring the spread of water hyacinth (*Pontederia crassipes*): challenges and future developments. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 9, 631338. DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.631338>
- de Lima, M. I. P., de Lima, J. L. M. P. (2002). Precipitation and hydrology of the Mondego catchment: a scale invariant study. *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin: Global Importance of Local Experience*. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, 13–28.
- Dersseh, M. G., Melesse, A. M., Tilahun, S. A., Abate, M., Dagnew, D. C. (2019). Water hyacinth: review of its impacts on hydrology and ecosystem services—lessons for management of Lake Tana. *Extreme Hydrology and Climate Variability*, 237–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00019-1>
- Dube, T., Mutanga, O., Sibanda, M., Bangamwabo, V., Shoko, C. (2017). Testing the detection and discrimination potential of the new Landsat 8 Satellite data on the challenging water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in freshwater ecosystems. *Applied Geography*. 84, 11–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.04.005>
- Dube, T., Mutanga, O., Seutloali, K., Adelabu, S., Shoko, C. (2015). Water quality monitoring in sub-Saharan African lakes: a review of remote sensing applications. *African Journal of Aquatic Science*. 40, 1–7. DOI: <https://doi.org/10.2989/16085914.2015.1014994>
- Dube, T., Gumindoga W., M. Chawira (2014). Detection of land cover changes around Lake Mutirikwi, Zimbabwe, based on traditional remote sensing image classification techniques. *African Journal of Aquatic Science*. 39 (1), 89–95. DOI: <https://doi.org/10.2989/16085914.2013.870068>
- Dufour, S., Rodríguez-González P. M., Laslier M. (2019). Tracing the scientific trajectory of riparian vegetation studies: main topics, approaches and needs in a globally changing world. *Science of the Total Environment*. 653, 1168–1185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.383>
- ESA (2022). <https://scihub.copernicus.eu/>
- Gao, B. (1996). NDWI: a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing Environment*. 58 (3), 257–266. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gerardo, R., de Lima I. (2022). Assessing the potential of Sentinel-2 data for tracking invasive water hyacinth in a river branch. *Journal of Applied Remote Sensing*. 16 (1), 014511. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.16.014511>
- Gerardo, R, de Lima I., de Lima, J. L. M. P. (2022). Mapeamento de áreas inundadas usando um índice de água baseado em dados do satélite Sentinel-2: as cheias de 2019 no Baixo Mondego (Portugal). *XX SILUBESA - XX Simpósio Luso-Brasileiro de Eng. Sanitária e Ambiental*, 5 p.
- Getsinger, K., Dibble, E., Rodgers, J., Spencer, D. F. (2014). Benefits of Controlling Nuisance Aquatic Plants and Algae in the United States. *Council for Agricultural Science and Technology*, Ames.
- Ghaderpour, E., Ben Abbes, A., Rhif, M., Pagiatakis, S. D., Farah, I. R. (2020). Non-stationary and unequally spaced NDVI time series analyses by the LSWAVE software. *International Journal of Remote Sensing*. 41 (6), 2374–2390. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1688419>
- Giardino, C., Bresciani, M., Valentini, E., Gasperini, L., Bolpagni, R., Brando, V. E. (2015). Airborne hyperspectral data to assess suspended particulate matter and aquatic vegetation in a shallow and turbid lake. *Remote Sensing Environment*. 157, 48–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.034>
- GISD—Global Invasive Species Database (2006). *Eichhornia crassipes* (aquatic plant). DOI: <http://www.issg.org/database/species/ecology.asp?Si=70>
- Gopal, B. (1987). *Water Hyacinth*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for

- grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*. 34, L06407.
DOI: <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>
- Guerreiro, A. R. (1976). O jacinto aquático *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms em Portugal. II *Simpósio Nacional Herbologia*. 1–17.
- Haller, W. T., Sutton, D. L., Barlowe, W. C. (1974). Effects of salinity on growth of several aquatic macrophytes. *Ecology*. 55 (4), 891–894.
DOI: <https://doi.org/10.2307/1934427>
- Halstead, J. M., Michaud, J., Hallas-Burt, S., Gibbs, J. P. (2003). Hedonic analysis of effects of a nonnative invader (*Myriophyllum heterophyllum*) on New Hampshire (USA) lakefront properties. *Environmental Management*. 32 (3), 391–398.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-003-3023-5>
- Havel, J. E., Kovalenko, K. E., Thomaz, S. M., Amalfitano, S., Kats, L. B. (2015). Aquatic invasive species: challenges for the future. *Hydrobiologia*. 750, 147–170.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2166-0>
- Hestir, E.L., Khanna, S., Andrew, M.E., Santos, M.J., Viers, J.H., Greenberg, J.A., Rajapakse, S.S., Ustin, S. (2008). Identification of invasive vegetation using hyperspectral remote sensing in the California Delta ecosystem. *Remote Sensing Environment*. 112, 4034–4047.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.01.022>
- Hill, M. P., Coetzee J. (2017). The biological control of aquatic weeds in South Africa: current status and future challenges. *Bothalia-African Biodiversity & Conservation*. 47 (2), a2152.
DOI: <https://doi.org/10.4102/abc.v47i2.2152>
- Hill M. P., Coetzee, J. A. (2008). Integrated control of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in Africa. *EPPO Bull./Bull. OEPP*, 38 (3), 452–457.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2008.01263.x>
- Holm, L. G., Plucknett, D. L., Pancho, J. V., Herberger, J. P. (1977). *The World's Worst Weeds: Distribution and Biology*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
- Holm, L. G., Weldon L. W., van Blackburn, R. D. (1969). Aquatic weeds. *Science*. 166 (3906), 699–709.
DOI: <https://doi.org/10.1126/science.166.3906.699>
- IPMAa—Instituto Português do Mar e da Atmosfera (2022). Ficha climatológica 1971–2000. URL: https://www.ipma.pt/bin/file.data/climate-normal/cn_71-00_MONTEMOR_O_VELHO.pdf
- IPMAb—Instituto Português do Mar e da Atmosfera (2022). Normais climatológicas. URL: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>
- Jones, R. W. (2009). The impact on biodiversity, and integrated control, of water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Martius) Solms-Laubach (*Pontederiaceae*) on the Lake Nsezi-Nseleni river system. (Tese de Doutoramento, Rhodes University).
- Joshi, C., De Leeuw, J., Skidmore, A. K., Van Duren, I. C., Van Oosten, H. (2006). Remotely sensed estimation of forest canopy density: a comparison of the performance of four methods. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 8, 84–95.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.08.004>
- Julien, M. H. (2001). Biological control of water hyacinth with arthropods: a review to 2000. *ACIAR Proceedings* 102, 8–20.
- Kasselman, C. (1995). *Aquarienpflanzen*, 1–472 Egen Ulmer GMBH & Co., Stuttgart.
- Keller, R. P., Lodge, D. M. (2009). Invasive species. *Encyclopedia of Inland Waters*. 92–99 Academic Press, New York.
- Khanna, S., Santos, M. J., Ustin, S. L., Haverkamp, P. J. (2011). An integrated approach to a biophysically based classification of floating aquatic macrophytes. *International Journal of Remote Sensing*. 32 (4), 1067–1094.
DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160903505328>
- Kimothi, M. M., Anitha, D., Vasistha, H. B., Soni, P., Chandola, S. K. (2010). Remote sensing to map the invasive weed, *Lantana camara* in forests. *Tropical Ecology*. 51, 67–74.
- Kriticos, D. J., Brunel S. (2016). Assessing and managing the current and future pest risk from water hyacinth, (*Eichhornia crassipes*), an invasive aquatic plant threatening the environment and water security. *PLoS One*. 11 (8), e0120054.
DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120054>
- Law, R. (2007). Fisheries-induced evolution: present status and future directions. *Marine Ecology Progress Series*. 335, 271–277. DOI: <https://doi.org/10.3354/meps335271>
- Lodge, D.M., Williams, S., MacIsaac, H., Hayes, K., Leung, B., Loope, L., Reichard, S., Mack, R.N., Moyle, P.B., Smith, M., Andow, D.A., Carlton, J.T., McMichael, A. (2006). Biological invasions: recommendations for U.S. policy and management. *Ecological Applications*. 16, 2035–2054. DOI: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[2035:BIRFUP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[2035:BIRFUP]2.0.CO;2)
- Lu, J., Wu, J., Fu, Z., Zhu, L. (2007). Water hyacinth in China: a sustainability science-based management framework. *Environmental Management*. 40, 823.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-007-9003-4>
- Malik, A. (2007). Environmental challenge vis a vis opportunity: the case of water hyacinth. *Environment*

- International*. 33, 122–138.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.08.004>
- McFeeters S. K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 17 (7), 1425–1432.
DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Meerhoff, M., Fosalba, C., Bruzzone, C., Mazzeo, N., Noordoven, W., Jeppesen, E. (2006). An experimental study of habitat choice by Daphnia: plants signal danger more than refuge in subtropical lakes. *Freshwater Biology*. 51 (7), 1320–1330.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01574.x>
- Minakawa, N., Sonye, G., Dida, G. O., Futami, K., Kaneko, S. (2008). Recent reduction in the water level of Lake Victoria has created more habitats for *Anopheles funestus*. *Malaria Journal*. 7 (119), 1–6.
DOI: <https://doi.org/10.1186/1475-2875-7-119>
- Mironga, J. M., Mathooko J. M., Onywere, S. M. (2014). Effects of spreading patterns of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) on zooplankton population in Lake Naivasha, Kenya. *International Journal of Development and Sustainability*. Dev. 3 (10), 1971–1987.
- Mitchell, D. S. (1985). African aquatic weeds and their management - The Ecology and Management of African Wetland Vegetation. *Geobotany*. 177–202 Springer, Dordrecht.
- Mladinich, C. S., Bustos, M. R., Stitt, S., Root, R., Brown, K., Anderson, G. L., Hager, S. (2006). The use of Landsat 7 enhanced thematic mapper Plus for mapping leafy spurge. *Rangeland Ecology & Management*. 59, 500–506.
DOI: <https://doi.org/10.2111/06-027R1.1>
- Monteiro, A., Moreira, I., Santos, A. C., Serrasqueiro, P. M. (2003). Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in Portugal: synopsis of its bioecology and management. *Atas del IX Congreso de la Sociedad Española de Malherbología*. 89–103.
- Müllerová, J., Pergla, J., Pyšek, P. (2013). Remote sensing as a tool for monitoring plant invasions: testing the effects of data resolution and image classification approach on the detection of a model plant species *Heracleum mantegazzianum* (giant hogweed). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 25, 55–65.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.03.004>
- Murkin, H. R., Kadlec, J. A. (1986). Relationships between waterfowl and macro-invertebrate densities in a northern prairie marsh. *Journal of Wildlife Management*. 50, 212–217.
DOI: <https://doi.org/10.2307/3801899>
- Navarro, L. A., Phiri, G. (2000). Water Hyacinth in Africa and the Middle East: A Survey of Problems and Solutions. *International Development Research Centre*, Ottawa.
- Ndimele, P. E., Kumolu-Johnson, C. A., & Anetekhai, M. A. (2011). The invasive aquatic macrophyte, water hyacinth [*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solm-Laubach: *Pontederiaceae*]: problems and prospects. *Research Journal of Environmental Sciences*. 5, 509–520.
DOI: <https://doi.org/10.3923/rjes.2011.509.520>
- Owens, C. S., Madsen, J. D. (1995). Low temperature limits of water hyacinth. *Journal of Aquatic Plant Management*. 33, 63–68.
- Pádua, L., Duarte, L., Antão-Geraldes, A. M., Sousa, J. J., Castro, J. P. (2022). Spatio-Temporal Water Hyacinth Monitoring in the Lower Mondego (Portugal) Using Remote Sensing Data. *Plants*. 11 (24), 3465.
DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11243465>
- Palmer, S. C. J., Kutser T., Hunter, P. D. (2015). Remote sensing of inland waters challenges, progress and future directions. *Remote Sensing Environment*. 157, 1–8.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.021>
- Parsons, W. T., Cuthbertson, E. G. (2001). Noxious Weeds of Australia, CSIRO Publishing, Collingwood.
- Patel, S. (2012). Threats, management and envisaged utilizations of aquatic weed *Eichhornia crassipes*: an overview. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 11, 249–259.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9289-4>
- Penatti, N. C., de Almeida, T. I. R., Ferreira, L. G., Arantes, A. E., Coe, M. T. (2015). Satellite based hydrological dynamics of the world's largest continuous wetland. *Remote Sensing Environment*. 170, 1–13.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.031>
- Penfound, W. T., Earle, T. T. (1948). The biology of the water hyacinth. *Ecological Monographs*. 18, 447–472.
DOI: <https://doi.org/10.2307/1948585>
- Pyšek, P., Richardson, D. M. (2010). Invasive species, environmental change and management, and health. *Annual Review of Environment and Resources*. 35 (1), 25–55. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-033009-095548>
- Ritchie, J. C., Zimba, P. V., Everitt, J. H. (2003). Remote sensing techniques to assess water quality. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 69, 695–704.
DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.695>
- Roijackers, R., Szabo, S., Scheffer, M. (2004). Experimental analysis of the competition between algae and

- duckweed. *Archiv Fur Hydrobiologie*. 160, 401–412.
DOI: <https://doi.org/10.1127/0003-9136/2004/0160-0401>
- Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A., Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Texas A&M University, Remote Sensing Center, College Station, Texas, USA.
- Rushing, W. N. (1974). Water hyacinth research in Puerto Rico. *Hyacinth Control Journal*. 12, 48–52.
- Schaefer, M. T., Lamb, D. W. (2016). A combination of plant NDVI and LiDAR measurements improve the estimation of pasture biomass in tall fescue (*Festuca arundinacea* var. Fletcher). *Remote Sensing*. 8 (2), 109. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8020109>
- Serrano, J., Shahidian, S., Marques da Silva J. (2019). Evaluation of normalized difference water index as a tool for monitoring pasture seasonal and inter-annual variability in a mediterranean agro-silvo-pastoral system. *Water*. 11, 62.
DOI: <https://doi.org/10.3390/w11010062>
- Shekede, M., Kusangaya S., Schmidt, K. (2008). Spatio-temporal variations of aquatic weed abundance and coverage in Lake Chivero, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 33, 714–721.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.06.052>
- Singh, G., Reynolds, C., Byrne, M., Rosman, B. (2020). A remote sensing method to monitor water, aquatic vegetation, and invasive water hyacinth at national extents. *Remote Sensing*. 12, 4021.
DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12244021>
- Spencer, D. F., Ksander, G. G. (2005). Seasonal growth of water hyacinth in the Sacramento/San Joaquin Delta, California. *Journal of Aquatic Plant Management*. 43, 91–94. DOI: <http://hdl.handle.net/1834/19475>
- Stiers, I., Crohain, N., Josens, G., Triest, L. (2011). Impact of three aquatic invasive species on native plants and macroinvertebrates in temperate ponds. *Biological Invasions*. 13, 2715–2726.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10530-011-9942-9>
- Téllez, T. R., López, E. M. D. R., Granado, G. L., Pérez, E. A., López, R. M., Guzmán, J. M. S. (2008). The water hyacinth, *Eichhornia crassipes*: an invasive plant in the Guadiana River Basin (Spain). *Aquatic Invasions*. 3, 42–53. DOI: <https://doi.org/10.3391/ai.2008.3.1.8>
- Tewabe, D. (2015). Preliminary survey of water hyacinth in Lake Tana, Ethiopia. *Global Journal of Allergy*, 1, 013–018.
DOI: <https://doi.org/10.17352/2455-8141.000003>
- Thamaga, K. H., Dube, T. (2018). Remote sensing of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review on applications and challenges. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 10, 36–46 (2018).
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.02.005>
- Thouvenot, L., Haury, J., Thiebaut, G. (2013). A success story: water primroses, aquatic plant pests. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 23, 790–803. DOI: <https://doi.org/10.1002/aqc.2387>
- Tiwari, S., Dixit, S., Verma N. (2007). An effective means of biofiltration of heavy metal contaminated water bodies using aquatic weed *Eichhornia Crassipes*. *Environment Monitoring Assessment*. 129, 253–256.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9358-7>
- Turner, W. (2013). Satellites: make data freely accessible. *Nature*. 498, 37. DOI: <https://doi.org/10.1038/498037c>
- Venugopal, G. (1998). Monitoring the effects of biological control of water hyacinth using remotely sensed data: a case study of Bangalore, India. *Singapore Journal of Tropical Geography*. 19 (1), 91–105.
DOI: <https://doi.org/10.1111/1467-9493.00027>
- Vermuyten, E., Meert, P., Wolfs, V., Willems, P. (2020). Impact of seasonal changes in vegetation on the river model prediction accuracy and real-time flood control performance. *Journal of Flood Risk Management*. 13 (4), e12651. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12651>
- Villamagna, A. M., Murphy, B. R. (2010). Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review. *Freshwater Biology*. 55, 282–298.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02294.x>
- Vis, C., Hudon C. Carignan, R. (2003). An evaluation of approaches used to determine the distribution and biomass of emergent and submerged aquatic macrophytes over large spatial scales. *Aquatic Botany*. 77 (1), 87–201.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(03\)00105-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(03)00105-0)
- Wilcock, R. J., Champion, P. D., Nagels, J. W., Croker, G. F. (1999). The influence of aquatic macrophytes on the hydraulic and physic-chemical properties of a New Zealand lowland stream. *Hydrobiologia*. 416, 203–214.
DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1003837231848>



RISCOS



APRESENTAÇÃO DE RECENTE METODOLOGIA ÚTIL PARA A GESTÃO DO RISCO NO LITORAL*

PRESENTATION OF RECENT USEFUL RISK MANAGEMENT METHODOLOGY ON THE COAST

87

Carla Caroça

Universidade de Lisboa (Portugal)

Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia

ORCID [0000-0003-4091-028X](https://orcid.org/0000-0003-4091-028X) carlacaroça2@sapo.pt

RESUMO

Os métodos tradicionais de estudo hidrodinâmico das ondas e de batimetria, no domínio litoral de menor profundidade, desde a zona de rebentação (*breaker zone*) à zona de espraio (*swash zone*) são difíceis de serem efectuados. O texto apresenta um modelo recente de estudo hidrodinâmico com obtenção de dados contínuos e temporais, pouco dispendioso, praticamente sem dificuldade e de alta resolução. O processo foi testado para duas praias. Através das imagens de vídeo de vigilância das praias obtiveram-se vários parâmetros oceânicos e a batimetria, e definiu-se a posição adequada para a câmara de vídeo. Apesar de ser um processo em início, considerou-se ser necessário para a gestão e risco da orla costeira.

Palavras-chave: Litoral, vídeo, batimetria, gestão, Matlab.

ABSTRACT

The traditional methods of hydrodynamic study of waves and bathymetry in less deep coastal areas, from the surf zone (*breaker zone*) to the swash zone are not easy to implement. This article presents a recent model of a hydrodynamic study where high resolution continuous and temporal data are obtained, at no great cost, practically without difficulty. The process was tested for two beaches. The surveillance video images of the beaches provided several oceanic parameters and the bathymetry, and the appropriate position for the video camera was defined. Despite being a process in its infancy, it was considered necessary for the management and risk of the coastline.

Keywords: Coast, video, bathymetry, management, Matlab.

* O texto desta nota corresponde a uma comunicação apresentada no IV Simpósio Ibero-Afro-Americano de Riscos, tendo sido submetido em 24-09-2022, sujeito a revisão por pares a 27-09-2022 e aceite para publicação em 31-01-2023.

Esta nota é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 31 (I), 2024, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

O planeta Terra está a sofrer alterações climáticas produzindo vários efeitos. Na orla costeira, as consequências são: o aumento do nível médio do mar, as mudanças nas correntes oceânicas e a erosão no substracto natural e artificial sob o mar e sobre o continente. Estas consequências naturais geram riscos à população, tais como, a perda de bens e de vidas humanas (Santos e Miranda, 2007). Para evitar-se estes riscos há que elaborar planos de ordenamento do território, do turismo litoral e de emergência. No entanto, sem existir um estudo de conhecimento contínuo da área abrangida ao longo do tempo (horas, dias, meses e anos) associada ao clima e às acções/actividades humanas, muito dificilmente se conseguirá evitar e/ou prevenir esses riscos na orla costeira, pois não se conhece nem se compreende o que ocorre nesse troço do litoral.

O domínio litoral ou, mais conhecido por praia, encontra-se entre o domínio oceânico e continental, entre a zona das águas intermédias - profundas e da zona do continente (fig.1).

O litoral apresenta, no sentido do mar para o continente, a praia submarina, a praia subaérea e a duna, arriba e/ou estrutura artificial. A praia submarina inclui parte da zona de águas intermédias, a zona de água rasas, a zona de rebentação (*breaker zone*) e parte da zona do espalho (*surf zone*). A praia subaérea divide-se em praia subaérea baixa ou zona intertidal (*foreshore*) e a praia subaérea alta ou zona supratidal (*backshore*). A zona intertidal compreende parte da zona de espalho (*surf zone*) e parte da zona de espraio (*swash zone*). A zona supratidal inclui parte da zona do espraio (*swash zone*) e o galgamento (The Oceanography Course Team, 2006).

O estudo hidrodinâmico das ondas do mar, que se propagam desde as águas profundas às zonas costeiras, é útil para o apoio à navegação, à actividade piscatória, às actividades desportistas (exemplo: *surf*), aos trabalhos de investigação nas áreas da oceanografia física, da geofísica, da biologia e da engenharia civil costeira, e consequentemente, à protecção civil marinha, ao planeamento e ordenamento do território litoral, à monitorização, à avaliação de risco e ao sistema de alerta (exemplos: erosão costeira, *tsunami*) (Pereira, 2016).

As ondas são movimentos oscilatórios (fig. 2), cuja amplitude, altura e comprimento, dependem da intensidade, do rumo e da turbulência do vento e da interferência com o fundo do mar.

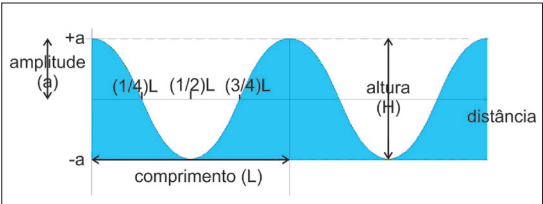
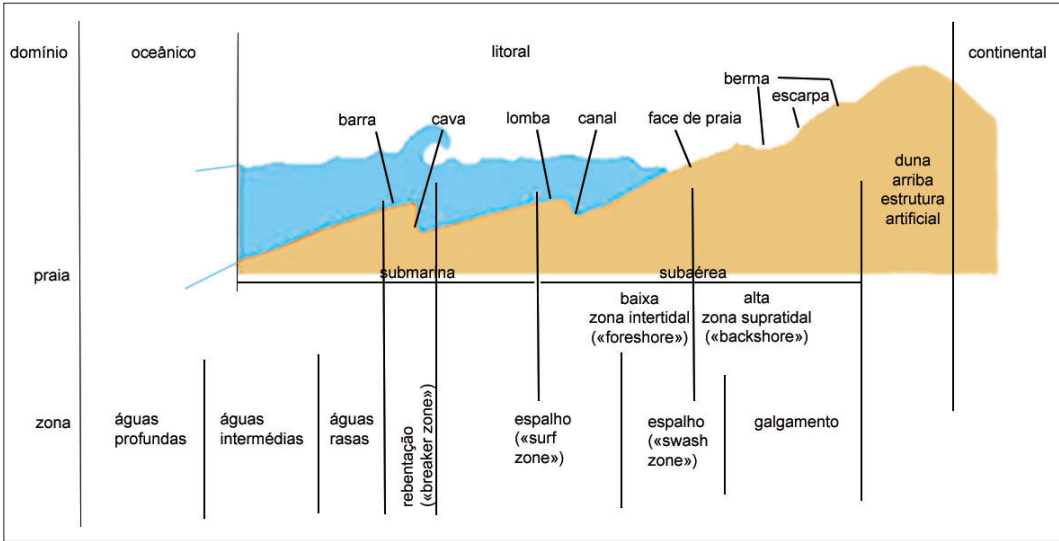


Fig. 2 - Esquema de onda sinusoidal
(Fonte: Adaptado de The Oceanography Course Team, 2006).

Fig. 2 - Sine wave diagram
(Source: Adapted from The Oceanography Course Team, 2006).

Entende-se por: amplitude ($|a|$), a metade da altura da onda sinusoidal, em metros; a altura (H), a distância vertical entre a crista e a cava, em metros; e comprimento (L), a distância horizontal entre dois pontos homólogos consecutivos (duas cavas ou duas cristas), em metros.



À medida que a onda se aproxima da costa, diminui a profundidade, e a onda altera a sua forma até que colapsa. A observação visual da forma como a onda rebenta (designada por onda de rebentação) sugere uma determinada inclinação geral do fundo (batimetria) do domínio litoral de menor profundidade, desde a zona de rebentação (*breaker zone*) até à zona de espraio (*swash zone*) (Silva, 2010) (fig. 3)

Se a onda rebenta gradualmente, designada por onda derrame ou progressiva (*spilling* em inglês), a inclinação do fundo da praia é baixa. Se a onda ao aproximar-se da costa, quebra violentamente formando um tubo, dissipando a sua energia sobre uma pequena porção do perfil, através de um vórtice de alta turbulência, designa-se por onda mergulhante, e ocorre numa inclinação da praia de baixa a intermédia. Se a onda for de difícil identificação e estiver entre o tipo mergulhante e o ondulante, designa-se por onda tipo colapsante (*collapsing breaker*), e ocorre em praias de intermédio a alto declive. Se a onda não chegar a rebentar, simplesmente ascende sobre a face de praia e interage com o refluxo das ondas anteriores, designa-se por onda tipo ondulante ou de fundo (*surging breaker*), e ocorre em praias de declive muito alto (Silva, 2010).

Conhecer a batimetria do litoral, ou seja, conhecer o fundo do mar na zona mais energética do mar (entre a zona das águas rasas à zona do máximo espraio) permite obter vários parâmetros oceânicos, tais como: profundidade da água, altura da onda e velocidade da onda. A monitorização diária facilitará, ao fim de algum tempo, perceber como a areia se move ao longo do dia, das marés, das condições climáticas, da estação e das fases da lua. Com isto conseguirá perceber onde se encontram as correntes, as valas e as elevações; e consequentemente, definir zonas propícias a banhos e alertar para locais perigosos, os quais nunca serão fixos. Também, conhecer o avanço e recuo da linha de praia em relação a um ponto de referência, para salvaguarda de bens e de planeamento do ordenamento do território.

No entanto, os métodos de estudo hidrodinâmico das ondas e de batimetria são difíceis de serem efectuados no domínio litoral de menor profundidade, desde a zona de rebentação (*breaker zone*) à zona de espraio (*swash zone*), devido ser uma área de alta energia das ondas, na qual perdem-se e/ou destroem-se os equipamentos usados (fig. 4).

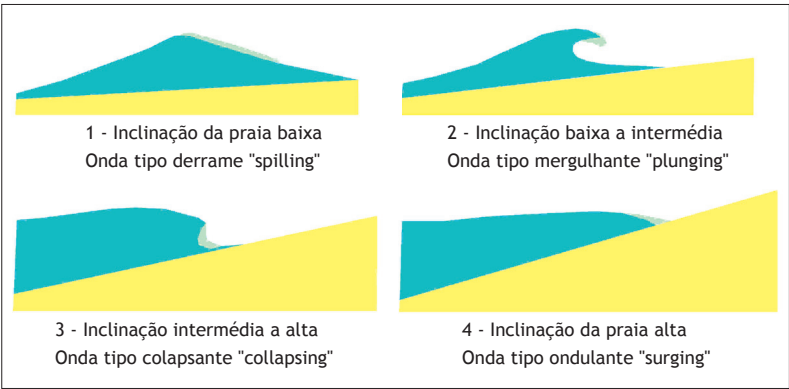


Fig. 3 - Tipos de rebentação das ondas, em secção de corte (Fonte: Adaptado de The Oceanography Course Team, 2006).

Fig. 3 - Types of wave-breaking (cross section) (Source: Adapted from The Oceanography Course Team, 2006).



Fig. 4 - Métodos de estudo hidrodinâmico das ondas: a) medição da onda a olho nú; b) transdutores de pressão montados em trenós bentónicos; c) bóias; d) câmaras de vídeo (Fonte: Imagens Google, 2022; Andriolo, 2018).

Fig. 4 - Hydrodynamic wave study methods: a) wave measurement with the naked eye; b) benthic sleds; c) buoys; d) video cameras (Source: Google Images, 2022; Andriolo, 2018).

Esses métodos usados para determinar a batimetria são: ou pouco rigorosos (medição da onda a olho nú) (fig. 4 a), ou mais rigorosos mas dispendiosos (uso transdutores de pressão) (fig. 4 b) ou práticos a longo prazo, mas complicados (uso de bóias de praia) (fig. 4 c) (Gal *et al.*, 2011).

Recentemente, optou-se adaptar as câmaras de vídeo de monitorização das praias (fig. 4 d) usadas pelos surfistas para o estudo de batimetria da zona mais energética da praia. As razões foram: obtenção de dados contínuos e temporais, pouco dispendioso, praticamente sem dificuldade e de alta resolução (Andriolo, *et al.*, 2016).

O artigo pretende revelar a importância da continuação de uma investigação de 8 meses (1 de Outubro de 2019 até 31 de Maio de 2020), realizada no Departamento da Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), financiado pela Fundação Ciências (FCiencias) e pela Fundação de Ciência e Tecnologia (FCT), do Projecto “To-SEAlert - Galgamento e inundação em zonas costeiras e portuárias: Ferramentas para um sistema de previsão e alerta, planeamento de emergência e de gestão do risco”, ref.^a PTDC/EAM-OCE/31207/2017. O trabalho consistiu em definir um programa no *software Matlab*, para duas praias com vídeos: Praia da Nazaré Norte e Praia Tarquinio-Paraíso da Costa da Caparica. E definir, com base nos dois exemplos fornecidos, qual seria a melhor posição/orientação da câmara de vídeo.

Metodologia

O Método de determinação dos parâmetros das ondas e da batimetria do domínio litoral entre a zona de águas rasas (*shoaling zone*) e a praia usando os vídeos de monitorização de praia, consistiu numa sequência de tarefas (fig. 5).



Fig. 5 - Resumo do procedimento de obtenção da batimetria a partir dos vídeos de monitorização da praia (Fonte: Carocha, 2020).

Fig.5 - Summary of the procedure for obtaining bathymetry from the beach monitoring videos (Source: Carocha, 2020).

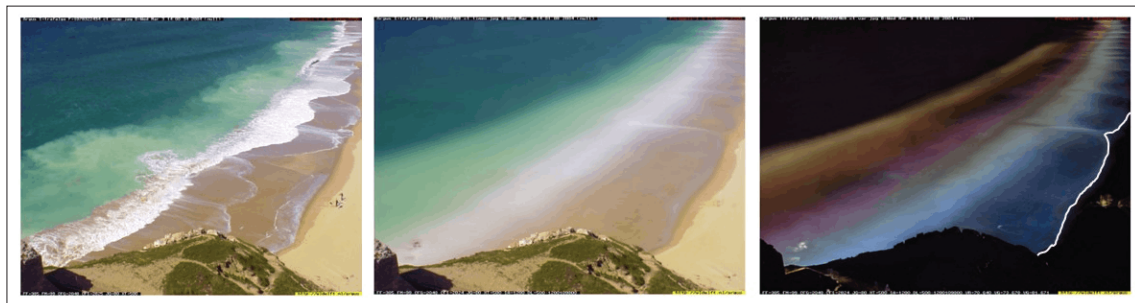


Fig. 6 - Imagens de: a) Snapshot, b) Timex e c) Variância (Fonte: Fachin *et al.*, 2006).

Fig. 6 - Images from: a) Snapshot, b) Timex, and c) Variance (Source: Fachin *et al.*, 2006).

A entrega dos vídeos da praia vêm acompanhados das seguintes informações: data e hora de realização, tipo de câmara, a sua localização em coordenadas (x,y,z) e o sistema de coordenadas utilizado. Os vídeos são transformados em fotografias usando a aplicação *Vídeo to Picture Image Converter*. As fotografias resultantes serão ordenadas por dia e hora e agrupadas em 10 minutos através do programa *Cosmos*, obtendo-se para cada grupo: imagens *snapshot*, *timex* e de variância (fig. 6).

Imagem *Snapshot* ou imagem instantânea é uma imagem semelhante à fotografia instantânea. Serve somente para caracterização geral e simples. Imagem *Timex* ou imagem temporal é o resultado da média das diversas imagens instantâneas adquiridas num determinado intervalo de tempo (no caso deste trabalho realizado foi de 10 minutos). Permite visualizar as variações naturais de rebentação das ondas (área branca da imagem), a linha de costa (entre a zona branca e a zona escura), as zonas de barras submersas e os canais de retorno submersos. A imagem de Variância ou de *Sigma* é uma imagem correspondente à variação da intensidade da luz que dá origem à imagem *Timex*. As zonas que mudam ao longo do tempo [zona de rebentação (*breaker zone*) e de espraio (*swash zone*)] aparecem brilhantes e a praia e a areia aparecem escuras. A diferença entre a areia escura e a parte brilhante da zona de espraio, define a linha de costa [linha branca assinalada na fig. 6 c)] (Fachin *et al.*, 2006).

Estas imagens serão geo-referenciadas com o auxílio do programa *Rectify Extreme Tool* e dos dados fornecidos sobre a câmara de vídeo. Obtendo-se uma imagem rectificada para cada grupo de 10 minutos.

A imagem rectificada vai ser utilizada para gerar imagens *timestacks* (ou imagem de armazenamento contínuo) por intermédio de dois programas computacionais: *ArcMap*

(sistema de informação geográfica) onde se desenha os segmentos de recta e retira-se as suas coordenadas, e *Matlab* (linguagem de programação orientada para cálculos científicos de Eng. e de Matemática, usando matrizes, para a construção e análise de imagens, gráficos, sistemas e simulações), onde se elabora uma lista de comandos (o *script*) para a determinação das distâncias das diferentes elevações da onda até à costa (fig. 7).

A Imagem *timestack* revela os acontecimentos ao longo do tempo num mesmo local, portanto, é composta por séries temporais de intensidade de pixel, representantes de uma área de imagem num intervalo de tempo entre a aquisição da imagem i e $i+1$ (a frequência de aquisição constante depende do relógio interno da câmara de vídeo que capta as imagens). Na figura 7, a imagem *timestack* revela faixa clara e faixa escura, que significa praia húmida e seca, respectivamente. A faixa mais esbranquiçada representa a zona de espalho (*surf zone*). A intensidade da claridade indica a diminuição da rebentação da onda, correspondendo, assim, à área em que a energia está dissipando (Sánchez, 2014).

No *ArcMap*, desenha-se segmentos de recta paralelos sobre a fotografia georeferenciada nos locais que permita estudar a evolução da superfície do mar. Cada segmento de recta irá gerar um *timestack*. Regista-se as coordenadas das extremidades desses segmentos de recta, dos vértices da fotografia e de outros pontos da fotografia que se mantém constantes (exemplos: muros de alvaneria, limites das casas, estradas), numa folha *excel*, e exporta-se a imagem georreferenciada com os segmentos de recta desenhados, como imagem *jpg*.

No *software Matlab*, importa-se a imagem *jpg* e o ficheiro *excel* para serem usadas na elaboração do *script*, lista de

comandos que permitem produzir a imagem *timestack*. O *script* é repetido tantas vezes quantos os números de segmentos de recta, agora designados por vectores, existirem na imagem *jpg*. Depois do *script* correr obtém-se a imagem *timestack* para cada vector, a qual será analisada para obtenção de posições e de parâmetros (fig. 8).

A partir da imagem *timestack* construída de um determinado vector, através dos contrastes claro/escuro dos pixels, determina-se as distâncias das diferentes elevações da onda à costa, ou seja, as posições:

- $XH_{\max}$ - ponto mais afastado da costa detectado (primeiro ponto detectado). É a primeira ocorrência do ponto de rebentação (onda de rebentação mais alta). Localiza a fronteira entre as águas rasas (*shoaling zone*) e a zona de espalho (*surf zone*);
- XH_s - é a média dos 33% mais distantes da costa;
- $XH_{1/3}$ - corresponde a 33% de todas as posições que as ondas rebentam;
- XH_m - é a média das 100% de todas as posições que as ondas rebentam;
- $XH_{2/3}$ - corresponde a 67% de todas as posições que as ondas rebentam;
- $XH_{\min}$ - ponto mais perto da costa detectado (último ponto detectado). É o ponto da onda de rebentação mais baixa. Localiza a posição entre as zonas de espalho (*surf zone*) externa e interna;
- $XSw_{\min}$ - é a posição máxima de espraio (*swash*) ou o valor máximo da distância da onda de aceleração (*runup wave*);
- $XSw_{\max}$ - é a posição mínima de espraio (*swash*) ou o valor mínimo da distância da onda de aceleração (*runup wave*). É o último ponto branco (Andriolo, 2018).

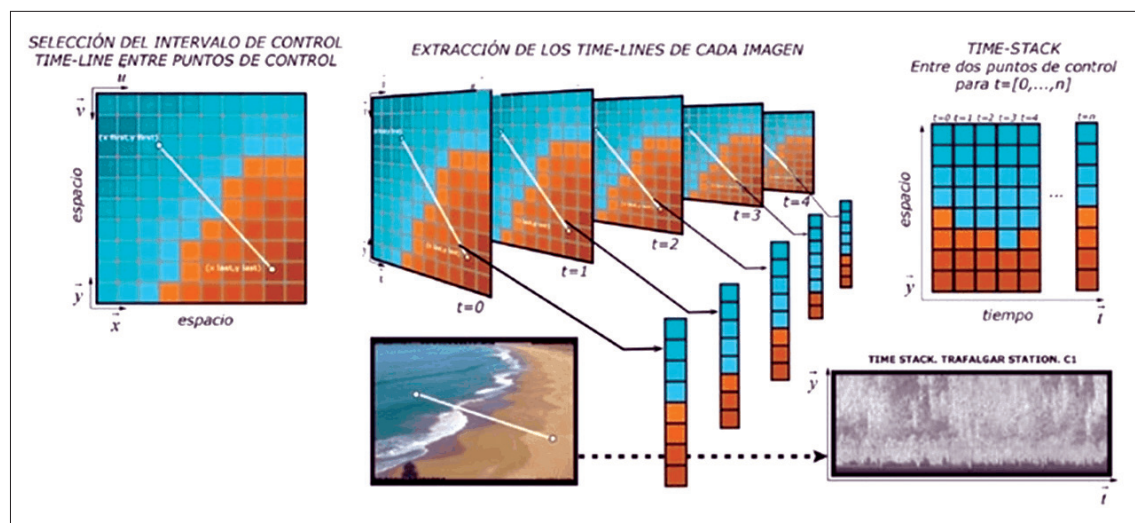


Fig. 7 - Sequência de aquisição de um «timestack» (Fonte: Sánchez, 2014).

Fig. 7 - Timestack acquisition sequence (Source: Sánchez, 2014).

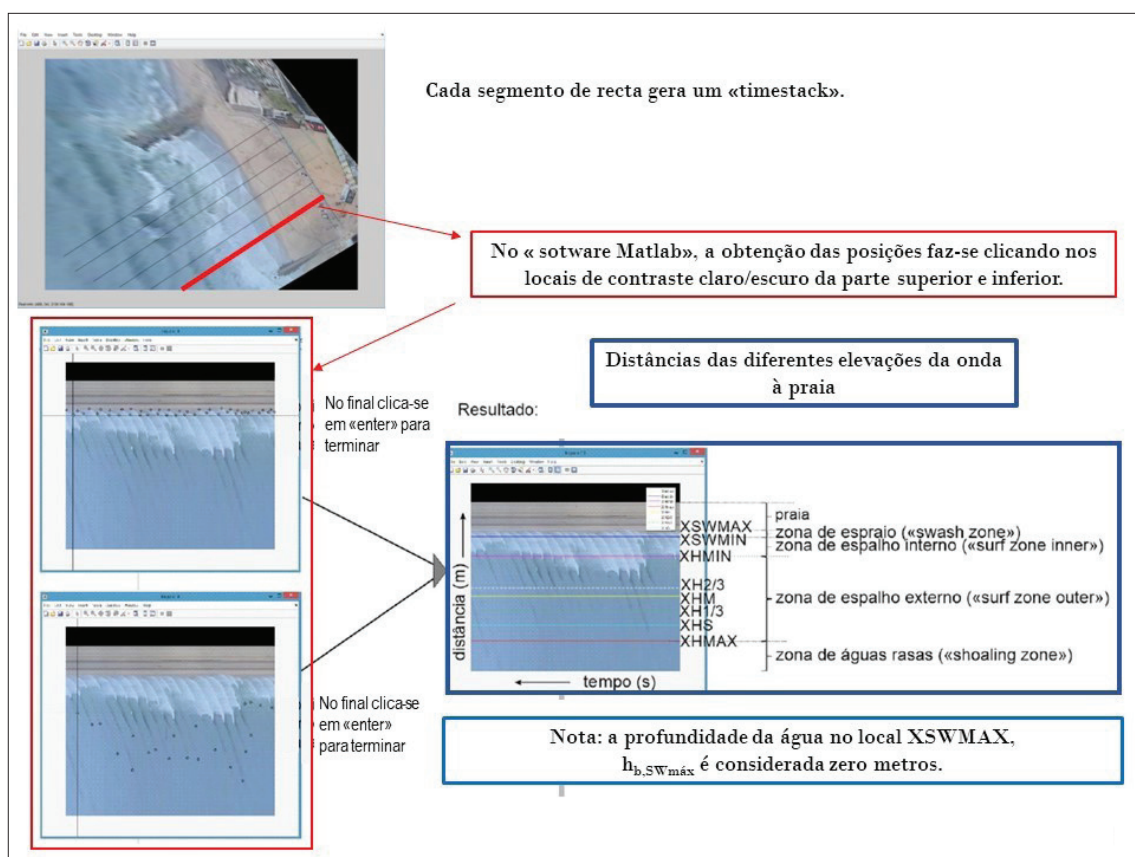


Fig. 8 - Exemplificação da extração de pontos para determinação das posições das diferentes alturas de onda numa «timestack» (Fonte: Carøa, 2020).

Fig. 8 - Illustration of point extraction to determine the positions of different wave heights in a timestack (Source: Carøa, 2020).

A obtenção destas posições é feita através do comando *ginput* no *Matlab*, clicando na imagem *timestack* nos locais de contraste claro/escuro superiores da imagem e depois repete-se para a parte inferior de contrastes da mesma imagem.

A obtenção das posições permite determinar outros parâmetros:

- padrão de rebentação da onda (LH_s) em (m);
- altura da onda de rebentação (HS_b) em (m);
- profundidade da água no local de XH_{max} , ($h_{b,Hmax}$) em (m);
- profundidade da água no local de rebentação XH_s , ($h_{b,HS}$) em (m);
- profundidade da água no local de $XH_{1/3}$, ($h_{b,H1/3}$) em (m);
- profundidade da água no local de XH_m , ($h_{b,Hm}$) em (m);
- profundidade da água no local de $XH_{2/3}$, ($h_{b,H2/3}$) em (m);
- profundidade da água no local de XH_{min} , ($h_{b,Hmin}$) em (m);
- profundidade da água no local de XSW_{min} , ($h_{b,SWmin}$) em (m);
- declive de praia (m_{HS});
- média do período de cada onda (T_m) em (s);
- celeridade (velocidade) média da zona de rebentação (c_b) em (m/s);
- comprimento da onda (L) em (m);
- n.º de ondas (K);
- frequência angular (σ) em (s^{-1});
- profundidade da água entre as águas profundas e intermédias (D_p) em (m);
- distância das águas profundas à costa (d_p) em (m);
- profundidade entre as águas intermédias e rasas (D_r) em (m);
- distância das águas rasas à costa (d_r) em (m).

Observação: a profundidade da água no local de XSW_{max} , ($h_{b,SWmax}$) é considerada ser zero metros.

Juntando os dados obtidos para cada *timestack*, e transformados em coordenadas, consegue-se determinar a batimetria para o momento da fotografia rectificada na qual desenhou-se os segmentos de recta. É nesta altura que se usa as coordenadas retiradas no *software ArcMap* e acrescenta-se o valor da profundidade, transformando, no Excel, numa tabela (x,y,z) para cada posição de todos

os *timestacks* produzidos para essa praia e hora. No *software Matlab*, importa-se esta tabela (x,y,z), cria-se um «script» para a praia em estudo e, por intermédio de alguns gráficos do *Matlab*:

- *plot3* - gráfico tridimensional de linhas ou de pontos;
- *stem3* - gráfico tridimensional dos valores de z na posição x (gráfico de linhas verticais com origem no eixo horizontal e terminadas com pequenos círculos);
- *surf* - gráfico tridimensional de superfície colorida;
- *surfc* - gráfico tridimensional de superfície com as curvas de nível (contornos) directamente abaixo às respectivas superfícies, ou seja, no plano xy;
- *contour3* - gráfico tridimensional de curvas de nível (contornos) de uma superfície;
- *contourf* - gráfico tridimensional de curvas de nível (contornos) preenchidas com cor;
- *surf1* - gráfico tridimensional de superfície colorida de forma suave resultante da projecção de uma fonte de luz com determinado ângulo (Mendonça, 2014; Hanselman, D. and Littlefield, B., 1997).

obtêm-se mapas com a localização de todas as posições obtidas e a batimetria, dessa praia, na data e horas estudadas, desde sensivelmente o limite da zona das águas rasas ao máximo espraio (*swash*). A batimetria, também pode ser feita usando a mesma tabela em *MS-DOS* no programa *ArcMap*.

Praias para teste

As praias que serviram de teste para a elaboração batimetria através de um programa construído no *software Matlab*, com base nos vídeos de vigilância das praias foram a Praia de Nazaré Norte e a Praia Tarquínio - Paraíso da Costa da Caparica (fig. 9).

Os dados fornecidos para a realização do trabalho foram os seguintes: (TABELA I).

TABELA I - Dados fornecidos das praias em estudo.
TABLE I - Data provided from the beaches under study.

Praia	Nazaré Norte	Tarquínio-Paraíso
Data das fotografias	29-08-2014	4 e 11 de Outubro de 2019
Câmara de vídeo	ExtOrient_v.xml	Vivotek_Caparica_In.Situ
Coordenadas da Câmara de vídeo	XL = 118216.750419945; YL = 293349.697733895; ZL = 48.2280649521923; Ómega = 80.9669504; Phi = 172.2513790; Kappa = 2.5845826	XL = -96058.82284; YL = -113429.0542; ZL = 40.53416; Ómega = 229.5348; Phi = -76.3184; Kappa = 134.4023
Coordenadas do Sistema	ETRS_1989_Portugal_TM06	ETRS_1989_Portugal_TM06
Levantamento topográfico	Não	Sim



Fig. 9 - Localização e vista superior das praias testadas com indicação do local e orientação da câmara de vídeo (Fonte dos dados: Google Map, 2022).

Fig. 9 - Location and view from above of tested beaches with location indication and video camera orientation (Data source: Google Map, 2022).

Na praia da Nazaré Norte, a câmara de vídeo, localizada a sudeste da praia, estava montada a uma altura de cerca de 48 m e virada para NNW. Na Praia Tarquínio - Paraíso, a câmara de vídeo localizada frente ao molho sul desta praia, estava montada a uma altura de cerca de 40 m e com visão para NW, aproximadamente.

Procurou-se conhecer a tabela de marés para cada praia nos dias dos dados dos vídeos fornecidos (TABELA II)

Resultados

Ao analisar os vídeos obteve-se vários grupos de 10 minutos de fotografias, em cada praia, dos quais escolheram-se alguns para o teste. Para a Praia da Nazaré, escolheu-se dois grupos do dia 29/08/2014, das 07:50 (com 600 fotografias) e das 07:00 (com 599

fotografias). Para a Praia Tarquínio-Paraíso escolheu-se vários grupos de 10 minutos, não seguidos, de dois dias 04/10/2019 e 11/10/2019 (com 1200 fotografias).

Os dados topográficos da Praia Tarquínio - Paraíso permitiram em junção com os dados das marés analisar se existiriam grandes diferenças na linha de praia na baixa-mar e alta-mar (fig. 10).

A linha azul no desenho representa a linha de praia naquele dia e hora (fig. 11). A linha a tracejado de cor castanha, no mesmo desenho, representa a linha entre a areia húmida e seca. Verifica-se que esta linha praticamente não muda nos dois dias e nas diferentes marés.

As fotografias rectificadas dos grupos de 10 minutos de fotografias foram analisadas para a determinação da batimetria (fig. 11).

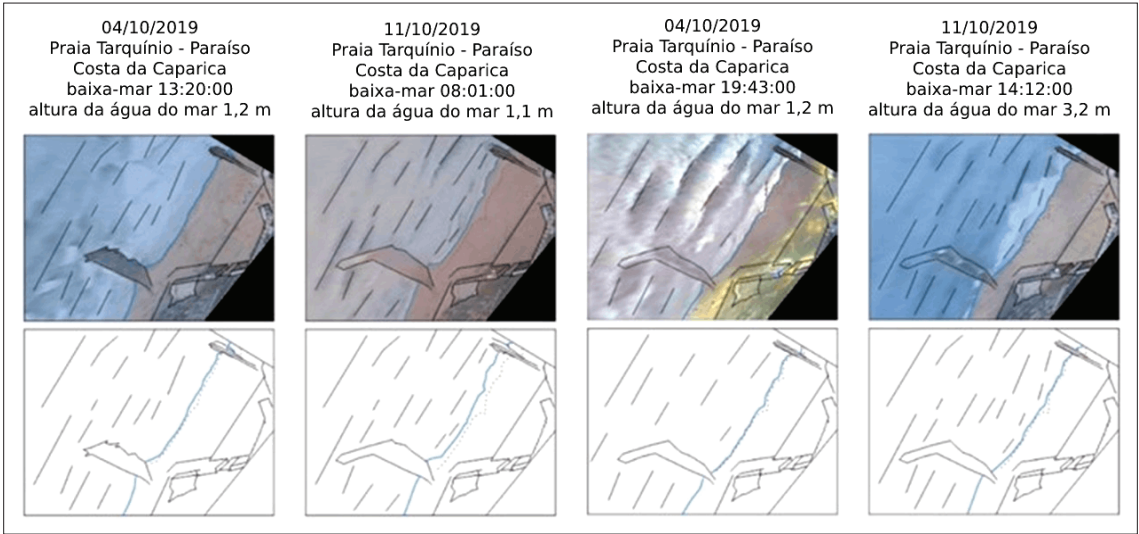


Fig. 10 - Marés da Praia Tarquínio - Paraíso (Fotografia com sobreposição de linhas de cristas de ondas, linha do mar presente a cheio, linha do mar anterior a tracejado, limites de muros, de imóveis e de molhes) (Fonte: Caroça, 2020).

Fig. 10 - Tides on Praia do Tarquínio-Paraíso (Photograph with overlapping lines of wave crests, current sea line in full, previous sea line in dashed lines, limits of walls, buildings and jetties) (Source: Caroça, 2020).

TABELA II - Marés: Praia da Nazaré Norte, através da bóia de Peniche; Praia Tarquínio - Paraíso, através da bóia de Cascais.
TABLE II - Tides: Praia da Nazaré Norte, through the Peniche buoy; Praia do Tarquínio-Paraíso, through the Cascais buoy.

Praia Nazaré Norte			
Data	Hora	Altitude (m)	Fenómeno
29/08/2014	05:30	3,2	Preia-mar
	11:30	0,8	Baixa-mar
	17:43	3,3	Preia-mar
	23:53	0,8	Baixa-mar

Praia Tarquínio-Paraíso			
Data	Hora	Altitude (m)	Fenómeno
04/10/2019	07:09	3,1	Preia-mar
	13:20	1,2	Baixa-mar
	19:43	2,8	Preia-mar
11/10/2019	02:03	3	Preia-mar
	08:01	1,1	Baixa-mar
	14:12	3,2	Preia-mar
	20:22	0,9	Baixa-mar

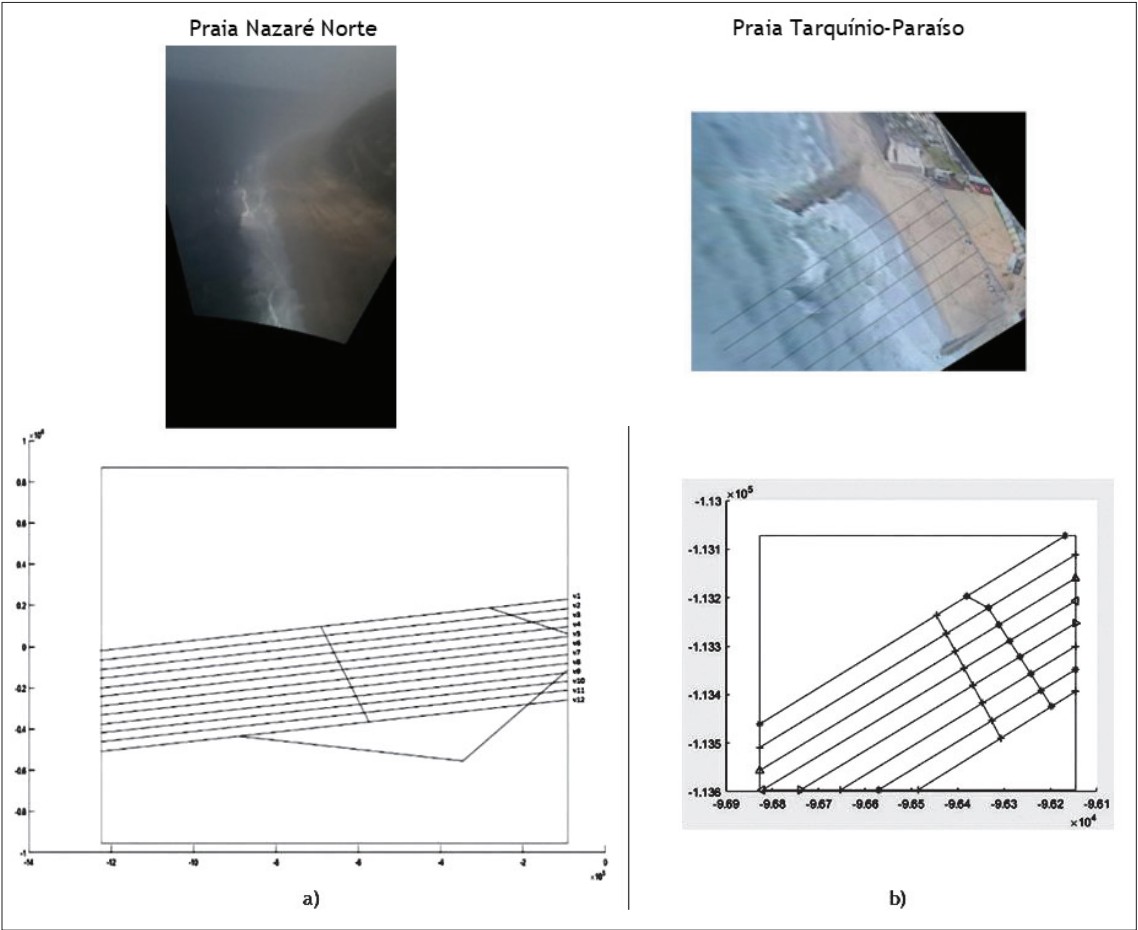


Fig. 11 - Fotografia rectificada e vectores da praia: a) Nazaré Norte, b) Tarquínio - Paraíso (Fonte: Caroça, 2020).

Fig. 11 - Rectified photo and beach vectors: a) Nazaré Norte, b) Tarquínio-Paraíso (Source: Caroça, 2020).

Para a Praia Nazaré Norte escolheu-se doze segmentos de recta e para a Praia Tarquínio - Paraíso oito segmentos de recta sensivelmente perpendiculares às ondas, que serão os vectores no *software Matlab*. Os vectores (v_i) são numerados por ordem crescente de norte para sul da praia.

Não se irá descrever os *scripts*, apenas colocar-se-á alguns exemplos dos resultados obtidos dos diferentes modelos de gráficos do *software Matlab* indicados no capítulo «Metodologia».

Praia da Nazaré Norte

No capítulo da Metodologia referiu-se vários gráficos do *software Matlab*. No entanto, apenas se mostra para os gráficos com melhor resolução. Deste modo, o resultado para a Praia da Nazaré Norte: (TABELA III).

Aplicando o resultado dos parâmetros determinados no *software Matlab* no *software ArcMap*, os dados permitiram construir uma batimetria para o dia 29/08/2014 (fig. 12).

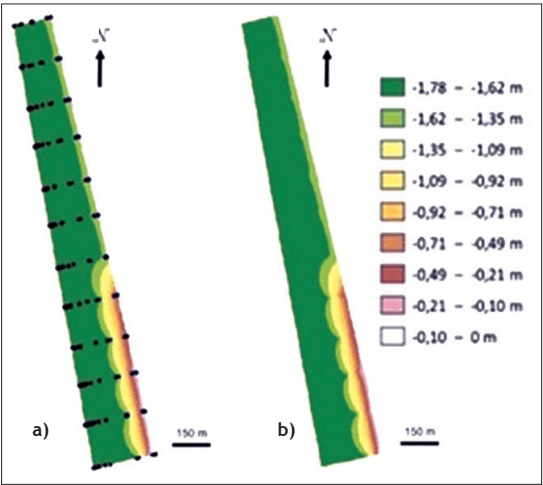


Fig. 12 - Batimetria da praia da Nazaré Norte, 29/08/2014, obtida do «ArcMap»: a) com os pontos das posições determinadas; b) só batimetria (Fonte: Caroça, 2020).

Fig. 12 - Bathymetry of the Praia da Nazaré Norte, 29/08/2014, obtained from ArcMap: a) with the points of the determined positions; b) only bathymetry (Source: Caroça, 2020).

TABELA III - Resultado dos gráficos do software Matlab da Praia da Nazaré Norte.

TABLE III - Result of the Matlab graphics from Praia da Nazaré Norte.

Praia	Nazaré Norte	
Horas	7:00	7:50
Plot e Plot3		
Contourf e surf		
Surfl		
Surfc		

Praia Tarquínio - Paraíso

Os dados dos dias 04/10/2019 e 11/10/2019, da Praia Tarquínio - Paraíso, foram todos analisados, mas para não sobrecarregar escolhe-se mostrar os gráficos do dia 04/10/2019, na hora de 12:59, e nas sequências de fotos 5700 até 6899, das 13:18:41 até 13:22:41; e de fotos 6900 até 8090, das 13:22:41 até 13:26:41, por visualizar-se melhor a diferença da batimetria (TABELA IV).

Os gráficos resultantes dos comandos «contour3» e «stem3» foram pouco perceptíveis, daí não serem apresentados no artigo.

Aplicando o resultado dos parâmetros determinados no software Matlab e no software ArcMap, os dados permitiram construir uma batimetria para os dias 04/10/2019 (fig. 13) e 11/10/2019 (fig. 14).

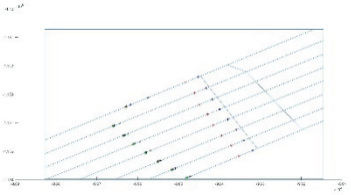
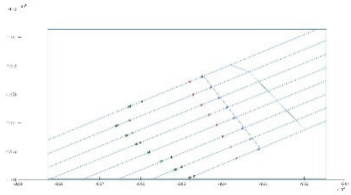
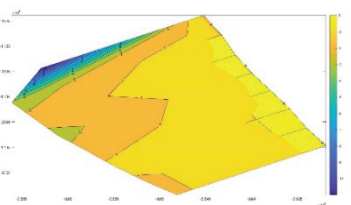
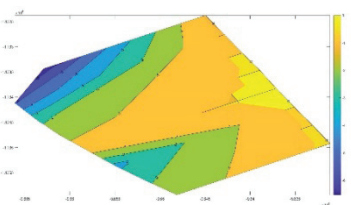
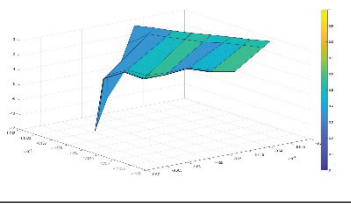
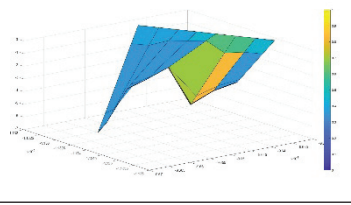
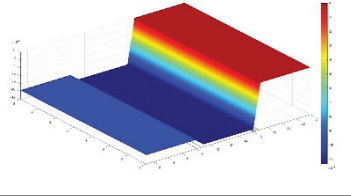
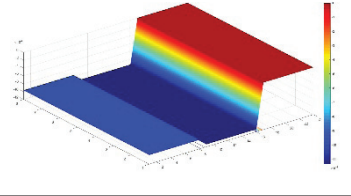
Discussão

Os dados da Praia da Nazaré Norte apenas permitiram a produção de um mapa batimétrico (fig. 12) através do grupo de 10 minutos de fotografias completo (600 fotografias). Devido à posição da câmara de vídeo ser muito distante e alta, esse mapa é uma faixa estreita

com apenas alguma informação na parte sul (vectores v8 a v12), mais próximo da câmara de vídeo. Durante o intervalo entre 07:00 e 07:50 horas (50 minutos), na preia-mar, verificou-se que os valores referentes aos parâmetros determinados diminuíram sensivelmente, com excepção das posições do declive da praia (mudou de cerca de 0,07 para 0,08) e da altura da onda (HSb) (mudou de cerca de 0,43 m para cerca de 0,39 m). Observando os gráficos *contourf* e *surf* da TABELA III, a batimetria teve uma evolução de profundidade quase paralela à praia. Através dos gráficos *surfc* e *surfl* da TABELA IV, observa-se ainda uma pequena elevação a cerca de 20 m distante da linha de praia, paralela e perpendicular (respectivamente) à linha de praia no vector v8, que ao fim de 50 minutos se desloca ligeiramente para o vector v9. Isto poderá sugerir a presença de uma barra de areia em movimento para Norte.

Os dados da Praia Tarquínio - Paraíso utilizados foram os grupos de 10 minutos de fotografia relativos ao levantamento topográfico subaéreo (4 e 11 de Outubro de 2019) coincidentes com as horas de baixa-mar e de preia-mar. Os resultados dos vários *scripts* permitiram observar diferenças entre as duas datas. Verificou-se que: os valores das posições da zona de espraio (Sw_{min} e Sw_{max}) e as respectivas profundidades da água, em ambas

TABELA IV - Resultado dos gráficos do software Matlab da Praia Tarquínio - Paraíso.
TABLE IV - Result of the Matlab graphics from Praia do Tarquínio-Paraíso.

Praia	Tarquínio - Paraíso	
Horas	12:59	
Sequência de fotos	5700 até 6899	6900 até 8090
Intervalo de 10 minutos	13:18:41 até 13:22:41	13:22:41 até 13:26:41
Plot e Plot3		
Contourf e surf		
Surfl		
Surfc		

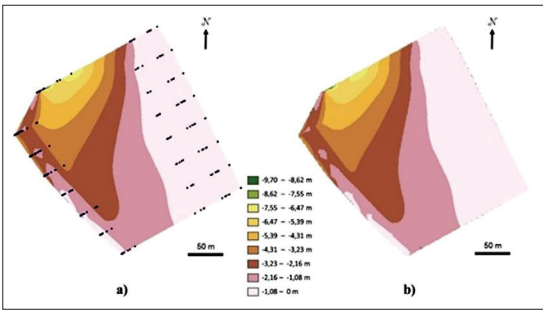


Fig. 13 - Bathymetry of the Praia do Tarquínio-Paraíso, 04/10/2019, obtained from ArcMap: a) with the points of the determined positions; b) only bathymetry (Fonte: Caroça, 2020).

Fig. 13 - Bathymetry of Praia do Tarquínio-Paraíso, 04/10/2019, obtained from ArcMap: a) with the points of the determined positions; b) only bathymetry (Source: Caroça, 2020).

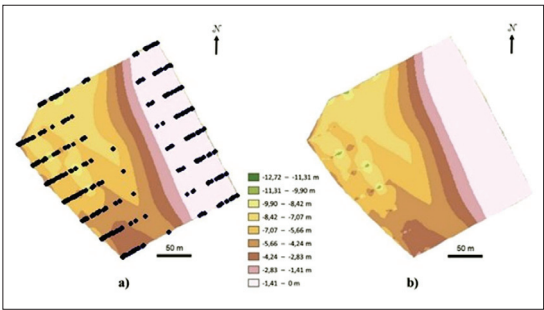


Fig. 14 - Bathymetry of the Praia do Tarquínio-Paraíso, 11/10/2019, obtained from ArcMap: a) with the points of the determined positions; b) only bathymetry (Fonte: Caroça, 2020).

Fig. 14 - Bathymetry of the Praia do Tarquínio-Paraíso, 11/10/2019, obtained from ArcMap: a) with the points of the determined positions; b) only bathymetry (Source: Caroça, 2020).

datas além de terem sofrido oscilações, a tendência foi a diminuição à medida que se aproximava da hora de preia-mar. Também se verificou que: a velocidade da onda (c_b), a média do período de cada onda (T_m), o comprimento de onda (L), a distância das águas profundas e das águas rasas à costa (d_p e d_r), embora com várias oscilações, aumentaram do início para o final dos grupos de fotografias. No entanto, para o grupo de fotografias analisado da data de 04/10/2019, as respectivas profundidades das águas profundas (D_p) e intermédias a rasas (D_r), diminuíram, e para o grupo da data de 11/10/2019 aumentaram do início para o final dos grupos de fotografias.

Relativamente à altura da onda (HS_b), para o grupo de fotografias analisadas no dia 4 de Outubro de 2019, iniciou com cerca de 1,33 m, passou por um máximo de cerca de 1,64 m durante o terceiro grupo (entre as 14:21:00 e as 14:25:00), e terminou com cerca de 0,35 m de altura. Para o grupo de fotografias de 11 de Outubro de 2019, a altura da onda (HS_b) iniciou com cerca de 2,33 m, passou por um máximo de cerca de 5,44 m durante o sexto grupo (entre as 11:55:00 até 11:59:00) e terminou com cerca de 2,02 m de altura. O declive da praia para o grupo de fotografias analisadas do dia 4 de Outubro de 2019, iniciou, na baixa-mar, com cerca de 0,03 e finalizou com cerca de 0,10, e para o grupo de fotografias analisadas do dia 11 de Outubro de 2019, o declive de praia iniciou na baixa-mar com cerca de

0,01 e finalizou com o mesmo valor. No entanto em três grupos de fotografias (08:03:42 até 08:07:41; 08:25:00 até 08:29:00; 11:25:00 às 11:29:00) atingiu um declive de 0,02.

Observando os gráficos obtidos do *software Matlab* que não estão todos presentes neste artigo para não sobrecarregar, pode-se referir que o gráfico «plot3» confirmou que os dados escolhidos se referem a uma elevação da água do mar (fig. 15).

As posições mínimas de espraio («swash»), Sw_{max} , posicionaram-se antes da linha de referência (linha de praia) (fig.15, a) e b)) e no último grupo de fotografias, ultrapassou esta linha (fig. 15 c e d). Verifica-se que durante o tempo analisado ocorreu recuo e avanço da linha do mar.

Observando os gráficos resultantes dos comandos *contourf* e *surf* (fig. 16) verifica-se uma tendência em ficar paralelos e de forma quase monótona, as faixas de profundidades de água quando se aproxima da hora de maior elevação da água (preia-mar).

Verificou-se, também, que as águas mais profundas (cor azul escura do gráfico) se encontram, maioritariamente, na parte final dos segmentos v0 e v1, próximo do molhe norte.

O gráfico resultante do comando *surf1* fornece uma batimetria a três dimensões, onde se consegue visualizar depressões e elevações (fig. 17).

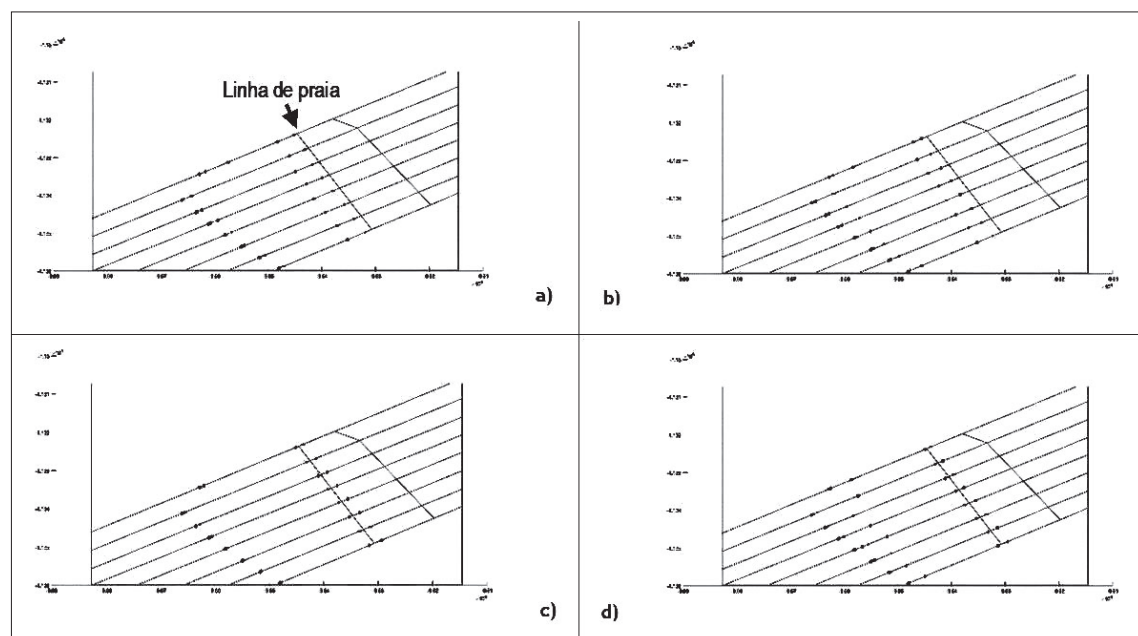


Fig. 15 - Gráfico «Plot3» da Praia Tarquinio - Paraiso: a) 04/10/2019 às 12:59, fotos 5700 até 6899, das 13:18:41 até 13:22:41; b) 11/10/2019 às 07:59 fotos 1 até 1200 das 07:59:42 até 08:03:41; c) 04/10/2019 às 19:29, fotos 3980 até 5179, das 19:42:57 até 19:43:00; d) 11/10/2019 às 13:59 fotos 2601 à 3800 e das 14:08:22 às 14:12:22 (Fonte: Carocha, 2020).

Fig. 15 - Plot3, Graphic of Praia do Tarquinio-Paraiso: a) 10/04/2019 at 12:59, photos 5700 to 6899, from 13:18:41 to 13:22:41; b) 10/11/2019 at 07:59 photos 1 to 1200 from 07:59:42 to 08:03:41; c) 10/04/2019 at 19:29, photos 3980 to 5179, from 19:42:57 to 19:43:00; d) 10/11/2019 at 1:59 pm photos 2601 to 3800 from 2:08:22 pm to 2:12:22 pm (Source: Carocha, 2020).

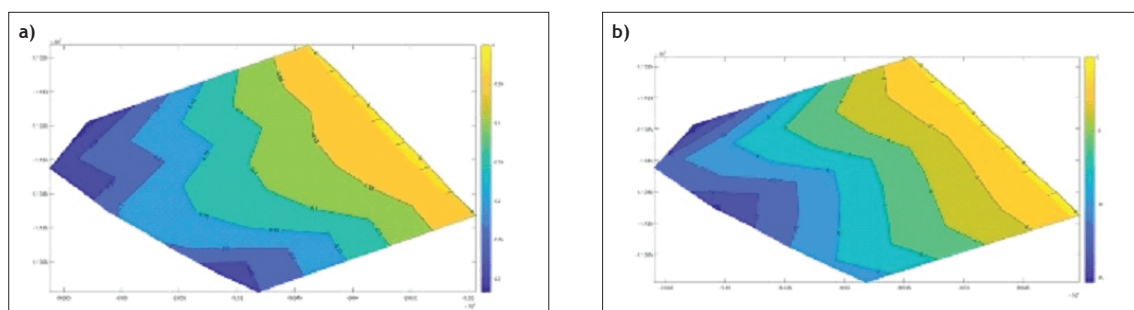


Fig. 16 - Gráfico «contourf» e «surf» da Praia Tarquínio - Paraíso: a) 04/10/2019 às 19:29, fotos 2780 até 3979, das 19:38:57 até 19:42:57; b) 11/10/2019 às 11:29 fotos 7597 até 8796 das 11:55:00 até 11:59:00 (Fonte: Caroça, 2020).

Fig. 16 - Contourf and surf plots of Praia do Tarquínio-Paraíso: a) 04/10/2019 at 19:29, photos 2780 to 3979, from 19:38:57 to 19:42:57; b) 11/10/2019 at 11:29 photos 7597 to 8796 from 11:55:00 to 11:59:00 (Source: Caroça, 2020).

O vector *v3* (fig. 14 b) destacou uma depressão. No entanto, analisando a sequência das figuras resultantes deste comando, verificou-se que a profundidade da água oscila no sentido NW-SE. Assim interpreta-se que não existe barra de areia fixa, mas um movimento de areia que acompanha o movimento da água de SE para NW. Verificou-se, também, que quando se está em baixa-mar, a profundidade da água a sul é menor (tons amarelos) que a profundidade a norte (tons azuis), e vice-versa: em alto mar, a profundidade da água a sul passa a maior do que a do norte. O mesmo se passa com os gráficos resultantes do comando *surf*, (TABELA IV). Estes sugerem, após cerca de 8 m distante da linha de praia, existir uma descida da profundidade para cerca de 11 m, mantendo-se por cerca de 7 m, passando em seguida para uma profundidade de cerca de 10 m até ao final da área de estudo.

Quando se juntam todos os dados obtidos dos grupos de fotografias num só dia, os mesmos gráficos que antes, para cada grupo de fotografia de 10 minutos, permitiram obter informações sobre a batimetria, não revelam o que se pretende. Por este motivo, optou-se, nesta fase final, usar o programa *ArcMap* para a elaboração da batimetria do intervalo de tempo analisado (fig. 13 e 14).

Verificou-se que a maior profundidade da água se encontra próximo do molhe norte da Praia Tarquínio - Paraíso, semelhante ao que se havia referido para a interpretação do gráfico resultante dos comandos *contourf* e *surf*. Cerca de 95 m, no dia 04/10/2019 e cerca de 76 m no dia 11/10/2019, distante da linha de praia, a profundidade da água mantém-se com valores entre 0 m e 1 m e entre 0 m e 1,40 m, respectivamente. A partir desta distância, no dia 11/10/2019, cerca de 62 m em direcção ao mar, a profundidade da água passa para entre cerca de 7 a 10 m, podendo em alguns pontos na parte final NW desta praia, atingir valores até cerca de 12 m. O dia 04/10/2019 apresenta uma batimetria com variação da profundidade da água concentrada no molhe norte da praia e menos regular que a do dia 11/10/2019. A concentração de maiores profundidades de água junto

ao molho norte da Praia, ou seja, menor quantidade de areia, nessa zona, está de acordo com a consequência da presença do molhe. Assim, sendo o movimento da água do mar, no geral, de SE para NW, ao encontrar um obstáculo perpendicular ao mar (molhe), a água erode (retira areia) e coloca a seguir a esse molhe. Esta praia está ladeada por dois molhes. Deste modo, tem-se maior quantidade de areia (menor profundidade da água) após o molhe S e menos areia (maior profundidade de água) antes do molhe N.

O movimento da água do mar origina variação da batimetria. Os gráficos *surf* e *surf* de cada grupo de fotografia dão uma ideia geral da evolução do fundo do litoral e ajudam a compreender a batimetria resultante do *ArcMap*.

Considerações finais

O programa *Matlab* revelou-se útil para se obter, rapidamente (cerca de 20 a 30 minutos), parâmetros oceânicos, coordenadas e batimetrias para cada grupo de fotografias de 10 minutos. Compreende-se os seguintes parâmetros oceânicos: posições, profundidades da água nessas posições, padrão de rebentação da onda, altura da onda de rebentação, comprimento da onda, período da onda, velocidade da onda, número de ondas, frequência angular, declive da praia, distância das águas profundas à costa e sua profundidade, distância das águas rasas à costa e sua profundidade.

Verificou-se que os gráficos do *Matlab* com melhor visibilidade e compreensão são os que usam o comando:

- *plot3* para visualizar o movimento das posições, em especial, da zona de espraio (Sw_{min} e Sw_{max}), ao longo das horas estudadas;
- *contourf* e *surf* para visualizar as manchas de variação de profundidade da água;
- *surf* para visualizar, a três dimensões, a variação perpendicular à praia.

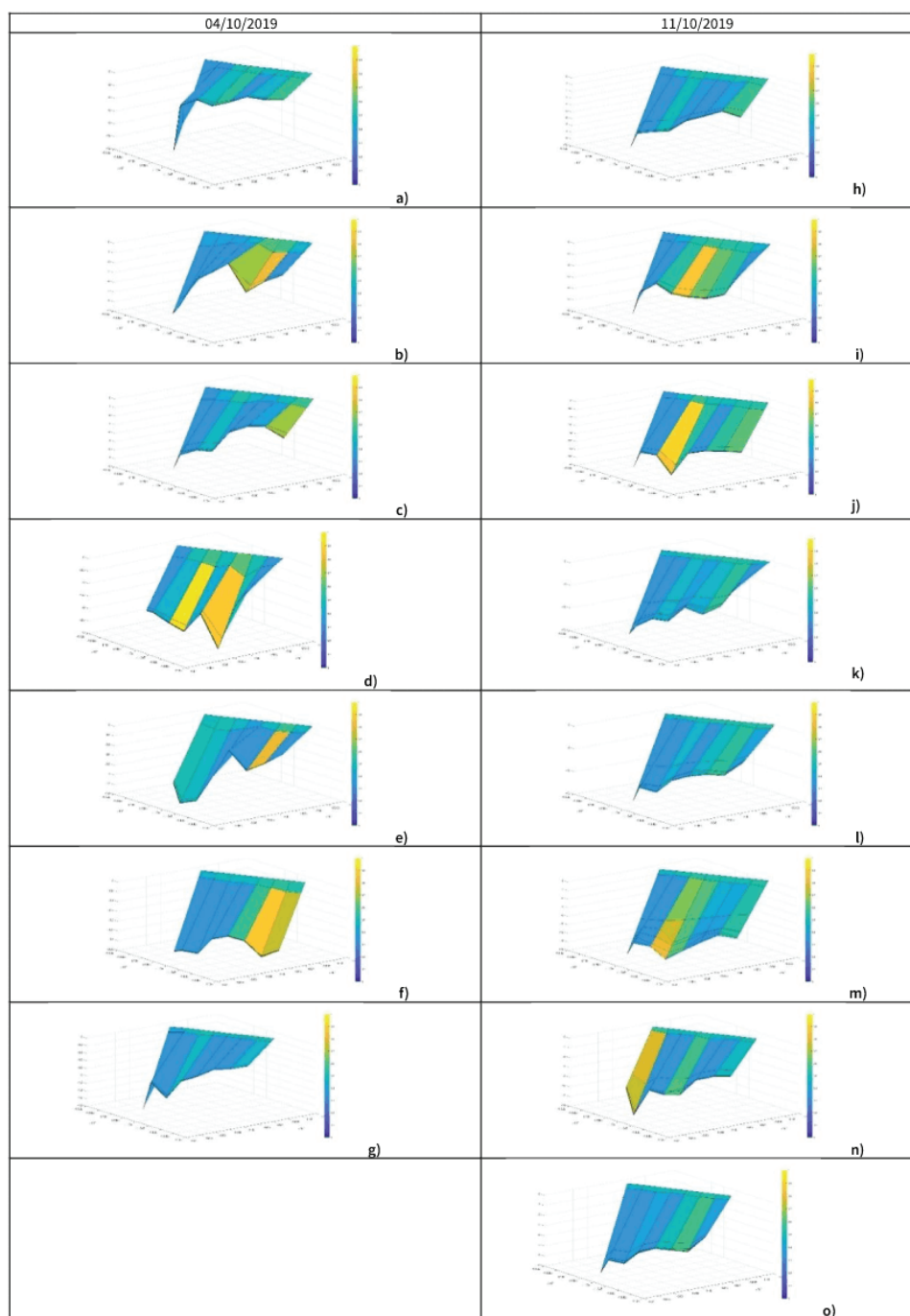


Fig. 17 - Gráfico «Surfl» da Praia Tarquinio - Paraíso: 04/10/2019: a) 12:59, fotos 5700 até 6899, das 13:18:41 até 13:22:41; b) 12:59, fotos 6900 até 8090, das 13:22:41 até 13:26:41; c) 13:59, fotos 6397 até 7596, das 14:21:00 até 14:25:00; d) 13:59, fotos 7597 até 8796, das 14:25:01 até 14:29:00; e) 14:29, fotos 1 até 1200, das 14:29:41 até 14:33:41; f) 19:29, fotos 2780 até 3979, das 19:38:57 até 19:42:57; g) 19:29, fotos 3980 até 5179, das 19:42:57 até 19:43:00; 11/10/2019: h) 07:59 fotos 1 até 1200 das 07:59:42 até 08:03:41; i) 07:59 fotos 1201 a 2400 das 08:03:42 até 08:07:41; j) 07:59, fotos 7594 até 8793, das 08:25:00 até 08:29:00; k) 10:59 fotos 7599 a f8796 das 11:25:00 às 11:29:00; l) 11:29 fotos 1 até 1200 das 11:29:41 até 11:33:41; m) 11:29 fotos 7597 até 8796 das 11:55:00 até 11:59:00; n) 13:59 fotos 2601 à 3800 das 14:08:22 às 14:12:22; o) 13:59 fotos 3801 à 5001 das 14:12:22 às 14:16:22 (Fonte: Caroça, 2020).

Fig. 17 - Surfl plot of Praia do Tarquinio-Paraíso: 04/10/2019: a) 12:59, photos 5700 to 6899, from 13:18:41 to 13:22:41; b) 12:59, photos 6900 to 8090, from 13:22:41 to 13:26:41; c) 13:59, photos 6397 to 7596, from 14:21:00 to 14:25:00; d) 13:59, photos 7597 to 8796, from 14:25:01 to 14:29:00; e) 14:29, photos 1 to 1200, from 14:29:41 to 14:33:41; f) 19:29, photos 2780 to 3979, from 19:38:57 to 19:42:57; g) 19:29, photos 3980 to 5179, from 19:42:57 to 19:43:00; 11/10/2019: h) 07:59, photos 1 to 1200 from 07:59:42 to 08:03:41; i) 07:59, photos 1201 to 2400 from 08:03:42 to 08:07:41; j) 07:59, photos 7594 to 8793 from 08:25:00 to 08:29:00; k) 10:59, photos 7599 to f8796 from 11:25:00 to 11:29:00; l) 11:29, photos 1 to 1200 from 11:29:41 to 11:33:41; m) 11:29, photos 7597 to 8796 from 11:55:00 to 11:59:00; n) 13:59, photos 2601 to 3800 from 14:08:22 to 14:12:22; o) 13:59, photos 3801 to 5001 from 14:12:22 to 14:16:22 (Source: Caroça, 2020).

Estes gráficos permitem detectar o avanço e o recuo do mar, a presença de barras de areia, canais e/ou fundões.

Num trabalho real, e para obter-se um melhor conhecimento da evolução da praia ao longo do dia e a diferentes situações, será necessário que os grupos de 10 minutos de fotografias sejam de horas seguidas, ao longo do dia, nas diferentes fases de maré, e nos vários dias seguidos em diferentes estados de clima e de estações do ano. Também que as câmaras de vídeos estejam posicionadas perto da praia, a apontar para as praias submarina e subaérea baixa, cujo poste esteja colocado à cota da praia ou próximo desta, sendo as coordenadas e o sistema de coordenadas entregue a quem for elaborar o programa para a determinada praia. Cada praia tem o seu «script», bem como para cada segmento de recta escolhido nessa praia. Quantos mais segmentos de recta estiver a praia, melhor o resultado da batimetria.

O método apresentado revelou ser útil. No entanto, é necessário usar vários softwares: *Video to picture Image Converter*, *Cosmos*, *Rectify Extreme Tool*, *ArcMap*, *Matlab*, outros (*Excel*, *MS-DOS*, *desenho*). Isto poderá ser um entrave para ser aplicado nas entidades público-privadas, apesar de, o pessoal trabalhador na entidade, com formação, só teria de fazer os passos de formar grupos de 10 fotografias, aplicar nos softwares *ArcMap* e *Matlab* e interpretar o resultado final. Os segmentos de recta e os *scripts* estariam feitos para a praia em estudo.

Este estudo pretende auxiliar na segurança da praia, nomeadamente evitar afogamentos e desaparecimentos no mar, pois não basta a praia apresentar água limpa e/ou com qualidade físico-química adequada a banhos. É necessário conhecer a batimetria do litoral, ou seja, conhecer o fundo do mar na zona mais energética do mar (entre a zona das águas rasas à zona do máximo espraio) para obter-se vários parâmetros oceânicos, tais como: profundidade da água, altura da onda e velocidade da onda. A monitorização diária facilitará, ao fim de algum tempo, perceber como a areia se move ao longo do dia, das marés, das condições climáticas, da estação e das fases da lua. Com isto conseguirá perceber onde se encontram as correntes, as valas e as elevações; e consequentemente, definir zonas propícias a banhos e alertar para locais perigosos, os quais nunca serão fixos. Também, conhecer o avanço e recuo da linha de praia em relação a um ponto de referência.

A autora considera que seria importante existir financiamento para continuar este estudo de forma a conseguir-se inventar um método só com um *software*, e, se possível, também, para iniciar-se o cálculo da deriva litoral, isto é, a determinação da quantidade de sedimento que passa numa secção do litoral durante determinado período (1 ano).

Referências bibliográficas

- Andriolo, U. (2018). *Nearshore hydrodynamics and morphology derived from video imagery (dissertação para obtenção do grau de doutor em Geologia, na Especialidade de Geodinâmica Externa)*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 227 p. URL: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/35191> (acedido a 03/07/2019).
- Andriolo, U., Taborda, R., Sanchez-Garcia, E. (2016). *Measuring wave runup and intertidal beach topography from online-streaming surfcam*. URL: https://escolanaval.marinha.pt/pt/aescolanaval_web/jornadasdomar_web/Documents/UmbertoAndriolo.pdf (acedido a 10/07/2019).
- Caroça, C. (2020) *Relatório final da Bolsa de Investigação do Projecto "To-SEAlert - Galgamento e inundação em zonas costeiras e portuárias: Ferramentas para um sistema de previsão e alerta, planeamento de emergência e de gestão do risco"*, ref.^a PTDC/EAM-OCE/31207/2017, (1 de Outubro de 2019 até 31 de Maio de 2020), p. 157. URL: <https://www.researchgate.net/publication/358780742>
- Fachin, S., Sancho, F., Ortega, Losada, M. (2006) *Sistema de vídeo-monitorização da zona costeira*. URL: (<http://www-ext.lnec.pt/LNEC/bibliografia/DHA/paper1.pdf>) (acedido a 23/07/2019).
- Gal, Y., Browne, M., Lane, C. (2011). Automatic estimation of Nearshore wave height from video timestacks, *International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications*, IEEE Computer Society. DOI: <https://doi.org/10.1109/DICTA.2011.68>
- Hanselman, D., Littlefield, B. (1997). *The student Edition of Matlab - The language of technical computing*, Version 5, User's Guide, The Matlab Curriculum Series, The Math Works Inc., Prentice Halls, USA, 429 p.
- Instituto Hidrográfica, <https://www.hidrografico.pt/m.mare> e www.hidrografico.pt
- Mendonça M., (2014). *MATLAB AVANÇADO*, UFSC, 57 p. URL: http://mtm.ufsc.br/~melissa/arquivos/matlabpet/apostila_curso_matlab.pdf (acedido a 23/0-3/2020).
- Pereira, P. (2016), *Desenvolvimento de novas soluções para aquisição de dados batimétricos (Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências do Mar e Zonas Costeiras)*. Apresentada à Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento.
- Sánchez, R. (2014). Caracterización de la agitación local y la respuesta oscilatoria de un buque mediante el uso de técnicas de visión artificial. Aplicación

al análisis de los umbrales operativos en líneas de atraque y amarre. Tesis Doctoral, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. URL: http://oa.upm.es/32990/1/RAFAEL_MOLINA_SANCHEZ_1.pdf (accedido a 25/10/2019).

Santos, F.D. & P. Miranda, 2007. *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação, Projecto SIAM II*, Gradiva, Lisboa, 506 p.

Silva, L. (2010) *Simulação da propagação de ondas na Praia de Faro, Programa de Projecto do 1.º Ciclo - Meteorologia, Oceanografia e Geofísica, Ano lectivo 2009/2010*, Universidade de Aveiro, 41 p. URL: <http://www-ext.lnec.pt/projects2012/BRISA/T3.pdf> (accedido a 27/08/2019).

THE OCEANOGRAPHY COURSE TEAM (2006). *Waves, Tides and Shallow-Water process*, Butterworth Heinemann, The Open University, England, 227 p.



RISCOS



AVALIAÇÃO DE RESERVAS DE ÁGUA SUPERFICIAL E DE RISCO DE INUNDAÇÃO NA GUARDA, PORTUGAL*

SURFACE WATER RESERVES AND FLOOD RISK IN GUARDA, PORTUGAL

103

Helena Maria Simão

Instituto Politécnico da Guarda (Portugal)
Escola Superior de Tecnologia e Gestão, UTC de Engenharia e Tecnologia
ORCID 0000-0001-7817-472X hsimao@ipg.pt

Alfeu Sá Marques

Universidade de Coimbra, INESC Coimbra (Portugal)
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil
ORCID 0000-0001-6859-6662 jasm@dec.uc.pt

Nuno Eduardo Simões

Universidade de Coimbra, INESC Coimbra (Portugal)
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil
ORCID 0000-0002-4500-7981 nunocs@dec.uc.pt

José Paulo de Almeida

Universidade de Coimbra, INESC Coimbra (Portugal)
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Matemática
ORCID 0000-0002-2532-2466 uc25666@uc.pt

RESUMO

A vida sem água é impossível. Assim, a necessidade de origens de água adequadas, sistemas de abastecimento de água, controlo de cheias e reservas de água sempre levou à necessidade de desenvolver o planeamento dos recursos hídricos. As alterações climáticas, hoje um facto cientificamente demonstrado, implicarão agravamento de situações extremas e de eventos de seca e precipitação intensa, evidenciam a urgência de fortalecer a relação entre o planeamento urbano e a gestão de recursos hídricos, apostando em cidades mais sustentáveis e mais resilientes com mudanças na política de ocupação do solo, privilegiando soluções técnicas diferenciadas, preservando áreas de inundação ainda existentes, complementadas com intervenções para retenção na origem. No âmbito do planeamento urbano e dos recursos hídricos, neste artigo, identificam-se e avaliam-se possíveis reservas de água de superfície do concelho da Guarda e são avaliadas as áreas inundadas pelo Rio Diz, dentro da cidade da Guarda.

Palavras-chave: Planeamento de recursos hídricos, planeamento urbano, gestão do uso.

ABSTRACT

Life without water is impossible. Thus, the need for adequate water sources, water supply systems, flood control, and water reserves has always meant that water resources planning is essential. Climate change, which is now scientifically proven to worsen extreme situations and events of drought and heavy precipitation, serves to highlight the urgency of strengthening the relationship between urban planning and water resource management. Investment in more sustainable and more resilient cities is crucial, with changes in land use policy that favour innovative technical solutions to preserve areas of flooding that still exist, complemented by interventions for retention at source. In the context of urban planning and water resources, this article identifies and evaluates possible surface water reserves in the municipality of Guarda and the areas flooded by the River Diz, within the city of Guarda.

Keywords: Water resources planning, master plan, water security.

* O texto desta nota corresponde a uma comunicação apresentada no IV Simpósio Ibero-Afro-Americano de Riscos, tendo sido submetido em 05-02-2023 sujeito, a revisão por pares a 18-02-2023 e aceite para publicação em 10-05-2023.

Esta nota é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 31 (I), 2024, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

A água é uma condição para a vida e um bem essencial para a humanidade. A sua posse, gestão e acesso condicionaram todo o desenvolvimento da humanidade e a história das civilizações em todos os continentes. O seu controlo, em condições de cheias e de secas, remonta às primeiras civilizações e a evolução destas dependeu, pelo menos em parte, da sua capacidade e da sua habilidade na gestão das disponibilidades de água, tendo condicionado o aparecimento e o desaparecimento de impérios, de conflitos políticos e militares, originando crises que, por vezes, ainda perduram até aos dias de hoje (Boccaletti 2022).

Hoje, as alterações climáticas, são identificadas como responsáveis pelo aumento dos períodos de seca, originando diminuição no escoamento médio dos cursos de água, o que pode levar a graves situações/condições de escassez (Garcia-Ruiz *et al.*, 2011, Rocha *et al.*, 2020, IPCC, 2022). Estas condições evidenciam a urgência de fortalecer a relação entre o planeamento urbano e a gestão de recursos hídricos apostando em cidades mais sustentáveis e mais resilientes.

As alterações climáticas estão a atingir uma proporção que tem implicações no crescimento económico à escala global e também à escala de cada um dos países. Em Portugal, a partir dos finais da década de 1960, regista-se um decréscimo bastante acentuado da precipitação nos meses de janeiro, fevereiro e março, e isto tem consequências sobre vários setores socioeconómicos, em particular na agricultura e nos setores em que a água é um bem essencial (Santos, F.D., 2021).

Torna-se assim evidente a necessidade de mudar de política e estratégia de ocupação do solo, procurando soluções técnicas diferenciadas, privilegiando um novo paradigma de gestão da água em meio urbano que deverá basear-se, o mais possível, na conjugação de medidas estruturais e não-estruturais, na renaturalização dos cursos de água ainda passíveis de tais intervenções e na implementação de medidas que visem restabelecer o mais possível a retenção natural, conservando as áreas de inundação ainda existentes e complementar com intervenções de retenção na origem, nomeadamente com obras de retenção e detenção.

A ocupação urbana do solo, associada a um inadequado ordenamento do território e planeamento de sistemas de drenagem, induz, em geral, e à luz dos critérios tradicionais de projeto, um aumento de caudal devido a uma maior impermeabilização com o consequentemente aumento da frequência e da magnitude das inundações e das cheias (Berndtsson *et al.*, 2019, Yazdanfar e Sharma, 2015).

A taxa de impermeabilização verificada nas últimas décadas no município da Guarda, à semelhança do que aconteceu no País e no Mundo, tem sido excessiva,

ocasionando eventos de inundações com frequências e amplitudes cada vez mais elevadas, o que obrigará os poderes públicos a investimentos cada vez mais elevados em obras de drenagem que não resolverão definitivamente os problemas, mas apenas os irão mitigando e deslocando para outros locais situados a jusante.

O estudo que aqui se apresenta resultou da necessidade de, no âmbito da revisão do PDM, ter em conta a influência das linhas de água na definição dos perímetros urbanos. Esta delimitação resulta em: i) avaliação das áreas inundáveis dentro da cidade da Guarda e ii) identificação de possíveis locais destinados à construção de estruturas hidráulica com vista à retenção e ao armazenamento de água.

Neste artigo, resumem-se os procedimentos e as técnicas utilizadas na identificação e avaliação de áreas inundadas e novas reservas de água de superfície, no âmbito do planeamento urbano e dos recursos hídricos, num exemplo prático no concelho da Guarda, em Portugal.

Caracterização das Bacias

Dado que numa primeira fase se pretendeu avaliar as disponibilidades hídricas associadas ao concelho da Guarda, foram delimitadas todas as bacias drenantes influentes para o perímetro urbano: Rio Diz, Ribeira das Cabras, Rio Noéme, Ribeira de Adão, Ribeira de Santo Amaro e Rio Massueime e foi efetuada a sua caracterização em termos geométricos, fisiográficos, de relevo, de drenagem e de ocupação do solo.

Para as mesmas linhas de água, foram analisados os registos dos caudais e das precipitações, quando disponíveis, em cada uma das bacias e foram quantificados os caudais máximos de cada uma delas e os correspondentes períodos de recorrência.

Com base em informação cartográfica, topo batimétrica e urbanística, foram construídos modelos hidrológico-hidráulicos que permitiram avaliar a influência dos valores extremos na definição dos perímetros urbanos.

Com base em modelos hidrológicos foram estimadas as disponibilidades hídricas de cada linha de água.

Elaborou-se um mapa com a localização do concelho da Guarda, no país (fig. 1) e um mapa com a localização das bacias em estudo no concelho da Guarda (fig. 2) onde se pode constatar que as linhas de água em análise, têm a sua origem bastante próxima umas das outras o que conduz a que, do ponto de vista geomorfológico, sejam muito semelhantes.

Exemplificando o que foi feito para as restantes bacias analisadas, apresenta-se um conjunto de imagens que permitem efetuar a caracterização física da bacia do Rio Diz, nomeadamente a delimitação da bacia hidrográfica e a respetiva ocupação (fig. 3) e a carta de declives

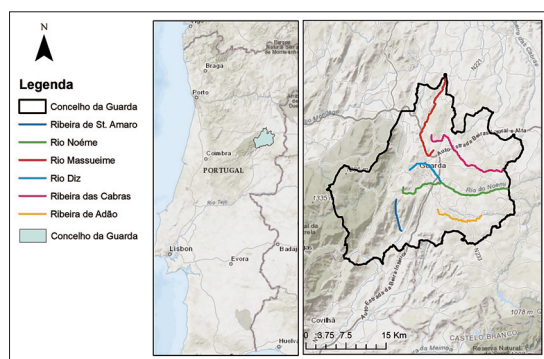


Fig. 1 - Localização do concelho da Guarda e das linhas de água em estudo.

Fig. 1 - Location of Guarda municipality and streams under study.

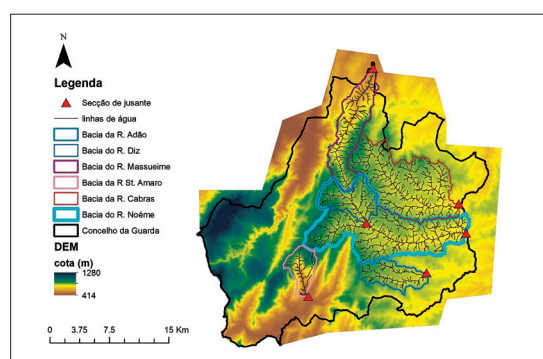


Fig. 2 - Altimetria do concelho da Guarda e localização das bacias em estudo.

Fig. 2 - Elevation map of Guarda municipality and location of the basins under study.

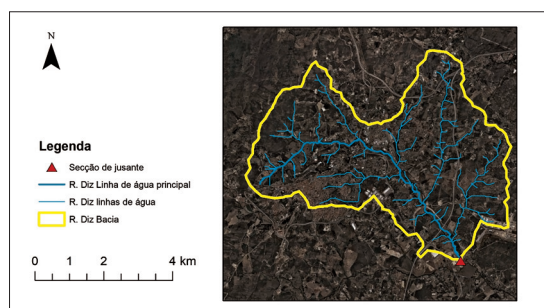


Fig. 3 - Mapa de ocupação e linhas de água da bacia do Rio Diz.

Fig. 3 - Land occupation map and basin streams.

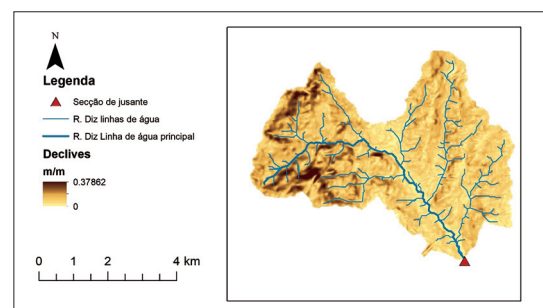


Fig. 4 - Carta de declives da bacia do Rio Diz.

Fig. 4 - Slopes Map of Diz basin.

(fig. 4). Apresentam-se as curvas hipsométricas (fig. 5) e a curva hidrodinâmicas (fig. 6) (com base nas áreas

drenadas). As características das diversas bacias estão resumidas na TABELA I.

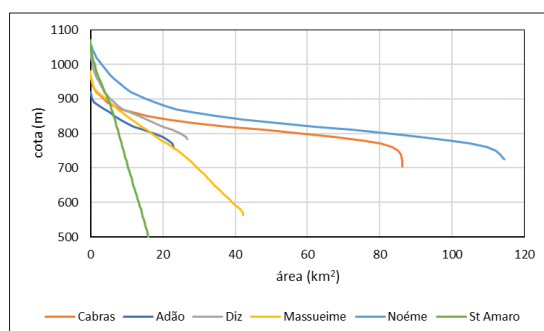


Fig. 5 - Curvas hipsométricas das bacias em estudo.

Fig. 5 - Hypsometric curves.

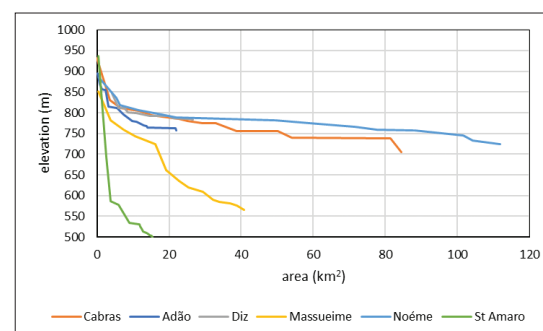


Fig. 6 - Curva hidrodinâmica das bacias em estudo.

Fig. 6 - Hydrodynamic curves.

TABELA I - Características das bacias hidrográficas em estudo.

TABLE I - Features of the hydrographic basins.

	Diz	Cabras	Noeme	Adão	Sto. Amaro	Massueime
Área (km²)	26,7	86,2	114,3	22,9	15,9	42,2
Perímetro (km)	27,7	52,1	71,0	26,7	18,7	41,1
Altitude média da bacia (m)	860,9	819,4	836,5	828,6	783,6	763,3
Altitude (cota) máxima da bacia (m)	1055,4	972,5	1071,3	927,1	1070,3	985,8
Altitude (cota) máxima da linha de água principal (m)	930,0	935,4	1039,5	897,4	946,2	906,4
Altitude (cota) mínima da bacia (m)	783,7	703,8	725,0	756,9	500,0	563,5
Comprimento da linha de água principal (m)	8879,5	20620,1	25355,9	10853,9	6398,1	19408,9
Declive médio da linha de água principal (m)	1,70%	1,10%	1,20%	1,30%	7,00%	1,80%
Índice de compactidade	1,51	1,58	1,87	1,57	1,32	1,78
Fator de forma	0,34	0,20	0,18	0,19	0,39	0,11

A TABELA I evidencia que as bacias têm dimensões bastante diferentes, sendo as bacias menos alongadas as de Santo Amaro e do Rio Diz.

Avaliação do Escoamento

106

O estudo da precipitação numa dada bacia hidrográfica baseia-se no recurso a registos de precipitações nos diferentes postos udométricos que existam na bacia que será tanto mais rigoroso quanto mais postos existirem e quanto maior for o número de anos registados.

No presente estudo foi recolhida informação nas bases de dados de plataformas públicas nacionais, sendo que para as bacias consideradas apenas se obtiveram dados, em continuidade e comuns a todas as bacias, os disponibilizados pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA) através da plataforma do Serviço Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), correspondentes a um período de 12 anos. Os valores referidos correspondem ao período situado entre 1984 e 1996.

Para o cálculo da precipitação média numa bacia hidrográfica, podem ser utilizados três métodos distintos: o método da média aritmética, o método de Thiessen e o método das isoietas, sendo que de entre estes, o método mais comumente utilizado é o de Thiessen (Hipólito e Vaz, 2011).

Face à inexistência de postos udométricos nas bacias hidrográficas em estudo, foi necessário recorrer a postos situados nas respectivas proximidades, localizados em bacias hidrográficas distintas. Para a obtenção da precipitação mensal ponderada na bacia em estudo utilizou-se o método de Thiessen, e calculado através da seguinte expressão geral:

$$P_{\text{mensal}}^{\text{bacia A}} = \sum_{i=1}^n \left(P_{\text{mensal}}^{\text{posto } i} \times \frac{A_{\text{posto } i}}{A_{\text{bacia A}}} \right)$$

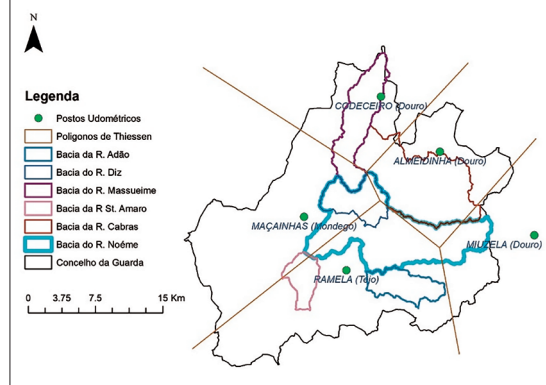


Fig. 7 - Aplicação do método de Thiessen.

Fig. 7 - Application of Thiessen's method.

A obtenção de caudais máximos instantâneos pode ser conseguida pelo estudo dos registos dos valores dos postos hidrométricos existentes na bacia ou recorrendo a fórmulas ou métodos de transformação da precipitação em escoamento.

O caudal máximo instantâneo para um determinado período de recorrência (T_r), sempre que se dispõem de dados hidrométricos, poderá ser obtido por aplicação de métodos estatísticos, leis de extremos, como por exemplo a lei de Gumbel (Chow *et al.*, 1988).

Quando esses valores não se encontram disponíveis, o recurso à utilização do método Racional é um procedimento corrente para a obtenção do caudal máximo instantâneo, ainda que com um grau de incerteza elevado.

A utilização de métodos de transformação da precipitação em escoamento requer o conhecimento de valores de precipitação com diferentes períodos de recorrência, sendo usual o recurso às curvas Intensidade-Duração-Frequência (curvas IDF). Para a determinação do tempo de concentração considerou-se a utilização da fórmula de Temez e para o coeficiente de escoamento usaram-se valores de 0,4 e de 0,3 para as bacias em análise (Hipólito e Vaz, 2011).

Constatando-se a inexistência de curvas IDF para períodos de recorrência elevados e de postos localizadas nas bacias em estudo, utilizaram-se curvas IDF com alguma proximidade geográfica, tendo-se desenvolvido uma interpolação com vista a “quantificar” a influência do efeito da altitude nos valores da precipitação.

As bacias estudadas não têm registos de caudais e por isso usaram-se os registos de bacias vizinhas. As bacias têm características semelhantes de ocupação e geológicas, pelo que a ponderação com as áreas e precipitação dão uma boa estimativa para efeitos de planeamento (Hipólito e Vaz, 2011). Assim, recorreu-se à metodologia a seguir descrita, em que o escoamento estimado é função do escoamento registado numa linha de água com características idênticas às da bacia em estudo, afetado de um coeficiente traduzido pela relação das áreas e das precipitações das bacias consideradas para o estudo, de acordo com a expressão geral que a seguir se apresenta:

$$E_{\text{mensal}}^{\text{bacia A}} = E_{\text{mensal}}^{\text{bacia B}} \times \frac{A_{\text{bacia A}}}{A_{\text{bacia B}}} \times \frac{P_{\text{mensal}}^{\text{bacia A}}}{P_{\text{mensal}}^{\text{bacia B}}}$$

Com base nas metodologias anteriormente descritas obtiveram-se precipitações mensais, escoamentos mensais e caudais máximos instantâneos para as linhas de água estudadas que permitiram a avaliação das respectivas disponibilidades hídricas (TABELA II).

TABELA II - Caudais médios e escoamentos médios anuais nas secções das linhas de água em estudo.

TABLE II - Average flows and annual runoff in the sections of the streams under study.

Linha de Água													
Diz													
	84/85	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	Média
Caudal Médio (Q (m³/s))	0,476	0,293	0,317	0,572	0,236	0,730	0,519	0,089	0,107	0,563	0,015	0,367	0,357
Escoamento anual (hm³)	15,021	9,242	9,995	18,052	7,450	23,008	16,354	2,796	3,360	17,743	0,477	11,583	11,257
Adão													
	84/85	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	Média
Caudal Médio (Q (m³/s))	0,277	0,165	0,258	0,358	0,047	0,308	0,320	0,010	0,053	0,238	0,020	0,420	0,206
Escoamento anual (hm³)	8,736	5,207	8,129	11,274	1,477	9,716	10,095	0,329	1,665	7,493	0,639	13,234	6,500
Cabras													
	84/85	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	Média
Caudal Médio (Q (m³/s))	0,938	0,716	0,691	1,298	0,235	0,983	0,955	0,037	0,102	1,074	0,148	1,323	0,708
Escoamento anual (hm³)	29,586	22,592	21,796	40,931	7,416	31,010	30,112	1,155	3,215	33,857	4,654	41,706	22,336
Noéme													
	84/85	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	Média
Caudal Médio (Q (m³/s))	1,459	0,942	1,312	1,816	0,366	1,492	2,164	0,057	0,216	1,299	0,166	1,942	1,103
Escoamento anual (hm³)	46,000	29,705	41,368	57,273	11,555	47,057	68,232	1,809	6,803	40,966	5,239	61,232	34,770
Santo Amaro													
	84/85	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	Média
Caudal Médio (Q (m³/s))	0,134	0,094	0,097	0,171	0,034	0,150	0,149	0,005	0,014	0,159	0,029	0,196	0,103
Escoamento anual (hm³)	4,228	2,971	3,056	5,388	1,073	4,742	4,688	0,170	0,432	5,025	0,918	6,182	3,239
Massueime													
	84/85	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	Média
Caudal Médio (Q (m³/s))	0,380	0,265	0,287	0,540	0,087	0,482	0,451	0,016	0,040	0,489	0,066	0,608	0,309
Escoamento anual (hm³)	11,976	8,361	9,041	17,021	2,737	15,194	14,218	0,502	1,257	15,414	2,094	19,173	9,749

Áreas inundáveis na cidade da Guarda

Um dos objetivos do estudo é a elaboração dos mapas de inundação do rio Diz, dentro na cidade da Guarda. Os troços estudados contêm a zona urbana do Rio, com especial destaque para o troço Rio Diz no parque urbano. A bacia do Rio Diz é uma sub-bacia que se encontra a montante da Bacia do Rio Noéme. Para a simulação hidráulica de delimitação das áreas inundáveis associadas à localização de diferentes açudes utilizou-se o modelo hidráulico HEC-RAS, modelo de uso livre ("Open-Access") desenvolvido pela US Army Corps of Engineers, que é um modelo unidimensional e que resolve as equações de Saint-Venant completas, por aplicação do método de diferenças finitas, permitindo simular o escoamento em superfície livre em regime permanente e em regime variável. A lei de resistência aplicada é a Equação de Manning-Strickler, sendo a secção transversal de escoamento considerada uma secção composta.

Na simulação dos modelos de HEC-RAS, a topografia do canal é caracterizada pelo modelo digital do terreno desenvolvido com base na informação à escala 1:10000

disponibilizada pela Camara Municipal da Guarda, que permite definir uma série de secções transversais ao longo do troço do curso de água em estudo (EXCIMAP, 2007). Após a simulação do modelo são calculadas as alturas de água nas secções transversais referidas, permitindo assim que seja delimitada a zona inundada. Uma vez que, no modelo, a cota da superfície livre é constante ao longo de toda a secção, a zona inundada é limitada pela interceção da topografia do terreno com a superfície livre em cada secção e o resultado da interpolação entre os perfis das secções transversais.

A calibração do modelo construído foi feita através do ajuste dos parâmetros característicos do modelo. Após visitas ao local, e da análise da cartografia existente, foi possível aplicar diversos valores tabelados na bibliografia da especialidade. Os resultados obtidos foram comparados com diferentes métodos de cálculo.

Foram efetuadas diferentes simulações com caudais com tempo de recorrência (TR) de 10, 50 e 100 anos e durações (tp) superiores ao tempo de concentração da bacia (tc), para que toda a bacia contribua, com vista à elaboração dos mapas das planícies de inundação associados a essas probabilidades de ocorrência (fig.s 8 a 12.

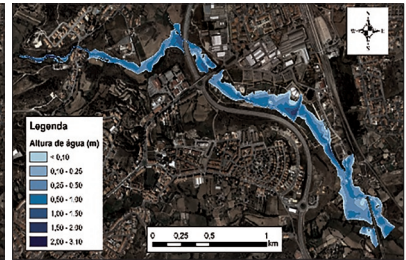
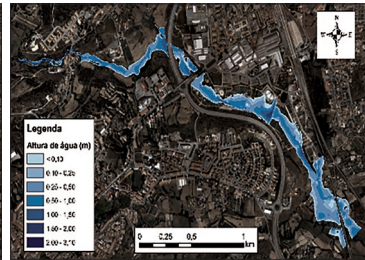
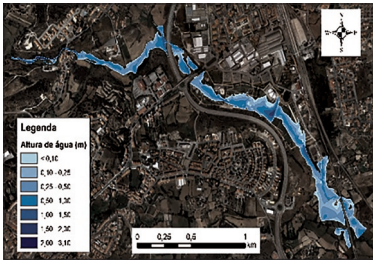


Fig. 8 - Mapa de planície de inundação para um período de retorno (TR) de 10 anos.

Fig. 9 - Mapa de planície de inundação para um período de retorno (TR) de 50 anos.

Fig. 10 - Mapa de planície de inundação para um período de retorno (TR) de 100 anos.

Fig. 8 - Flood plain map for peak discharge with a 10-year return period (TR).

Fig. 9 - Flood plain map for peak discharge with a 50-year return period (TR).

Fig. 10 - Flood plain map for peak discharge with a 100-year return period (TR).

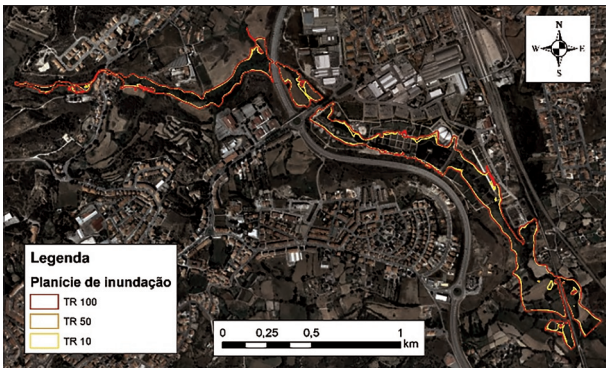


Fig. 11 - Limites da planície de inundação para os diferentes períodos de retorno.

Fig. 11 - Flood plain limits for peak discharge with different return periods.

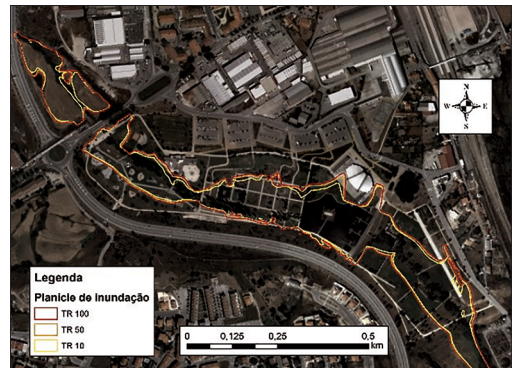


Fig. 12 - Limites da planície de inundação para diferentes períodos de retorno na zona da GuardaPolis.

Fig. 12 - Flood plain limits for peak discharge with different return periods in the Guarda Polis zone.

Reservas de água

Na fase seguinte procedeu-se à quantificação do escoamento nas linhas de água: rio Diz, ribeira de Adão, ribeira das Cabras, rio Noéme, ribeira de Santo Amaro e rio Massueime, podendo assim serem analisadas possíveis localizações para a criação de reservas de água pela construção de açudes/barragens.

Para a avaliação dos locais das possíveis localizações foram consideradas estruturas hidráulicas com alturas

relativamente pequenas, que poderão ter menores restrições legais para a sua implementação.

Desta avaliação resultou como de possível interesse, as que se situam na ribeira das Cabras, na ribeira de Adão, no rio Massueime e na ribeira de Santo Amaro, em que se analisou a relação entre a altura do açude e o volume armazenado (fig. 13). Pela análise efetuada, observa-se que os açudes com maior potencial para armazenar água encontram-se na ribeira das Cabras e na ribeira de Adão.

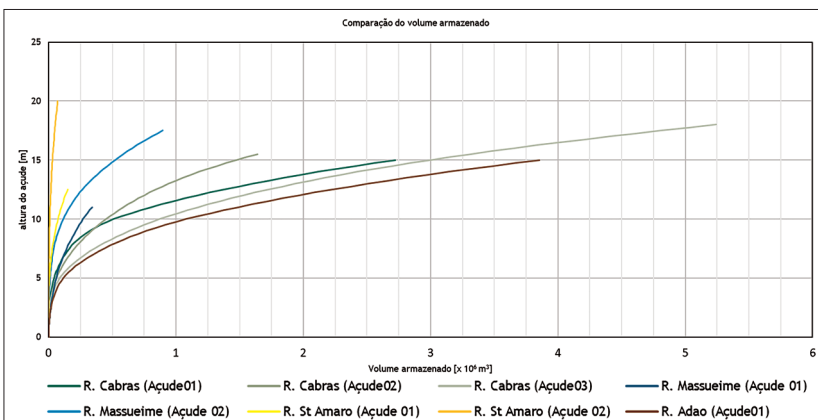


Fig. 13 - Comparação das curvas de volume armazenado em função da altura do açude.

Fig. 13 - Storage capacity analysis.

De seguida, mostra-se a localização de sete dos oito diferentes açudes identificados como passíveis de ser implantados (fig.'s 14 a 16).

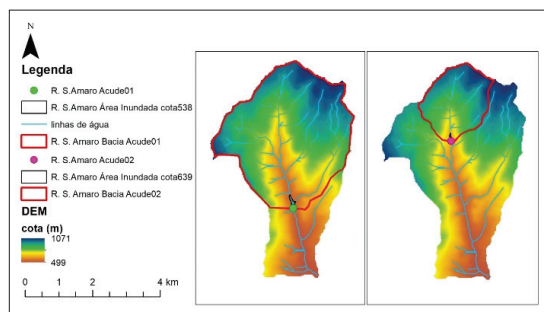


Fig. 14 - Possível localização de açudes na ribeira de Santo Amaro.

Fig. 14 - Possible location of dams in the Santo Amaro stream.

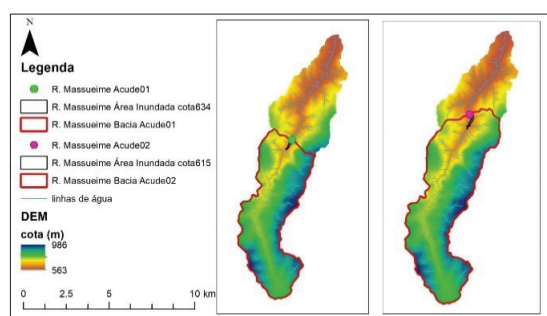


Fig. 15 - Possível localização de açudes no rio Massueime.

Fig. 15 - Possible location of dams in the Massueime stream.

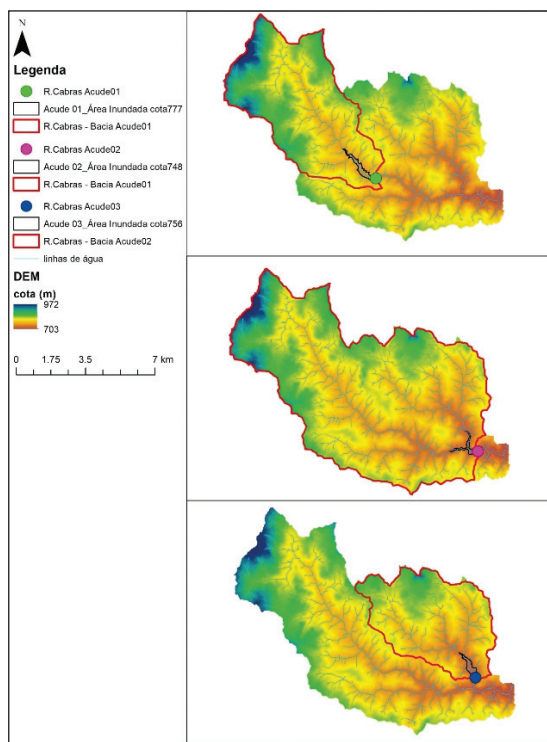


Fig. 16 - Possível localização de açudes na ribeira das Cabras

Fig. 16 - Possible location of dams in the Cabras stream.

Conclusões

A população urbana tem vindo a aumentar, sendo de esperar que em 2030, cerca de 60% da população mundial viva nas cidades. Como consequências deste movimento, importantes e significativos impactos são de esperar nos sistemas de saneamento básico, e em particular nos sistemas de drenagem.

Consequentemente, uma mudança das práticas de projeto e gestão de infraestruturas de drenagem urbana deve ser implementada no sentido de desenvolver soluções adequadas e viáveis, dentro da realidade socioeconómica das cidades, e em consequência do aumento do conhecimento, das ferramentas de modelação e da consciencialização das consequências que procedimentos incorretos terão, quer em termos de segurança de pessoas e bens, quer em termos de sustentabilidade técnica e económica.

As entidades responsáveis pelo planeamento e desenvolvimento das cidades devem ter consciência que preservar o ambiente dentro da cidade é possível, que as soluções baseadas exclusivamente na canalização são de evitar, quando podem existir outras soluções técnica e economicamente viáveis para retenção natural, preservando as áreas de inundação ainda existentes.

O estudo iniciou-se com uma caracterização física de algumas bacias hidrográficas do concelho da Guarda, dos seus caudais e precipitações.

Numa segunda fase, foi efetuada a delimitação das áreas de inundação da do Rio Diz, dentro do perímetro urbano da guarda, através uma modelação hidrológico/hidráulica. Na realidade quer pela ocupação urbana das margens, quer por razões físico-orográficas as restantes linhas de água não requerem uma análise detalhada ao nível de detalhe que se impõe no rio Diz. As simulações numéricas efetuadas permitiram constatar que para eventos com períodos de recorrência elevados, mesmo da ordem dos 100 anos, os equipamentos físicos, não são afetados pelas correspondentes cheias.

Foram identificadas e avaliadas, possíveis localizações para a construção de estruturas de armazenamento de água. Da análise efetuada, no que se refere a possíveis locais de construção de estruturas hidráulica com vista à retenção e armazenamento de água, foram identificados 8 locais com potencialidade. Os locais identificados deverão ser objeto de avaliação técnico-económica para construção de aproveitamentos de fins múltiplos, sendo que a eventual construção das estruturas hidráulicas anteriormente referidas implicará a elaboração dos correspondentes Planos de Ordenamento das Albufeiras (POAAP).

Referências bibliográficas

- Berndtsson, R., Becker, P., Persson, A., Aspegren, H., Haghighatafshar, S., Jönsson, K., Larsson, R., Mobini, S., Mottaghi, M., Nilsson, J., Nordström, J., Pilesjö, P., Scholz, M., Sternudd, C., Sörensen, J., & Tussupova, K. (2019). Drivers of changing urban flood risk: A framework for action. *Journal of Environmental Management*, 240, 47-56.
DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.03.094>
- Boccaletti, Giulio (2022). *Água: Uma Biografia*, ISBN: 978-989-9033-63-4.
- Chow, Ven Te, David, R. Maidment, and Larry W. Mays. (1988). *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Climate Change (2022). *Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Working Group II Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report.
- Garcia-Ruiz, J., Lopez-Moreno, J., Vicente-Serrano, S.M., Lasanta, T., Beguería, S., (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105, 121-139.
- EXCIMAP (2007). *Handbook on good practices for flood mapping in Europe*. European Commission.
- Hipólito, J.R. e Vaz, A.C. (2011). *Hidrologia e Recursos Hídricos*, IST Editora Press, Lisboa, Portugal.
- Rocha, J., Carvalho-Santos, C., Diogo, P., Beça, P., Keizer, J., Nunes, J. (2020). Impacts of climate change on reservoir water availability, quality and irrigation needs in a water scarce Mediterranean region (southern Portugal), *Science of The Total Environment*, Volume 736, 20 September 2020, 139477.
- Santos, F. D. (2021). Alterações Climáticas, in *Ensaio da Fundação* n.º 111, Fundação Francisco Manuel dos Santos, Lisboa, Portugal.
- POAAP - SISTEMA DE INFORMAÇÃO DO REGADIO. Disponível em: Planos de Ordenamento de Albufeiras de Águas Públicas (POAAP). URL: www.dgadr.gov.pt
- SNIRH - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS. Disponível em: SNIRH: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. URL: www.apambiente.pt
- Yazdanfar, Z., e Sharma, A. (2015). Urban drainage system planning and design - challenges with climate change and urbanization: a review. *Water Science and Technology*, 72(2), 165-179.
DOI: <https://doi.org/10.2166/WST.2015.207>



RISCOS



ANÁLISE SOBRE A TECNOLOGIA SMS EM SISTEMAS DE ALERTAS DE RISCO DE DESASTRES NO BRASIL*

ANALYSIS OF SMS TECHNOLOGY IN EARLY WARNING SYSTEMS IN BRAZIL

111

André Francisco Pugas

Universidade Federal de Santa Catarina (Brasil)
Programa de Pós Graduação em Desastres Naturais
ORCID 0000-0001-6705-0342 pugas@cbm.sc.gov.br

Silvia Midori Saito

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres (Brasil)
ORCID 0000-0001-5951-8582 silvia.saito@cemaden.gov.br

RESUMO

Muito se discute a necessidade de reduzir a perda de vidas humanas, danos ao patrimônio e ao meio ambiente, causados por desastres associados a processos naturais. Medidas não-estruturais, como os sistemas de alerta, têm-se constituído em importante aliada na redução de danos humanos e materiais, em especial, de comunidades vulneráveis. Este artigo analisa o uso do serviço *Short Message Service* (SMS) como ferramenta de disseminação de alertas à população brasileira. O estudo realizou pesquisa exploratória sobre o uso de alertas SMS no Brasil, a partir de levantamento bibliográfico e consulta a documentos públicos. O serviço de comunicação à população por SMS em escala nacional é relativamente recente no Brasil, disponibilizado desde 2017. Os governos estaduais vem implantando esse serviço paulatinamente ao longo dos últimos anos. Mesmo diante de outras tecnologias mais modernas, os alertas SMS têm potencial significativo no alcance de pessoas vulneráveis aos desastres no Brasil. O acesso precário à Internet em um país de dimensões continentais, além dos diferentes contextos socioeconômicos da população brasileira, reforçam a necessidade de se ter diferentes meios de comunicação de risco.

Palavras-chave: Alerta de desastres, SMS, sistemas de alertas de desastres, preparação.

ABSTRACT

There is a lot of discussion about the need to reduce the loss of human life, damage to property, and harm to the environment caused by disasters associated with natural hazards. Non-structural measures such as warning systems have become important allies in reducing human and material damage, especially in vulnerable communities. This article analyses the use of the short message service (SMS) as a tool for broadcasting alerts to the Brazilian population. The study carried out exploratory research on the use of SMS alerts in Brazil, based on a literature survey and consultation of public documents. The service of communicating to the people by SMS on a national scale is relatively recent in Brazil, only available since 2017. State governments have gradually been implementing this service over the last few years. Despite other more modern technologies, SMS alerts have significant potential in reaching people vulnerable to disasters in Brazil. The precarious access to the Internet in a country of continental dimensions, not to mention the different socioeconomic contexts of the Brazilian population, emphasise the need to have different means of risk communication.

Keywords: Early warnings, SMS, early warning system, preparedness.

* O texto desta nota corresponde a uma comunicação apresentada no IV Simpósio Ibero-Afro-Americano de Riscos, tendo sido submetido em 19-10-2022, sujeito a revisão por pares a 21-10-2022 e aceite para publicação em 27-01-2023.

Esta nota é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 31 (I), 2024, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

A frequência e magnitude de eventos críticos como inundações, *tsunamis*, secas, movimentos de massa e terremotos estão se tornando cada vez mais uma ameaça para desenvolvimento sustentável, especialmente nos países e regiões com menor poder econômico (Di Giulio *et al.*, 2017, p. 78). Identificar a possibilidade de eventos como esses se concretizarem e estimular a preparação das pessoas diante a sua ocorrência são essenciais, principalmente para que a população tenha o conhecimento do risco ao qual está exposta (WMO, 2017, p.10).

De fato, o conhecimento do risco contribui substancialmente para a adoção de ações que possibilitem minimizar os riscos e os impactos de desastres; assim, algumas nações idealizaram e realizaram a implementação de sistemas de alerta, com o objetivo de possibilitar que aqueles em risco tenham informação para buscarem abrigos seguros antes da manifestação de tais eventos, adotem medidas protetivas e minimizem as perdas de diversas naturezas (Villagrán de León *et al.*, 2013).

Neste sentido, os sistemas de alertas podem auxiliar na redução dos impactos negativos dos desastres. Trata-se de uma medida que utiliza sistemas de comunicação integrados para auxiliar a população em geral a se preparar para eventos relacionados às mudanças climáticas, eventos extremos, produção de alimentos e epidemias (ONU, 2020).

Em relação à proteção das pessoas, os sistemas de alerta podem proporcionar ações efetivas para salvaguarda de vidas e patrimônios, de infraestruturas e setores sociais que fornecem suporte a longo prazo às medidas sustentáveis. Os sistemas de alerta auxiliam instituições públicas e privadas nos mais variados níveis hierárquicos em seu planejamento, economizando recursos financeiros no longo prazo e protegendo as economias e principalmente as vidas humanas (UNISDR, 2015).

Basher (2006) afirma que devido à multidisciplinaridade alcançada pela aplicabilidade dos sistemas de alertas antecipado, é possível identificar iniciativas mundiais, como a *European Early Warning System* (Climate Adapt, 2022) e J-Alert (Kodera *et al.*, 2021), na utilização dos alertas para benefícios de variados setores que impactam a sociedade de forma direta. Em âmbito mundial, a ONU (2020) estabelece objetivos estratégicos de adaptação às mudanças do clima e incentiva que países desenvolvam iniciativas de implementação de sistemas de alerta antecipado em áreas consideradas vulneráveis, por meio de ferramentas e inovações tecnológicas.

Inúmeras tecnologias e ferramentas podem ser empregadas para informar de maneira adequada, inteligível e compreensível a população, incluindo a comunicação por rádio, televisão, Internet e mídia social. A partir da am-

pliação do uso de telefones celulares na década de 1990, a comunicação por texto via *Short Message Service* (SMS) também passou a ser adotada em vários países. A tecnologia SMS tem-se apresentado como uma ferramenta viável e estratégica, utilizada como canal ágil de comunicação de utilidade pública em todo o mundo, inclusive para o uso em sistemas de alertas. Presente em qualquer dispositivo de telefonia móvel, o SMS ou mensagem de texto é uma eficiente ferramenta de comunicação com aplicação em diversos setores devido à sua simplicidade, facilidade de uso e alcance (MBLOX, 2010, p.2).

Segundo o banco de dados da *International Telecommunication Union - ITU* (2020) há uma tendência mundial pela utilização apenas de telefonia móvel, o que significa que se tem substituído telefones fixos por telefones celulares. De acordo com essa tendência contínua, a capacidade de se comunicar com as pessoas por meio de telefones celulares tornou-se vital. A *Global System Mobile Association - GSMA* (2021) menciona que existem cerca de 5 bilhões de celulares sendo utilizados por usuários pelo mundo, tornando a telefonia móvel e seus derivados uma poderosa ferramenta disseminadora de informação de alcance global. Logo, o SMS apresenta um grande potencial como meio de informar as pessoas (MBLOX, 2010, p.4).

Desta forma, em situações de calamidade ou de cenários críticos, a comunicação pública sobre eventos de terremotos, ciclones, chuvas torrenciais e inundações e o fornecimento de recomendações instrutivas sobre como responder a tais eventos, podem diminuir os impactos de um desastre e salvar vidas (Wong *et al.*, 2017, p. 183). A agilidade no envio dessa comunicação tem um grande potencial na efetividade na informação do evento de desastres.

Mesmo diante do potencial de uso da ferramenta, nota-se a escassez de estudos e pesquisas acadêmicas bem como a falta de informações em relação ao uso da tecnologia móvel (Lappalainen, 2017; Goerlandt, 2022), assim como os de serviços de envio de pequenos textos e sua aplicação aos sistemas de alertas (Meier; Munro, 2010; GSMA, 2013). Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo analisar o uso do SMS nos sistemas de alertas de desastres no Brasil. Para apoiar a análise crítica sobre o tema foi realizado um levantamento bibliográfico em artigos e documentos públicos sobre sistemas de alerta que utilizam como uma das formas de disseminação de informações de desastres a tecnologia SMS no período de 2000 a 2021.

Sistema de alerta por SMS

Durante a Terceira Conferência Internacional de Alerta, na cidade de Bonn, na Alemanha, a *United Nations of International Strategy for Disaster Reduction* (UNISDR)

apresentou uma pesquisa aplicada, realizada a nível global, e seus resultados sobre os sistemas de alertas pelo mundo. De acordo com a UNISDR (2006, p.10) a pesquisa apontou notáveis avanços em relação à capacidade de agências governamentais de fazer previsões potenciais de eventos de desastres naturais e a gestão sistêmica de multi-ameaças em diversos países.

Segundo Villagrán de León *et al.* (2013, p.11) nessa conferência foi discutida a criação de uma estrutura básica para sistemas de alertas, baseada em uma revisão de mais de 150 sistemas, implementadas em diversos cenários desde iniciativas comunitárias, passando por sistemas nacionais, regionais, agências governamentais e iniciativas da sociedade civil organizada em todo o mundo. Como resultado dessa conferência, foi possível estruturar os elementos-chave que definem um sistema de alerta (fig. 1). Em síntese, os elementos consistem em previsão e monitoramento de eventuais ameaças; a relação entre a vulnerabilidade e as ameaças presentes em determinada região, ou seja, o conhecimento do risco; comunicação de risco por meio de alertas; e a capacidade da comunidade em responder, de maneira adequada ao risco e a preparação para determinados eventos (UNISDR, 2006).



Fig. 1 - Elementos chave dos sistemas de alerta
(Fonte: UNISDR, 2006).

Fig. 1 - Key elements of Early Warning System.
(Source: UNISDR, 2006).

De maneira geral, a emissão dos alertas materializa os esforços da comunidade, de pesquisadores e dos entes governamentais para reduzir o número de vítimas e os danos econômicos (Macherera; Chiambari, 2016). Cabe grande parte ao poder público fornecer uma conscientização pública adequada, considerando a ocupação de locais onde não são propícios o assentamento humano em função da exposição a ameaças naturais

e vulnerabilidade econômica e social, que pode levar as pessoas a conviverem com ameaças iminentes. Satria *et al.* (2017, p. 1045) afirmam que o governo tem papel fundamental na socialização e estímulo da conscientização por meio de programas de mídia e longa duração, além de estar preparado para fornecer um sistema de mitigação que possa fornecer informações ao público sobre a ocorrência de um desastre. Neste sentido, vários países fomentam políticas públicas de incentivo para instituições governamentais e privadas, engajadas em desenvolver ferramentas que possam reduzir o número de danos humanos, ambientais e também prejuízos econômicos e materiais (Mercado, 2016, p. 217).

Os alertas podem ser considerados como medidas não estruturais para preparação e mitigação de desastres, com potencial significativo em detectar com antecedência o início de processos com potencial de desencadear desastres. No que se refere à comunicação de risco, Mercado (2016, p. 217) e a ITU (2020) afirmam que as tecnologias de informação e comunicação exercem um importante papel nos sistemas de alerta multi-ameaças, que possibilitam o envio de mensagens de alerta para as pessoas nas áreas que podem ser afetadas e mais amplas em nível nacional ou internacional, o que lhes permite tomar medidas para mitigar os impactos dos desastres.

Constantemente em países com menor potencial econômico, essa comunicação antecipada de potenciais eventos críticos carece de infraestrutura para implementar iniciativas de sistemas de alertas, de forma adequada ou autônoma, pois esse processo requer na maioria das vezes capacitação de recursos humanos, além de recursos materiais, tecnológicos, científicos e financeiros (REAP, 2021).

Neste sentido, os telefones celulares também têm sido usados para enviar informações de emergência por meio de mensagem de texto, com vistas a disseminar informações rapidamente em várias situações de risco recentes ou na iminência de ocorrer algum tipo de evento de desastre (Bean *et al.*, 2016). A utilização de SMS continua sendo um potencial a ser explorado porque é simples, fácil de usar e tem um grande alcance territorial.

A tecnologia SMS apresenta baixo custo de implementação e com potencial resiliente em continuar em funcionamento durante catástrofes. Isso ocorre porque as torres GSM (*global system for mobile*) são instaladas frequentemente em maior quantidade e alcance, em áreas remotas e grandes extensões territoriais de forma autônoma. De modo diferenciado, os serviços de internet em geral estão concentrados em pólos tecnologicamente desenvolvidos e dependentes de equipamentos, rede lógica íntegra e alimentação de energia, que normalmente encontram-se prejudicados

ou inoperantes durante o acontecimento de um desastre (Falade *et al.*, 2017, p. 75).

De modo geral, os alertas disseminados por SMS exigem que o usuário realize um cadastramento prévio de seu aparelho de telefonia móvel no serviço de alerta. Quando o órgão responsável pela emissão dos alertas autoriza o envio à população, mediante seus protocolos de previsão, monitoramento e alerta, a informação é repassada até as operadoras de telefonia móvel disponíveis nesta região. Por meio de suas centrais de transmissão e torres de comunicação, o alerta por SMS chega aos dispositivos móveis cadastrados pelo usuário.

O uso da ferramenta de SMS pode auxiliar agentes de proteção civil, comunidades e atores envolvidos na comunicação dos alertas a se comunicarem por texto com praticamente qualquer usuário de telefonia móvel, celulares e *smartphones*, além de ser utilizado de forma combinada ou complementar com outros canais de comunicação. No que se refere ao desempenho do terceiro elemento chave dos sistemas de alerta, isto é a comunicação, o SMS pode aumentar drasticamente o desempenho dessa etapa e resultar em um maior alcance na preparação das pessoas e na capacidade de resposta a eventos de desastres.

A tecnologia SMS tem sido usada por alguns sistemas de alerta de desastres, como um dos métodos críticos e eficientes de comunicação, que podem informar as pessoas antecipadamente sobre algum tipo de desastre. A primeira iniciativa implementada que se utilizou o serviço de SMS integrado em sistema de alerta, ocorreu após um grande terremoto de magnitude 8,4 na escala Richter, que atingiu o Japão em novembro de 2006 (Kamigaishi *et al.*, 2009).

Em outubro de 2007 foi criada a *Earthquake Early Warning System - EEWS* (*Kinkyū Jishin Sokuhō*) gerenciada pela Agência Meteorológica do Japão (JMA, 2007). O EEWS é dividido em dois processos lógicos, o primeiro relacionado à detecção de terremotos e o outro com foco na disseminação de alertas.

Denominado como *Short Message Service Cell Broadcast*, o alerta é realizado pelo envio de mensagens de aviso público à população japonesa. O serviço de mensagens baseia-se em localização geográfica que pode enviar simultaneamente um aviso de texto em massa para todos os dispositivos móveis disponíveis em uma área terrestre ou por chamada de celular (Yamasaki, 2012).

Outra iniciativa interessante é a conduzida pelo *United Nation Development Programme - UNDP* (2013), por meio do programa *Strengthening Climate Information and Early Warning Systems for Climate Resilient Development and Adaptation to Climate Change*. Esse programa iniciou-se a partir de setembro de 2013 em toda a África, Ásia e área do Oceano Pacífico e visou

garantir a preparação e a resposta rápida aos desastres, usando serviços de SMS para integrar os componentes do conhecimento de risco, monitoramento e previsão para disseminar informações de alertas e adotar ações de resposta.

Outros organismos das Nações Unidas também têm atuado nesse tema. O projeto *Climwarn*, desenvolvido por meio da *United Nation Environment Program - UNEP* com parcerias de entidades em Burkina Faso, Gana e Quênia, teve o objetivo de substituir estações meteorológicas desatualizadas e inadequadas por sistemas atualizados, e utiliza o SMS como um dos meios de comunicação de risco à população, para reduzir o risco de desastres por meios de melhores práticas na disseminação de informações (Lumbroso, 2018, p. 531).

Também existem iniciativas conduzidas pelos próprios países. Na Indonésia, as inundações são ameaças que ocorrem com maior frequência, e exigem uma previsão meteorológica o mais antecipada possível e divulgação dessas informações a curto prazo. Devido a esse pouco espaço de tempo, o governo atualmente incentiva que instituições estatais e privadas participem nas ações para reduzir as inundações de forma conjunta, mediante o desenvolvimento de um sistema de alerta de desastres de inundação baseado em disseminação de alertas por SMS (Satria *et al.*, 2019, p. 4005). O ministério da saúde do país utiliza-se do sistema de alerta local por SMS, para desenvolver ações preventivas sanitárias e epidêmicas à população.

No panorama norte americano, por sua vez, a *Federal Emergency Management Agency - FEMA* proporciona serviços de mensagens de texto SMS e *multimedia message service (MMS)*, fornecido pelo poder público e parcerias com empresas. O MMS possui tecnologia e modelagem semelhante ao SMS, porém conta com recursos de envio de imagens e sons, que não é possível neste último. Por meio de uma plataforma de tecnologia e serviços associados fornecidos pela FEMA, empresas e entidades terceirizadas podem estar envolvidas na produção de alertas por meio de mensagens móveis com seus usuários, os quais podem se inscrever para receber mensagens em dispositivos sem fio mediante o serviço de SMS (Bean *et al.*, 2015, p. 63).

No contexto europeu, de acordo com a *European Emergency Number Association - EENA* (Vivier *et al.*, 2019, p.9), até 2022, os países que integram essa associação devem assegurar o desenvolvimento e implementação de sistemas de alertas público sobre emergências e desastres iminentes ou em desenvolvimento, que sejam considerados significantes a nível local. Os alertas públicos são transmitidos por provedores de serviços interpessoais baseados em telefonia celular e serviços de comunicação para usuários finais por SMS.

Na Polônia, por exemplo, Goniewicz e Burkle (2019, p. 2) relatam que a legislação nacional obriga as operadoras de telefonia móvel enviar mensagens de texto a todos os clientes dessas redes que se encontrem em determinadas localidades onde haja alto risco de desastres. Essas mensagens são desenvolvidas e disseminadas por SMS, para serem enviadas apenas em situações incomuns, quando houver uma ameaça imediata à saúde ou à vida.

Status mundial sobre os sistemas de alerta por SMS

A partir de pesquisa bibliográfica, limitada aos idiomas português, inglês e espanhol, foi possível identificar os países que utilizavam sistemas de alerta que utilizam a ferramenta SMS para a disseminação das informações à população no período de 2000 a 2021. Cerca de 51 países emitem SMS para alertar a população em seu território, o que representa cerca de 26,42% do total de 193 países em todo o mundo (fig. 2).

De acordo com os resultados da pesquisa, o continente asiático foi o que apresentou o maior número de países que aderem ao uso de SMS como meio de comunicação de alertas. Foram 19 do total de 49 países: Japão, Sri Lanka, Singapura, Turquia, Taiwan, Coreia do Sul, Filipinas, Emirados Árabes, Omã, China, Israel, Tailândia, Laos, Vietnã, Índia, Indonésia, Bangladesh, Líbano e Nepal.

Em seguida o continente europeu apresentou 18 países (do total de 50) dentre eles Alemanha, Áustria, Bélgica, Espanha, Finlândia, Grécia, Islândia, Itália, Holanda, Lituânia, Polônia, Portugal, Noruega, República Tcheca, Romênia, Suécia, Suíça e Reino Unido. Assim, quase 22% dos países que compõem a Europa possuem algum tipo de sistema de alerta que utilizam a tecnologia de SMS para informar a população, de maneira antecipada, a

possibilidade de ocorrências de eventos de desastres e emergências. Países como Alemanha, Bélgica, Espanha, Finlândia, Grécia, Holanda, Islândia, Lituânia, Noruega, República Tcheca, Romênia, Suécia e Suíça, apresentam sistemas de alertas que utilizam sistemas de alertas públicos (*Public Warning System*) e que utiliza ainda sistemas de sirenes, boletins informativos pela televisão, informações pela WEB (*World Wide Web*) e redes sociais.

O continente americano apresentou oito países (do total de 36), Chile, Estados Unidos, Canadá, Brasil, México, República Dominicana, Suriname e Peru. Considerando as subdivisões norte, central e sul, apresenta apenas 20% dos países que possuem sistemas de alertas com a utilização de alertas por SMS. Dentre os países que compõem esse percentual, Estados Unidos, Chile e Brasil demonstram sistemas de alertas mais robustos e que utilizam o SMS como um dos principais meios para realizar a comunicação de risco diante de desastres (fig. 3).

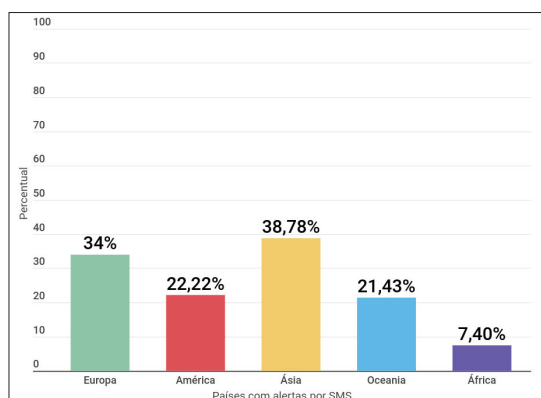


Fig. 3 - Percentual de cobertura dos sistemas de alertas por SMS nos continentes (Fonte: Resultado da pesquisa).

Fig. 3 - Percentage of SMS Early Warning System coverage on different continents (Source: Research result).

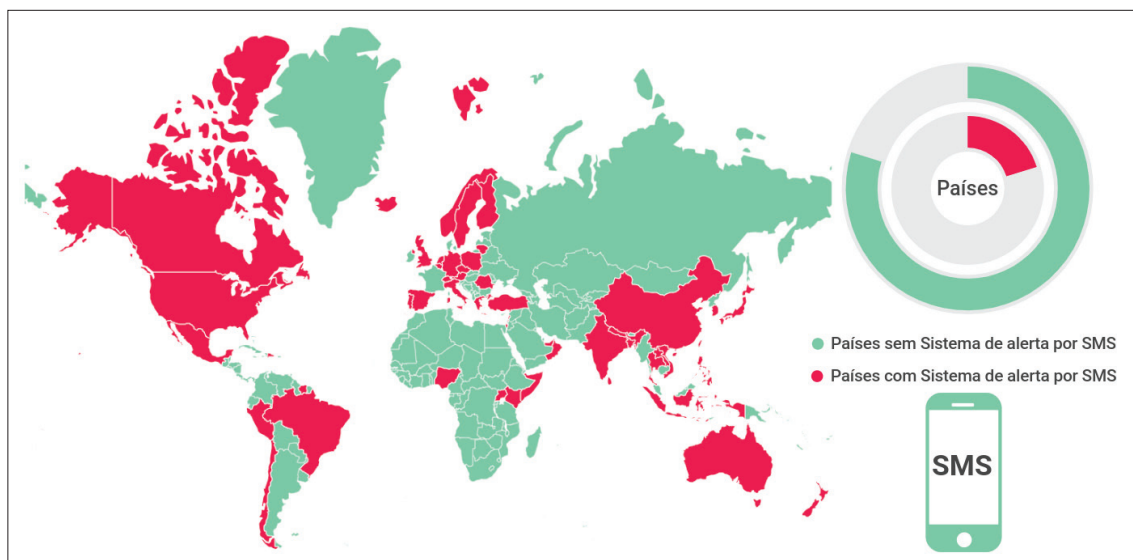


Fig. 2 - Distribuição do uso do SMS em sistemas de alertas de desastres identificados pela pesquisa (Fonte: Resultado da pesquisa).

Fig. 2 - Distribution of SMS use in disaster Early Warning Systems identified by the study (Source: Research result).

Também foi possível identificar que dentre as ameaças, que ensejam o monitoramento e previsão realizado pelos sistemas de alertas e que apresentam maior frequência na disseminação de alertas, foram os de origem meteorológica e hidrológica (baseada na classificação proposta pelo Center for Research on the Epidemiology of Disaster - CRED/EM-DAT). Os alertas de origem meteorológica representam quase 33% do monitoramento ou implementação de sistemas de alertas no mundo, seguido pelos eventos hidrológicos que alcançam o patamar de pouco mais de 27% (fig. 4).

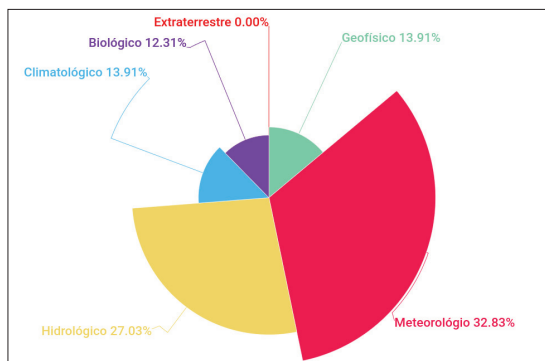


Fig. 4 - Percentual de ameaças naturais ocorridas em países usuários sistemas de alertas por SMS (Fonte: Resultado da pesquisa).

Fig. 4 - Percentage of natural hazards occurring in countries using SMS Early Warning System (Source: Research result).

As ameaças representadas pelos eventos geológicos e climatológicos, ambos ensejam o mesmo percentual, 13,91%, em relação aos sistemas de alertas implementados e identificados na pesquisa. Quanto aos eventos de origem extraterrestre que podem deflagrar desastres, no que se refere ao clima espacial e impactos advindos dessa natureza, não foram identificados na pesquisa nenhum sistema de alerta que realize tal monitoramento, previsão ou algum tipo de emissão de alerta.

Materiais e métodos

Para a análise do contexto brasileiro foi realizada consulta em base de dados oficiais do governo federal, organizada pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), órgão regulador do serviço de telefonia fixa e móvel em todo o país. A consulta realiza na base de dados tem o objetivo de verificar os Estados que fazem parte do sistema brasileiro de alerta de desastres e que realizam a comunicação de risco por meio de alertas por SMS e reflete as informações quantitativas sobre a aplicação do uso do SMS em alertas de desastres dentre o período de 2017 a 2021.

Após a pesquisa bibliográfica e documental sobre uso da tecnologia SMS como uma das formas de comunicação de risco, houve a organização das informações encontradas mediante tabelas e planilhas eletrônicas do programa Microsoft Office Excel 2010 e a produção de gráficos e recursos visuais utilizando aplicativos como *Canvas* e *Infogram*.

Resultados

A divulgação dos alertas SMS no Brasil

No Brasil, o processo de emissão dos alertas conta com diversos atores realizando a previsão, monitoramento e alerta (Silva *et al.*, 2017, p. 96). O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) é o órgão na esfera federal responsável por monitorar e emitir alertas sobre riscos de desastres, especificamente aqueles associados a movimentos de massa e eventos hidrológicos. O CEMADEN trabalha em parceria com outras instituições como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Departamento de Controle de Espaço Aéreo (DECEA) e centros estaduais de monitoramento meteorológico. De acordo com Marchezini *et al.* (2014, p. 299), outras agências federais como a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) subsidiam informações em relação aos dados hidrológicos e geológicos, além dos órgãos do executivo como o Ministério da Integração e Ministério das Cidades que realizam o levantamento das informações sobre a vulnerabilidade a desastres de determinadas regiões e as análises de risco (fig. 5).

Outros atores também contribuem para o aprimoramento do sistema de alerta nacional e o desenvolvimento científico tecnológico de monitoramento, previsão, comunicação e resposta diante dos alertas emitidos. Os institutos de pesquisa e as universidades realizam diversas pesquisas afetas ao sistema de alerta, de maneira multidisciplinar, que podem subsidiar o conhecimento científico, através de novas e melhores metodologias, mediante informações de bancos de dados atinentes aos desastres e criar produtos tecnológicos como mapas de risco e cartas de suscetibilidade.

A Portaria Conjunta n.º 148/2013 (BRASIL, 2013) prevê que os alertas produzidos pelo Cemaden sejam encaminhados ao Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), que por sua vez, é responsável pela articulação das informações para as Defesas Civas, ao Ministério da Saúde, Gabinete de Segurança Institucional (GSI).

O Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), por sua vez, realiza a recepção das informações dos órgãos federais e boletins informativos,

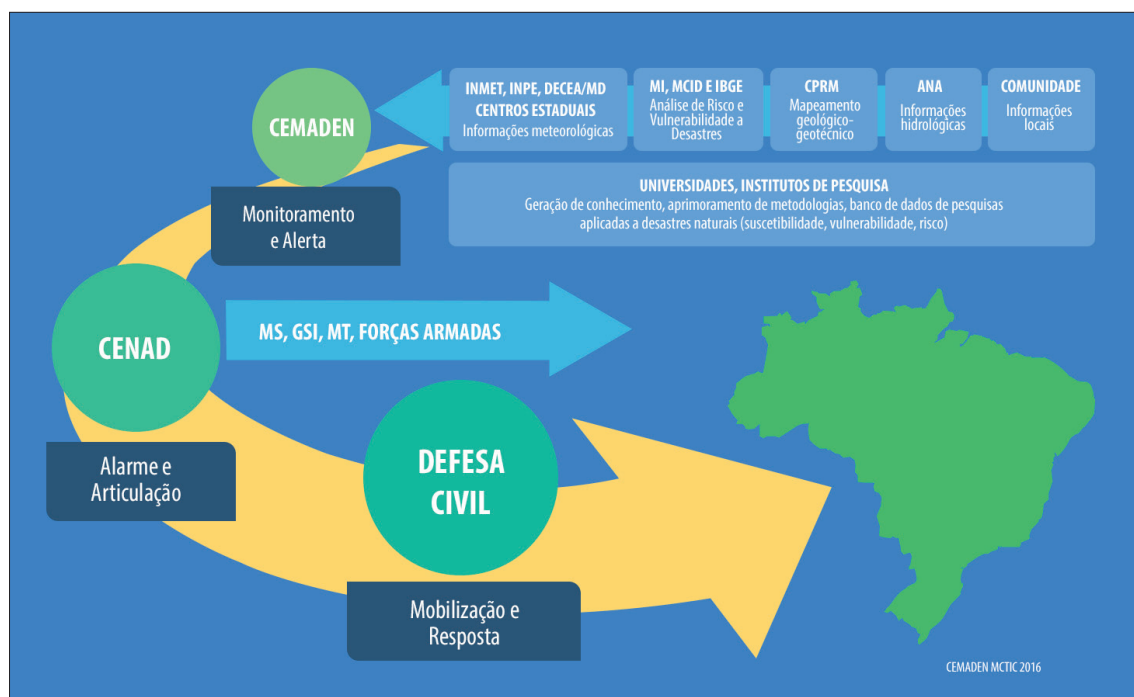


Fig. 5 - Fluxo de informações do sistema de alertas no Brasil (Fonte: Cemaden, 2019).

Fig. 5 - Brazilian Early Warning System information flow (Source: Cemaden, 2019).

e realiza a articulação entre a esfera federal e estadual. Os órgãos estaduais de Proteção e Defesa Civil recebem esses dados, utilizando sua estrutura regional e municipal para a difusão dos alertas à comunidade (Cunha *et al.*, 2019, p.51).

A Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC) é responsável pela gestão do serviço nacional de difusão de alertas de desastres no país. A partir do ano de 2017, a SEDEC disponibilizou serviço de alertas por SMS à população em parceria com a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), por meio da plataforma Interface de Divulgação de Alertas Públicos (IDAP). As pessoas interessadas em receber essas informações por meio de SMS, fazem um cadastro simples com seu código de endereçamento postal. Essa busca de novas alternativas tecnológicas para a emissão de alertas, tem o objetivo de alcançar o maior número de pessoas expostas aos riscos de desastres (BRASIL, 2021).

No contexto brasileiro foi possível identificar que no período analisado de 2017 a 2021, cinco Estados (Mato Grosso do Sul, São Paulo, Santa Catarina, Paraná e Rio de Janeiro), além do Distrito Federal, possuem sistemas de alertas a desastres que utilizam-se da ferramenta SMS para a comunicação de risco. Os Estados de Santa Catarina e Rio de Janeiro apresentam um alcance populacional de 7% com a emissão dos alertas por SMS, de acordo com os números apresentados na base de dados ANATEL, em fevereiro de 2022. Esses alertas apresentam informações relacionadas a desastres de natureza climatológica,

meteorológica, hidrológica e biológica. Também foi possível identificar alguns dados relativos ao alcance que cada Estado possui, em relação aos alertas por SMS, considerando a estimativa populacional publicada pelo IBGE (2022) (fig. 6).

Dentre os Estados que implementam o sistema de alerta por SMS, destacam-se Rio de Janeiro e Santa Catarina, onde o alcance dos alertas por SMS atinge 7% de toda a população presente em cada Estado, seguido pelo Distrito Federal com pouco mais de 6% da população e São Paulo com mais de 5% da população. Entretanto, quando analisada a quantidade de pessoas nos estados (milhão de pessoas), podemos verificar que São Paulo atinge um maior número de pessoas na emissão dos alertas por SMS. Logo na sequência, o Rio de Janeiro e posteriormente Santa Catarina.

Estados como São Paulo, Mato Grosso do Sul, Rio de Janeiro, Paraná e Santa Catarina realizam a disseminação de alertas por SMS. Em Santa Catarina, o Centro Integrado de Gerenciamento de Riscos e Desastres do Estado (CIGERD), vinculado à Defesa Civil estadual, realiza envios de mensagens via SMS à população catarinense por meio da Interface IDAP. Esse serviço está disponível para as pessoas que realizam o cadastro telefônico na plataforma, semelhante ao que ocorre na esfera federal. O CIGERD está localizado na capital Florianópolis, e conta com os serviços da Defesa Civil do Estado, onde são realizados a previsão e monitoramento de eventos climáticos e hidrometeorológicos, emissão de avisos e

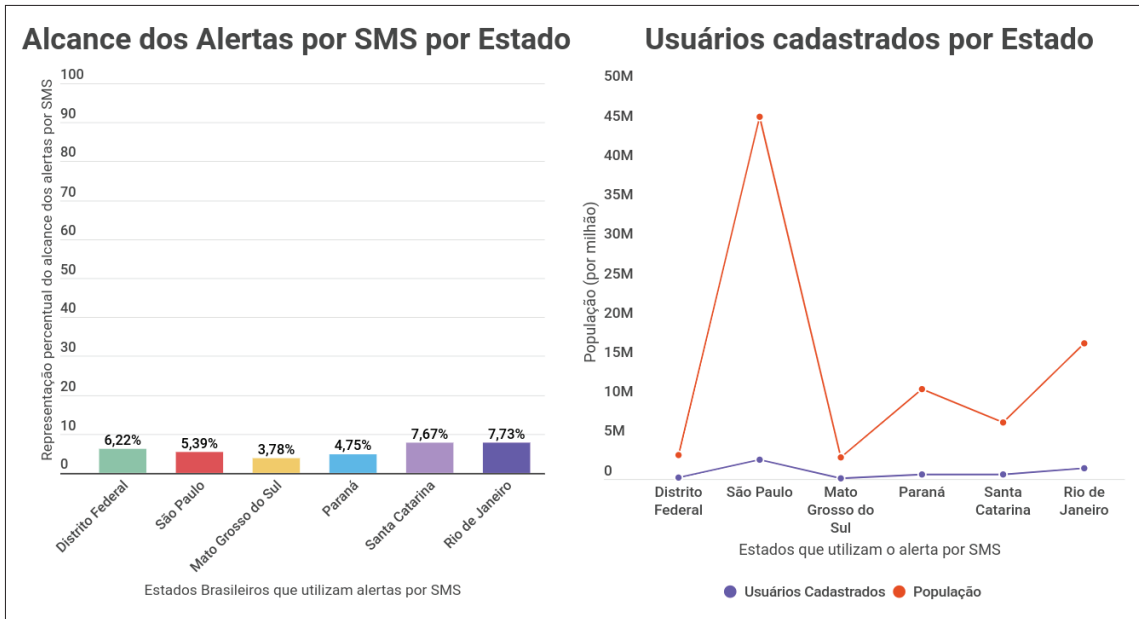


Fig. 6 - Atual cenário brasileiro do sistema de alerta por SMS (Fonte: Resultado da pesquisa).

Fig. 6 - Current Brazilian scenario of SMS Early Warning System (Source: Research result).

alertas, serviços de hidrologia, entre outras ações de proteção aos cidadãos, centralizando as informações (Vazquez, 2018, p. 72).

De acordo com a Defesa Civil de Santa Catarina (2021), o Estado iniciou o projeto piloto com 20 municípios selecionados de comum acordo entre a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, Coordenadores Regionais, Diretoria de Prevenção e técnicos de monitoramento de alerta. Também levou em consideração critérios apontados pela ANATEL em 2017, tais como o número total de habitantes desses municípios - deveriam atingir no mínimo 500 mil habitantes - além de considerar os municípios com pouca ou nenhuma estrutura de Defesa Civil e tipologia de eventos climáticos.

O projeto foi realizado inicialmente com aplicação da ferramenta teste em municípios piloto e após a fase de testes foi realizada a expansão do serviço para todo o Estado. O cadastramento foi realizado pelos próprios usuários do sistema de alerta, utilizando o código de endereçamento postal (CEP) e posteriormente emissão dos alertas por georreferenciamento utilizando as torres de telefonia móvel (SANTA CATARINA, 2021).

Na cidade do Rio de Janeiro, no Estado do Rio de Janeiro, o desastre ocorrido em fevereiro de 1996 levou à criação do Sistema de Alarme e Alerta (ALERTA RIO), com o objetivo de enviar alerta à população e órgãos municipais sobre o risco de fortes chuvas que podem desencadear inundações e deslizamentos na cidade (Dolif *et al.*, 2013, p. 1832). O sistema, desde a sua criação vem sendo aprimorado, e atualmente envia informações de previsão do tempo para o Sistema de Alerta Comunitário, que tem

como objetivo informar potenciais ações de evacuação de áreas de risco previamente identificadas.

Após as fortes chuvas que atingiram os municípios de Nova Friburgo e Petrópolis, região serrana do Estado do Rio de Janeiro, onde registrou-se cerca de 911 mortos e 35 mil pessoas desabrigadas, houve a iniciativa de implementar um sistema de alerta mais efetivo. Após esse marco, foi desenvolvido em 2012 o plano de emergência para a cidade do Rio de Janeiro (PEM-Rio), que estabelece objetivos para garantir a preservação da vida humana, dentre eles a criação de um canal gratuito para envio de alertas emitidos pelas operadoras de telefonia móvel por meio de SMS (Amoriam *et al.*, 2014).

Discussão

Ao longo desse estudo foi possível identificar que dentre os elementos-chave que compõem os sistemas de alerta de desastres, o eixo de Comunicação e Disseminação demonstra ser um grande desafio, não apenas no contexto brasileiro, mas também mundial. Segundo Khan *et al.* (2020) a comunicação de informações relativas à iminência de potenciais desastres é um requisito crítico de sucesso para reduzir substancialmente seus impactos, tanto em nível regional quanto nacional, pois garante que os alertas cheguem aos indivíduos e comunidades expostos e contribuam para o gerenciamento dos desastres.

Em vista disso, muitos países utilizam uma rede comunicação de alertas de múltiplos canais como forma de fortalecer e melhorar a disseminação das informações, com o objetivo de evitar falhas na entrega

de algum canal e manter redundâncias para assegurar que a informação seja recebida pelo público alvo (Kumar *et al.*, 2022). Deste modo, o Brasil pode ser considerado como um desses países que utiliza essa rede difusa de disseminação de alerta, considerando que o alerta por SMS é apenas um dos meios de comunicação empregado, de maneira integrada pelo IDAP. O sistema de alerta nacional, além do SMS, faz uso de outras formas de comunicação do alerta, disseminado via televisão por assinatura e pelo Google Alertas Públicos (BRASIL, 2021).

Segundo Kumar *et al.* (2022) a efetividade de um sistema de alerta em relação ao elemento chave comunicação e disseminação está intrinsecamente ligada com a diversidade de canais de comunicação, como mídia de massa, rádio, acesso e penetração de televisão e internet, redes móveis e canais locais e comunitários, pois sistemas de alertas baseados em rede única ou considerada não redundante pode estar indisponível ou não-funcional quando necessário ou durante os desastres (Khan *et al.*, 2020).

Nesse aspecto, o sistema de alerta nacional demonstra atender às boas práticas e recomendações internacionais, utilizando o alerta por SMS como meio de comunicação em massa e de baixo custo, por empregar redes de operadoras de telefonia móvel já implementadas pelo território brasileiro, de maneira integrada com os demais meios de comunicação articulado pelo IDAP. Ainda assim, segundo a Defesa Civil Nacional, foi implementado no ano de 2022 a divulgação de alertas por mídias sociais, por meio do aplicativo *Telegram* e é o primeiro país do mundo a realizar a entrega de alertas de desastres pela rede social *WhatsApp* (BRASIL, 2022).

Embora os alertas por SMS possam parecer uma excelente iniciativa de alertar o público em massa, em que qualquer pessoa que possua um dispositivo de telefonia móvel, independente da geração de tecnologia utilizada, receberá as informações sobre o desastres de forma rápida, simples e barata, é necessário indicar algumas limitações que tal ferramenta apresenta no Brasil e que podem afetar de maneira significativa a redução do risco de desastres.

Na Europa e na Ásia, grande parte dos sistemas de alertas que utilizam o SMS como um dos meios de disseminação de alertas de desastres e de emergências, utilizam a tecnologia *Cell Broadcast* nas redes de telecomunicações móveis devido à padronização utilizada nos países pertencentes a esses continentes (Vivier *et al.*, 2019). Esta tecnologia está disponível em todas as redes, desde o 2G até o 5G, os alertas são recebidos por todos os dispositivos conectados a essa rede em uma área de destino específica, ou seja, um sistema construído baseado na localização do usuário independente de cadastro ou adesão a qualquer tipo de serviço relacionado (GSMA, 2013).

No Brasil, para que as pessoas recebam os alertas emitidos por SMS pelo sistema de alertas nacional, é necessário que o usuário realize a adesão ao serviço de alertas por SMS, enviando uma mensagem de seu dispositivo de telefonia móvel, informando o código de endereçamento postal, o qual será utilizado para identificar a região que poderá ser afetada pelos desastres (BRASIL, 2021). Esse cadastramento prévio pode limitar a potencialidade que a ferramenta SMS apresenta bem como alcance de boa parte da população, uma vez que a iniciativa em receber tais informações depende quase que exclusivamente da percepção de risco que a população apresenta diante das ameaças existentes no seu ambiente. Marchezini *et al.* (2017) orientam que no sistema de alertas brasileiro a percepção de risco da população e dos gestores públicos têm forte influência no resultado das iniciativas de redução do risco de desastres.

Outro fator importante de se destacar, é que os alertas de SMS apresentam-se como uma estratégia de redução de risco de desastres inovadora no âmbito brasileiro, em que considera o risco o produto entre os elementos de vulnerabilidade e ameaça, seja ela implementada em um sistema de alerta comunitário ou de abrangência regional ou nacional (UNISDR, 2006). Embora para afirmar seu êxito e contribuição, seja necessário realizar a avaliação de sua aplicação de maneira científica, real e concreta, com vistas a ponderar todos os seus benefícios e deficiências de acordo com a realidade de cada país e dos sistemas de alertas existentes (ActionAid, 2006).

De fato, durante a pesquisa realizada, alguns documentos foram encontrados que remetem a resultados obtidos de avaliações específicas de sistemas de alerta que utilizam o SMS, realizadas em pequenas localidades de alguns países como Indonésia (Budi; Rokhman, 2012) e Sri Lanka (GSMA, 2013). Em relação ao Brasil não foi encontrada especificamente nenhuma avaliação do sistema de alerta utilizado no país sobre os alertas por SMS. Uma contribuição embrionária foi a publicação em 2021 de um guia prático sobre a utilização dos alertas bem como sua capacitação (BRASIL, 2021). Outras publicações tratam sobre temas correlatos, como avaliação dos usuários dos alertas do Cemaden (Saito *et al.*, 2019) ou das vulnerabilidades institucionais (Marchezini *et al.*, 2017).

De acordo com as pesquisas realizadas pela empresa inglesa *Telegrafia* (2016), os países com maior disponibilidade financeira utilizam os alertas por SMS como ferramenta de comunicação complementar aos demais meios de comunicação em seus sistemas de alertas, enquanto países com baixa disponibilidade de recursos apresenta essa ferramenta como única solução, o que pode ser considerado uma vulnerabilidade, face aos prejuízos humanos, patrimoniais, ambientais e econômicos ocasionados por desastres. Por conseguinte, apesar do Brasil não ter um grande destaque em relação

à redução dos riscos de desastres (UNDP, 2013), o país apresenta no momento da pesquisa uma expansão em seus meios de comunicação de alertas com uso de aplicativos (e.g. WhatsApp e Telegram), mas ainda fazendo uso de alertas disseminados por SMS.

No que se refere ao elemento chave monitoramento e previsão, grande parte dos sistemas de alertas asiáticos e europeus realizam o monitoramento das ameaças e realizam as estimativas de previsão por meio de órgãos técnicos especializados oriundos de seus próprios países (Vivier *et al.*, 2019; Khan *et al.*, 2020). Muitos países da América Central e África não dispõem de tecnologia necessária, como radares meteorológicos, telemetria em tempo real, para identificar determinados tipos de ameaças e em consequência disso apresentam dependência de informações de países que detêm tal aparato tecnológico (Villagrán De León, 2013). Neste aspecto, o sistema de alerta brasileiro realiza monitoramento de ameaças e previsão de desastres ainda pouco integrado, em que instituições públicas articulam as informações provenientes de diversos produtos tecnológicos e análises de risco (vulnerabilidade e ameaça) para realizar a produção de diferentes alertas meteorológicos, hidrometeorológicos, avisos etc. (Marchezini *et al.*, 2017).

Conclusões e recomendações

As mensagens de alerta trazem em seu conteúdo informações sobre ameaças iminentes que possuem grande potencial de causar desastres e devem chegar a todos os cidadãos, autoridades, instituições de segurança pública, assistência social e saúde, bem como organizações de resposta a emergências e principalmente as comunidades em risco. Diante disto as mensagens de SMS são um dos meios de comunicação de baixo custo e de grande capilaridade na sociedade brasileira e do mundo, considerando o avanço tecnológico e o número de adesão de pessoas que utilizam dispositivos de telefonia móvel em todo o globo (GSMA, 2020; ITU, 2020).

Apesar do baixo custo, os países com menor disponibilidade financeira ainda carecem de aplicação dessa tecnologia e muitos deles do próprio desenvolvimento de um sistema de alerta. Os recursos econômicos e a percepção sobre risco em desastres ainda têm forte influência na eficiência dos alertas e na decisão do emprego de tal ferramenta por muitos países, apesar dos resultados positivos alcançados pelos sistemas de alerta.

Outro fator de destaque é que na grande maioria dos países que utilizam o SMS como uma das formas de comunicação dos alertas, em conjunto com outras ferramentas de comunicação, como tv, rádio, boletins informativos e mídias sociais. O emprego de alertas públicos que interagem com outras plataformas de

comunicação de forma concomitante, é uma tendência dos países que apresentam uma maior frequência de desastres e uma melhor interface entre as autoridades públicas e a comunidade local (Vivier *et al.*, 2019).

O Brasil também acompanha a tendência mundial em associar os SMS com outros meios de comunicação. Cabe destacar que devido a grande extensão territorial brasileira, em relação aos países europeus e alguns asiáticos, os quais apresentam um maior número de aplicação do SMS em sistemas de alerta, é válida a comparação deste parâmetro.

A tecnologia SMS é uma ferramenta de grande potencial, pois tem uma menor vulnerabilidade à continuidade do serviço em relação aos demais meios de comunicação. No Brasil o emprego dessa tecnologia nos sistemas de alerta ainda é muito incipiente, por isso, recomenda-se que o uso dessa ferramenta seja ampliada exponencialmente a nível nacional, devido seu potencial significativo no alcance de pessoas e comunidades vulneráveis a ameaças naturais. Idealmente, sugere-se a implementação de um sistema de alerta precoce baseado em *Cell Broadcast* (CB), já que o alerta é enviado a dispositivos móveis de determinadas localidades independente de cadastro, interesse ou a percepção de risco que o usuário final possui. As informações sobre uma ameaça iminente ou uma emergência em curso tem o potencial de alcançar um maior número de segmentos ou mesmo toda a população.

Por fim, durante a pesquisa bibliográfica foi identificada a escassez de trabalhos acadêmicos e avaliações da aplicação da tecnologia SMS em boa parte dos países que a utilizam nos sistemas de alertas a desastres. A pesquisa utilizou em sua grande parte, relatórios de órgãos e entidades governamentais, para coletar informações sobre os sistemas de alerta e a utilização do SMS para a disseminação das informações. Deste modo recomenda-se o incentivo a pesquisas acadêmicas que tenham como foco esses sistemas de alerta como também os meios de comunicação utilizados para o compartilhamento das informações de risco.

Referências bibliográficas

- ActionAid, International ActionAid UK. (2006). Successful people-centred early warning systems: 10 essential ingredients. Prevention Web. 2006. Retrieved Apr 28, 2021 from https://www.preventionweb.net/files/4648_Peoplecentredearlywarningsystems-march06forbonnconference.pdf
- Amorim, M. F., Quelhas, O. L. G., & Motta, A. L. T. S. (2014). The resilience of cities across the torrential rains: Case study of the contingency plan of the city of Rio de Janeiro (Brazil) [Review of The resilience of cities across the torrential rains: Case study of the contingency plan of the city of Rio de Janeiro (Brazil)]. *Sociedade e Natureza*, 26, 519-534.

- Basher, Reid (2006). Global Early Warning System for Natural Hazards: systematic and people-centred. *Philosophical Transaction of The Royal Society A*, 364, 2167-2182.
- Bean, H., Liu, B. F., Madden, S., Sutton, J., Wood, M. M., & Mileti, D. S. (2015). The Study of Mobile Public WarningMessages: A Research Review and Agenda [Review of The Study of Mobile Public WarningMessages: A Research Review and Agenda]. *Review of Communication*, 15(1), 60-80.
- Bean, H., Liu, B. F., Madden, S., Sutton, J., Wood, M. M., & Mileti, D. S. (2016). Disaster warnings in your pocket: How audiences interpret mobile alerts for an unfamiliar hazard. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 24(3), 136-147.
- BRASIL, SECRETARIA NACIONAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL (2012). Classificação e Codificação Brasileira de Desastres. Retrieved from https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecaoe-defesa-civil-sedec/DOCU_cobrade2.pdf
- BRASIL (2021). PORTARIA CONJUNTA No - 148, DE 18 DE DEZEMBRO DE 2013. Retrieved from <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=24/12/2013&jornal=1&pagina=58&totalArquivos=168>
- BRASIL, MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (2021). *Alertas de Desastres*. Retrieved Juny 08, 2021, from <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecaoe-defesa-civil/alertas-de-desastres>
- BRASIL, DEFESA CIVIL NACIONAL (2022). Brasil é o primeiro país do mundo a enviar alertas de desastres da Defesa Civil pelo WhatsApp. Retrieved 15, 2022, from <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2022/11/brasil-e-o-primeiro-pais-do-mundo-a-enviar-alertas-de-desastres-da-defesa-civil-pelo-whatsapp>
- Budi, S., & Rokhman. (2012). Ewars - Early Warning Alert and Response System - Sms (Short Message Service). Based at Health Department of Purworejo District [Review of Ewars - Early Warning Alert and Response System - Sms (Short Message Service). Based at Health Department of Purworejo District]. *Australian Journal of Asian Country Studies*, 47-53.
- CRED | EM-DAT. (2009). Retrieved May 16, 2021, from <https://www.emdat.be/classification>
- Climate Adapt (2022) European Early Warning System. Evidence on climate and health. Retrieved Nov 23, 2022, from <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/observatory/evidence/health-early-systems/european-early-warning-systems>
- CTIA - CELLULAR TELECOMMUNICATIONS & INTERNET ASSOCIATION (2010). The Wireless Association® Announces Semi-Annual Wireless Industry Survey Results. [Review of The Wireless Association® Announces Semi-Annual Wireless Industry Survey Results.]. [https://\(https://api.ctia.org/wp-content/uploads/2022/09/Summary-of-CTIAs-Wireless-Industry-Survey-2010.pdf\)](https://api.ctia.org/wp-content/uploads/2022/09/Summary-of-CTIAs-Wireless-Industry-Survey-2010.pdf)
- Cunha, A. P. M. do A., Marchezini, V., Lindoso, D. P., Saito, S. M., & Alvalá, R. C. dos S. (2019). The challenges of Consolidation of a Drought-Related Disaster Risk Warning System to Brazil. *Sustentabilidade em Debate*, 10(1), 43-76. DOI: <https://doi.org/10.18472/sustdeb.v10n1.2019.19380>
- Di Giulio, G. M., Bedran-Martins, A. M., Vasconcellos, M. P., & Ribeiro, W. C. (2017). Climate change, risks and adaptation in the megacity of São Paulo, Brazil [Review of Climate change, risks and adaptation in the megacity of São Paulo, Brazil]. *Sustentabilidade em Debate*, 8(2), 75-87.
- Dolif, G., Engelbrecht, A., Jabotá, A., Silva, A.J.D., Gomes, J.O., Borges, M.R.S., Nobre, C.A., & Carvalho, P.V.R. (2013). Resilience and brittleness in the ALERTA RIO system: a field study about the decision-making of forecasters [Review of Resilience and brittleness in the ALERTA RIO system: a field study about the decision-making of forecasters]. *Natural Hazards*, 65, 1831-1847.
- Falade, A. J., Mohammed, O., Abdulrahman, A. Y., & Kadir, L. (2016). Tower sharing and the associated constraints in multi-operator GSM base transceiver station. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 11(3), 198. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijwmc.2016.10002155>
- Goniewicz, K., & Burkle, F. M. (2019). Disaster Early Warning Systems: The Potential Role and Limitations of Emerging Text and Data Messaging Mitigation Capabilities. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 13(4), 709-712. DOI: <https://doi.org/10.1017/dmp.2018.171>
- Goerlandt, F., Li, J., Reniers, G. (2022). The landscape of safety management systems research: A scientometric analysis. *Journal of Safety Science and Resilience*, 3(3), 189-208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2022.02.003>
- GSMA, GLOBAL SYSTEM MOBILE ASSOCIATION (2013) Mobile Network Public Warning System and Rise of Cell Broadcast (n.d.). *Disaster Response*. Retrieved Out 12, 2021. from <https://www.gsma.com/mobilefordevelopment/wp-content/uploads/2013/01/Mobile-Network-Public-Warning-Systems-and-the-Rise-of-Cell-Broadcast.pdf>

- GSMA, GLOBAL SYSTEM MOBILE ASSOCIATION (2013) Towards a Code of Conduct: Guidelines for the use of SMS in Natural Disasters (n.d.). *Souktel and The Qatar Foundation*. Retrieved Out 25, 2021, from <https://www.gsma.com/mobilefordevelopment/wp-content/uploads/2013/02/Towards-a-Code-of-Conduct-SMS-Guidelines.pdf>
- GSMA, GLOBAL SYSTEM MOBILE ASSOCIATION (2020) The Mobile Economy. (n.d.). *Representing the worldwide mobile communications industry*. Retrieved May 10, 2021, from <https://www.gsma.com/mobileeconomy/#regional>
- ITU - INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (2020). *World Telecommunication/ICT Indicators Database 2020* [Review of World Telecommunication/ICT Indicators Database 2020]. ITU-ICT Statistics, 24.
- JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY (2010). Earthquake Early Warning: How Can Earthquake Alert Be Announced Before Tremors Are Felt? URL: <http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/how.pdf>
- JICA - JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (2012). Estudio de Recopilación de Datos para el Sistema Integral de Información de Desastre y Sistema de Alerta Temprana. CTI Engineering International Co. Retrieved Agu, 21, from https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12067591_01.pdf
- Kamigaichi, O., Saito, M., Doi, K., Matsumori, T., Tsukada, S., Takeda, K., Shimouama, T., Nakamura, K., Kiyomoto, M., & Watanabe, Y. (2009). Earthquake Early Warning in Japan: Warning the General Public and Future Prospects [Review of Earthquake Early Warning in Japan: Warning the General Public and Future Prospects]. *Seismological Research Letters*, 80(5), 717-726.
- Khan, A., Gupta, S., Gupta, S.K. (2020). Multi-hazard Disaster Studies: Monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101642>
- Kodera, Y., Hayashimoto, N., Tamaribuchi, K., Noguchi, K., Moriwaki, K., Takahashi, R., Morimoto, M., Okamoto, K., Hoshiba, M. (2021). Developments of the Nationwide Earthquake Early Warning System in Japan After the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake. *Frontiers in Earth Science*. 9:726045. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.726045>
- Kumar, A., Speck, R.M., Honoré, C. (2022). Global status of multi-hazard early warning systems: Target G. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Retrieved Nov 28, 2022, from <https://www.undrr.org/publication/global-status-multi-hazard-early-warning-systems-target-g>
- Lappalainen, J. (2017). Overcoming Obstacles to Implementing SMS: Discussion Paper 2017-18. *International Transport Forum*. OECD/ITF.
- Lumbroso, D. (2017). How can policy makers in sub-Saharan Africa make early warning systems more effective? The case of Uganda. [Review of How can policy makers in sub-Saharan Africa make early warning systems more effective? The case of Uganda]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 27, 530-540.
- Macherera, M, Chambaril, M. (2016). A review of studies on community based early warning systems. *Jambá: Journal of Disaster Risk Studies*, 8. DOI: <https://doi.org/10.4102/jamba.v8i1.206>
- Marchezini, V., Londe, L. de R., Bernardes, T., Conceição, R.S. da, Santos, E.V. dos, Saito, . M., Soler, L.de S., Silva, A. E. P. da, Bortoletto, K. C., & Medeiros, M.das D. S. (2017). *Sistema de alerta de risco de desastres no Brasil: desafios à redução da vulnerabilidade institucional*. Rima.
- MBOX, Inc. (2010). *The Role of SMS in Business Communications*. Mobile Marketer. Retrieved May 18, 2021, from <https://pt.scribd.com/document/218936735/Role-of-SMS-in-Biz-Communication>
- Meier, P., Munro, Rob (2010). The Unprecedented Role of SMS in Disaster Response: Learning from Haiti. *SAIS Review* 30(2), 91-103. DOI: <https://doi.org/10.1353/sais.2010.0009>
- Mercado, R. J. M. (n.d.). *Design of wireless sensor networks using embedded Programmable System on Chip (PSoC) as applied to community based flood early warning systems*, 214-223.
- MHEWS - THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTI-HAZARD EARLY WARNING SYSTEM (2022). From Stock Take to Scale on Target G: Accelerating the Knowledge and Practice of MHEWS for Risk-Informed Resilience. Retrieved Ago 22, 2022, from <https://globalplatform.undrr.org/multi-hazard-early-warning-conference-iii>
- MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (n.d.). Alertas de Desastres. Retrieved Juny 08, 2021, from <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/alertas-de-desastres>
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (2020). Early Warning Systems. United Nations. Retrieved May 18, 2021, from <https://www.un.org/en/climatechange/climate-solutions/early-warning-systems#>
- REAP - RISK INFORMED EARLY WARNING PARTNERSHIP (2021). Framework for Action. Retrieved Jun 29, 2021, from <https://www.early-action-reap.org/reap-framework-action#:~:text=The%20Framework%20for%20Action%20of,Partnership%20between%20now%20and%202025>

- Saito, S. M. (2018). Vulnerabilidades no contexto de sistemas de alerta de risco de desastres. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 7, 618-630.
- Saito, S. M., Lima, G. R. T., Assis, M. C. A. (2019). Evaluation by the end-users of disaster risk warnings in Brazil. *Sustainability in Debate*, 10(2), 38-53.
DOI: <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v10n2.2019.24908>
- Samarajiva, R., & Waidyanatha, N. (2009). Two complementary mobile technologies for disaster warning. *Info*, 11(2), 58-65.
DOI: <https://doi.org/10.1108/14636690910941885>
- SANTA CATARINA, DEFESA CIVIL (2021.) *Municípios pilotos do projeto de alerta via SMS são definidos - Defesa Civil de SC*. Retrieved September 13, 2022 from <https://www.defesacivil.sc.gov.br/noticias/municipios-pilotos-do-projeto-de-alerta-via-sms-sao-definidos/>
- Satria, D., Yana S., Munadi R., & Syahreza, S. (2017). Prototype of Google Maps Based Flood Monitoring System Using Arduino and GSM Module. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(10), 1044-1047.
- Satria, D., Yana S., Yusibani, E., Syahreza, S., & Zufan. (2019). Implementation of the SMS Gateway in the Flood Early Warning Information System for Village Warning and Community Information. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8, 4005-4009.
- Silva, G.F.P., Belderrain, M.C.N., & Malere, J.P.P. (2017). Modelo de dinâmica de sistemas para emissão de alertas de desastres naturais - um estudo de caso. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, 9(18), 84-111.
- Tanaka, A. (2011). *Rewarding scientific knowledge for sustainable development*. UN Chronicle, 48(3), 18-19.
DOI: <https://doi.org/10.18356/8ac3a2f2-en>
- Telegrafia, Natural Disaster Warning System (2016). Mass Warning via SMS - Is it a good idea or not? *Telegrafia Documents*. Retrieved Dez 12, 2021, from <http://www.electronic-sirens.com/mass-warning-via-sms-good-idea-not/>
- UNDP - UNITED NATION DEVELOPMENT PROGRAMME (2013). *Climate Change Adaptation*. Retrieved May 20, 2021, from <https://www.adaptation-undp.org/strengthening-climate-information-and-early-warning-systems-climate-resilient-development>
- UNISDR - UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (2006). *Early Warning - From Concept to Action: the Conclusions of the Third International Conference on Early Warning (EWC III)*.
- UNISDR - INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015- 2030 (Versão em português não-oficial -31 de maio de 2015). (n.d.). https://www.unisdr.org/files/43291_63575sendaiframeworkportunofficialf%5B1%5D.pdf
- Villagrán de León, J. C., Pruessner, I., & Breedlove, H. (2013). Alert and warning frameworks in the context of early warning systems. A comparative review. *Intersections*, 12, Bonn Unu-Ehs, p.90.
- Vivier, B., Van Arun, C., Strume, H., Grangeat, A., Gomez, P. (2019). Public Warning Systems Update Version 3.0. Emergency Number Association. (3).
- WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2017). *Multi-hazard Early Warning Systems: A Checklist*. In Chairperson Publications Board.
- Yamasaki, E. (2012). What We Can Learn From Japan's Early Earthquake Warning System. *Momentum*, 1(1), Article 2. [http:// repository.upenn.edu/momentum/vol1/iss1/2](http://repository.upenn.edu/momentum/vol1/iss1/2)



RISCOS

territorium 31 (I), 2024, 124-125

journal homepage: <https://territorium.riscos.pt/numeros-publicados/>

DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_31-1_10

Notícia / New



MUITO ALÉM DA CHUVA: PRÁTICAS EDUCATIVAS NA ERA DOS DESASTRES.
VENCEDORA DO PRÊMIO CAPES DE TESE 2023 - MELHOR TESE DE ENSINO

Patricia Mie Matsuo

Pesquisadora da Universidade de São Paulo (Brasil)

Associação RISCOS e Membro do GIER - Grupo de Investigação em Educação para os Riscos

ORCID 0000-0002-9121-0542 patricia.matsuo@alumni.usp.br

Pontes entre instituições e pessoas sempre fazem meus olhos e minha alma brilharem. Desta vez, as conexões criadas durante minha trajetória acadêmica resultaram em conquistas impensáveis e surpreendentes.

A publicação “*Muito além da chuva: práticas educativas na era dos desastres*” (fig. 1) nasceu porque uma viagem de estágio de doutorado sanduíche (período de mobilidade internacional) não saiu como planejada. A pandemia de Covid-19 afetou as fronteiras dos países e me obrigou a buscar alternativas em um curto espaço de tempo. Por meio da relação entre as professoras Carla Juscélia de Oliveira Souza da Universidade Federal de São João del-Rei e Fátima Velez de Castro, fui acolhida na Universidade de Coimbra e tive a oportunidade de aprofundar os diálogos envolvidos nos caminhos da minha investigação de doutorado sobre as práticas escolares de educação em redução de riscos de desastres no Brasil.

Será que as escolas discutem os desastres no ensino? De que forma isso é abordado? Quais os desafios ao tratar desta temática emergente? Estas foram algumas das perguntas que guiaram a pesquisa longitudinal que analisou as 309 iniciativas inscritas nas quatro primeiras edições (2016 - 2019) da Campanha #AprenderParaPrevenir, coordenada pelo Programa Cemaden Educação do Centro Nacional de Monitoramento de Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), vinculado ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). A Campanha é uma iniciativa nacional a qual tenho a honra e orgulho de ser uma das co-criadoras e de ter coordenado quatro das sete edições realizadas até o momento.

Neste livro “*Muito além da chuva: práticas educativas na era dos desastres*”, editado a convite da Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança (RISCOS), trago o primeiro panorama nacional dos principais caminhos percorridos pelas escolas de todas as regiões do Brasil, com os destaques e os desafios a serem superados. Os resultados servem como subsídios para a criação e o fortalecimento de políticas públicas integradas, programas e projetos educativos em redução de riscos de desastres. O material completo pode ser acessado gratuitamente na página da RISCOS e o processo de construção da capa está descrito na revista [Climacom](#).

Ainda existe um longo caminho de articulação para garantir a inserção e formalização dessa temática na Educação Básica, nos processos de formação inicial e continuada de professores, assim como nos materiais de apoio permanente para o desenvolvimento dessas ações, mas os primeiros passos foram dados e espero que os resultados inspirem o desenvolvimento de futuras iniciativas e políticas públicas educativas pautadas na participação social, na equidade, na redução das desigualdades sociais e que fortaleçam na formação de crianças, jovens, adultos e idosos protegidos e preparados para esses eventos que se intensificam com a emergência climática.



Fig. 1 - Frontispício da obra
“Muito além da chuva: práticas educativas na era dos desastres”.

Fig. 1 - Frontispiece of the book
“Far beyond the rain: educational practices in the era of disasters”.

Edição especial

A parceria entre a RISCOS e o Programa Cemaden Educação possibilitou a produção de uma tiragem limitada da obra, impressa especialmente para compor os kits educativos da premiação da 7ª Campanha #AprenderParaPrevenir realizada em 2023 sob a temática Tempo de desastres: tempo de agir!

Ao total, 50 instituições participantes, entre escolas, defesas civis, universidades e coletivos e movimentos sociais, de todas as regiões do país receberão a obra no início de 2024.

“É uma alegria acompanhar o ciclo de construção do conhecimento: uma Campanha de Educação em Redução de Riscos de Desastres uniu a prática - ações educativas das escolas em/ com suas comunidades - e a pesquisa acadêmica sensível. O livro Muito além da chuva potencializa novas práticas e mais pesquisas aplicadas” (Rachel Trajber - Coordenadora do Programa Cemaden Educação (fot. 1)).



Fot. 1 - Patricia Matsuo com o prêmio e Rachel Trajber com o exemplar do livro *Muito além da chuva* (Fotografia de Rosana Louro Ferreira Silva, tirada a 14/12/2023).

*Photo 1 - Patricia Matsuo with the award and Rachel Trajber with a copy of the book *Muito além da chuva* (Photograph by Rosana Louro Ferreira Silva, taken on 14/12/2023).*



Reconhecimento da pesquisa

Sob orientação da Professora Rosana Louro Ferreira da Silva do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo (USP), a pesquisa foi finalista do Prêmio Tese Destaque USP 2023 e foi agraciada pelo **Prêmio CAPES de Tese 2023** como a melhor tese na área de Ensino. A entrega do prêmio ocorreu na sede da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) em Brasília no final de 2023 (fot. 2 e 3).



Fot. 2 - Cerimônia de entrega do Prêmio Capes de Tese 2023. Ao fundo, Mercedes Bustamante - Presidente da CAPES, mostra o livro *Muito além da chuva* ao representante do CNPq (Fotografia de CGCOM/CAPES Naiara Demarco, tirada a 14/12/2023).

*Photo 2 - Prêmio Capes de Tese 2023 Ceremony Award. In the background, Mercedes Bustamante - President of CAPES, shows the book *Muito além da chuva* to the CNPq representative (Photograph by CGCOM/CAPES Naiara Demarco, taken on 14/12/2023).*

“Um filme passou pela cabeça de tudo o que passei nesses últimos anos. Esta noite indescritível foi repleta de emoções, quebra de protocolos e celebração com pessoas que fazem parte da minha caminhada! Me sinto honrada de ter tido minha tese premiada na área de Ensino e dedico esta importante conquista a todas professoras e professores que mesmo com as dificuldades estruturais do sistema educativo, criaram práticas sobre prevenção e redução de riscos de desastres”

Este é um prêmio coletivo, pois leva junto a temática de redução de riscos de desastres, o Cemaden, a Campanha #AprenderParaPrevenir, as práticas escolares inspiradoras, o Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências, o Grupo de Pesquisa em Educação Ambiental e Formação de Educadores (GPEAFE) e a Universidade de São Paulo.

Fot. 3 - Vista panorâmica do encerramento da cerimônia de premiação, com as autoridades e os premiados (Fotografia de CGCOM/CAPES Naiara Demarco, tirada a 14/12/2023).

Photo 3 - Panoramic view of the closing of the awards ceremony, with the authorities and the winners (Photograph by CGCOM/CAPES Naiara Demarco, taken on 12/14/2023).



XVI ENCONTRO NACIONAL DE RISCOS.
EDUCAÇÃO PARA O RISCO: PRÁTICAS E PROJETOS

Fernando Félix

Universidade de Coimbra
Núcleo de Investigação Científica de
Incêndios Florestais (Portugal)

ORCID 0000-0001-8509-6010 ffelix@fl.uc.pt

Fátima Velez de Castro

Universidade de Coimbra, NICIF, CEIS20 e RISCOS
Faculdade de Letras, Depart. de Geografia e Turismo (Portugal)
ORCID 0000-0003-3927-0748 velezcastro@fl.uc.pt

João Luís Fernandes

Universidade de Coimbra, CEIS20 e RISCOS
Faculdade de Letras, Depart. de Geografia e Turismo (Portugal)
ORCID 0000-0002-9419-631X jfernandes@fl.uc.pt

A RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, promoveu, com o Departamento de Geografia e Turismo, da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra (FLUC), e demais parceiros institucionais, o XVI Encontro Nacional de Riscos, que decorreu nos dias 10 e 11 de novembro de 2023, na Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.

À semelhança do que tem vindo a ser desenvolvido em anos anteriores, a Associação RISCOS, decidiu manter o mote “aprender com o passado”, tendo em conta uma efeméride enquadrada na temática das ciências cindinicas. Achou-se que teria todo o cabimento dedicar o XVI Encontro Nacional de Riscos ao tema da educação, pela necessidade de responder a duas dimensões prementes; por um lado, consolidar uma das linhas de atuação que tem vindo a ser desenvolvida desde há muito, a da educação para os riscos; por outro, celebrar a efeméride dos 30 de um projeto marcante nas escolas portuguesas, o PROSEPE - PROjeto de Sensibilização e Educação da População Escolar (fot. 1).

Sob o mote “Educação para o Risco: Práticas e Projetos”, reunimos neste encontro investigadoras/es, professoras/es, estudantes, agentes educativos, operacionais, técnicos e sociedade civil, com o propósito de refletir sobre o papel da escola portuguesa no domínio da educação para os riscos, colocando em diálogo agentes educativos que representam perspectivas pedagógicas diferenciadas, pois a educação constitui uma das mais importantes e poderosas ferramentas na construção de novos conceitos, na mudança de hábitos e no diálogo intergeracional.

O XVI Encontro Nacional de Riscos foi acreditado pelo Conselho Científico-Pedagógico da Formação Contínua (CCPFC), como ação de formação para professores, na modalidade de Cursos de Formação de Atualização: Colóquios, congressos, simpósios, jornadas ou iniciativas congêneres, com a carga horária de 12,5 horas, presenciais, que releva, para o previsto nos artigos 8.º e 9.º do RJFC, para os grupos de docência 230 - Matemática e Ciências da Natureza, 420 - Geografia, 510 Física e Química, 520 - Biologia e Geologia.



Fot. 1 - Alguns exemplos de alunos dos Clubes da Floresta da Rede PROSEPE nas suas atividades.

Photo 1 - Some examples of students from the PROSEPE Network Forest Clubs in their activities.

Desta forma o Encontro começou, no dia 10/11/2023, com um workshop, baseado na análise fílmica de uma obra, que atravessa as territorialidades da infância em diferentes regiões do mundo, com os seus riscos e vulnerabilidades, da metrópole São Paulo à China contemporânea; da Sérvia às crianças-soldado na África Subsariana; de Nova Iorque a Nápoles. Serve esta perspectiva diferenciada dos contextos em análise, para introduzir temas associados à dimensão social e antrópica do risco, tendo em atenção uma escala global que se irá estreitando até à discussão que se pretende fazer, em torno do panorama e dos desafios do caso português. Houve uma reflexão alargada sobre a dimensão cindínica presente em vários referenciais escolares, assim como de avaliar o contributo da ciência geográfica para a educação para os riscos (fot. 2).



Fot. 2 - Vista geral do workshop para professores, com a moderação do Prof. Doutor João Luís Fernandes.

Photo 2 - Overview of the workshop for teachers, moderated by Professor Doctor João Luís Fernandes.

O XVI Encontro Nacional e Riscos, propriamente dito, decorreu no dia 11/11/2023, no anfiteatro IV da FLUC, estando uma sala bem composta (fot. 3), em que a sessão de abertura foi apresentada pela Prof.^a Doutora Fátima Velez de Castro, Professora Auxiliar da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, cuja mesa foi presidida pelo Prof. Doutor João Luís Fernandes em representação do Diretor da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra e composta pela Dr.^a Ana Cortez Vaz, Vereadora e em Representação do Presidente da Câmara Municipal de Coimbra, Prof. Doutor Alfredo Dias, Vice-Reitor da Universidade de Coimbra e Prof.^a Doutora Adélia Nunes, Diretora do Departamento de Geografia e Turismo da FLUC (fot. 4).



Fot. 3 - Aspeto geral da sala.

Photo 3 - General appearance of the room.



Fot. 4 - Vista geral da composição da mesa de abertura.

Photo 4 - General view of the opening table composition.

Um dos pontos altos do Encontro foi a conferência de abertura, intitulada “PROSEPE - PROJeto de Sensibilização e Educação da População Escolar, o que foi e o que deveria ser!”, proferida pelo Prof. Doutor Luciano Lourenço, Professor Catedrático (Jubilado) da Universidade de Coimbra e ex-Coordenador Nacional do PROSEPE, com a moderação da Prof.^a Doutora Adélia Nunes (fot. 5).



Fot. 5 - Pormenor da conferência de abertura, proferida pelo Prof. Doutor Luciano Lourenço.

Photo 5 - Detail of the opening lecture, given by Professor Luciano Lourenço.

A Educação desempenha, por isso, um papel basilar e estruturante na implementação de mecanismos que conduzem a cidadãos melhor preparados e a sociedades mais resilientes, contribuindo para a crescente consciencialização do risco e a perceção do perigo. Desta forma, outro ponto marcante deste Encontro foi a mesa redonda “30 anos desde o início do PROSEPE: recordar o passado para preparar o futuro”, em que contou com a participação de antigos professores ligados ao PROSEPE, Coordenadores Distritais, Coordenadores de Clubes da Floresta e de entidades parceiras, que deram o seu notável testemunho, nomeadamente:

- Coronel Eng.º Alberto Maia e Costa, ex-Coordenador Nacional da CNEFF - Comissão Nacional Especializada de Fogos Florestais, que moderou a sessão (fot. 6a);
- Dr.ª Maria da Graça Lourenço, ex-Coordenadora Pedagógica do PROSEPE (fot. 6b);
- Dr.ª Cristina Maria Rodrigues Ferreira, ex-Coordenadora Distrital de Viseu e ex-Prof.ª Coordenadora do Clube da Floresta: Raposinhos (fot. 6c);
- Dr.ª Maria Dalila Oliveira Reis, ex-Coordenadora Distrital Adjunta de Aveiro e ex-Prof.ª Coordenadora do Clube da Floresta: Hedera helix (fot. 6d);
- Dr.ª Margarida Gonçalves, Ex-Coordenadora Distrital de Lisboa e ex-Prof.ª Coordenadora do Clube da Floresta: Falcões do Estoril (fot. 6e).



Fot. 6 - Aspeto da Mesa Redonda 1.

Photo 6 - The Round Table 2.

A tarde iniciou-se com a sessão de poster, em que se deu a conhecer práticas educativas em vários domínios e espaços, como a sala de aula, grupo disciplinar, escola e outras instituições, sobre a temática da educação para os riscos, com a apresentação de 24 trabalhos em formato de poster (fot 7).



Fot. 6 - Vista da sessão dos posters.

Photo 6 - View of the Poster session

De seguida realizou-se a mesa redonda “Educar para o Risco: o panorama e os desafios no contexto português”, que foi moderada pela Prof.ª Doutora Fátima Velez de Castro (fot. 7a), Presidente da Direção da Associação RISCOS, Coordenadora do GIER - Grupo de Investigação em Educação para os Riscos, e que contou com a palestra “A Biodiversidade e o Fogo”, proferida pela Prof.ª Doutora Helena Freitas (fot. 7b), Professora Catedrática da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e autora do Referencial de Educação Ambiental para a Sustentabilidade, e da palestra intitulada “Referencial de Educação para a Segurança, a Defesa e a Paz. Processo de implementação”, proferida pelo CMG José Miguel Picoito (fot. 7c), Assessor Militar do Instituto da Defesa Nacional.



Fot. 7 - Aspeto da Mesa Redonda 2.

Photo 7 - The Round Table 2.

Por fim a conferência de encerramento, intitulada “A educação geográfica e a educação para os riscos”, proferida pelo Prof. Doutor Sérgio Claudino, Prof. Auxiliar do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa e Coordenador do PROJETO NÓS PROPOMOS!, com a moderação do Prof. Doutor João Luís Fernandes (fot. 8).



Fot. 8 - Pormenor da conferência de encerramento, proferida pelo Prof. Doutor Sérgio Claudino.

Photo 8 - Detail of the closing conference, given by Professor Sérgio Claudino.



O Encontro terminou com a sessão de encerramento que foi presidida pela Prof.^a Doutora Fátima Velez de Castro, Presidente da Direção da RISCOS e Diretora do Centro de Formação de Professores da RISCOS, secundada pelo Prof. Doutor João Luís Fernandes, Professor Auxiliar da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra e pelo Prof. Doutor Luciano Lourenço, Professor Catedrático (Jubilado) da Universidade de Coimbra e ex-Coordenador Nacional do PROSEPE (fot. 9).



Fot. 9 - Aspeto da mesa da sessão de encerramento, durante a intervenção da Prof.^a Doutora Fátima Velez de Castro.

Photo 9 - Detail of the closing conference, given by Professor Fátima Velez de Castro.

Congratulamo-nos em se ter associado ao XVI Encontro Nacional de Riscos, uma vasta audiência, com destaque para os cerca de 40 Professoras e Professores que realizaram o curso de formação contínua, tendo considerado este evento para atualizar os seus conhecimentos. Todavia, gostaríamos de dar destaque aos cerca de 30 jovens alunas/os do Mestrado em Ensino de Geografia no 3º Ciclo do Ensino Básico e Ensino Secundário, que também participaram contexto de formação inicial. São estas/es jovens que representam o futuro da educação em Portugal e em quem depositamos a esperança de que ajudem a construir um futuro melhor no domínio da educação em Portugal. Desejamos que levem do XVI Encontro Nacional de Riscos, sementes para plantar, fazer germinar, cuidar e conservar na lógica do que o PROSEPE sempre defendeu para a floresta, para a escola e para a sociedade.





XVII ENCONTRO NACIONAL DE RISCOS

Fernando Félix

Universidade de Coimbra

NICIF - Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais (Portugal)

ORCID 0000-0001-8509-6010 ffelix@fl.uc.pt

João Luís Fernandes

Universidade de Coimbra, CEIS20 e RISCOS

Faculdade de Letras, Departamento de Geografia e Turismo (Portugal)

ORCID 0000-0002-9419-631X jfernandes@fl.uc.pt

A Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança (RISCOS), em colaboração com o Departamento de Geografia e Turismo, da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra (FLUC), e demais parceiros Institucionais, tendo como mote os **50 anos do 25 de abril de 1974**, está a organizar o **XVII Encontro Nacional de Riscos**. O evento será subordinado ao tema “*Riscos, Proteção Civil e Cultura de Segurança: Discursos e Práticas no Portugal Democrático*”, a decorrer presencialmente no dia 7 de junho de 2024, na Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.

A ocasião do cinquentenário é uma oportunidade para fomentar um diálogo profícuo entre docentes, a comunidade científica, os agentes de proteção civil, os órgãos de soberania regionais/locais e a população em geral. A partir de uma perspetiva interdisciplinar e das dinâmicas de Portugal após a Revolução de 25 de Abril de 1974, este encontro terá como foco a relação entre os sistemas políticos, os discursos e as práticas nos domínios dos riscos e da segurança, com a problematização dos efeitos da democratização do regime político e das mudanças institucionais operadas em áreas como a educação, a cidadania, os riscos e o desenvolvimento de um poder local eleito, entre outros aspetos.

Convidam-se à participação neste evento: Professores; Investigadores de Instituições de Ensino Superior; Agentes de Proteção Civil (Bombeiros, Forças de Segurança, Forças Armadas, ...); Técnicos e Profissionais dos diversos organismos, públicos e privados; Estudantes de doutoramento, mestrado e licenciatura; Membros das comunidades civil e de associações e/ou organizações não-governamentais; Outros interessados que atuem dentro da temática “*Riscos, Proteção Civil e Cultura de Segurança*”.

A participação pode concretizar-se através da apresentação de comunicações em posters, integradas nos 5 painéis temáticos, ou participando na discussão



Fig. 1 - Reprodução do cartaz de divulgação do XVII Encontro Nacional de Riscos.

Fig. 1 - Reproduction of the poster of the XVII National Meeting of Risks.

e reflexão sobre a sociedade e o território no contexto dos novos conflitos, riscos e crises e da diversificação das valências de resposta nos domínios da proteção civil, socorro e segurança.

A informação atualizada acerca do Encontro pode ser consultada na página web oficial: <https://xviiennr.riscos.pt>.

Contamos consigo no XVII Encontro Nacional de Riscos!

OPEN CHANNEL HYDRAULICS, RIVER HYDRAULIC STRUCTURES AND FLUVIAL GEOMORPHOLOGY:
FOR ENGINEERS, GEOMORPHOLOGISTS AND PHYSICAL GEOGRAPHERS

131

Francisco Silva Costa

Universidade do Minho, CECS e RISCOS (Portugal)

Instituto de Ciências Sociais, Departamento de Geografia

ORCID 0000-0001-7041-7811 costafs@geografia.uminho.pt

Em 2018, Artur Radecki-Pawlik, Stefano Pagliara, Jan Hradecký e Erik Hendrickson lançaram a obra coletiva *“Open Channel Hydraulics, River Hydraulic Structures and Fluvial Geomorphology”* publicada pela Routledge, com 508 páginas, distribuídas por 24 capítulos e mais de 50 autores. Especialistas de diferentes áreas (Engenharia, Geografia, Ambiente, Ecologia) provenientes de universidades e centro de investigação de diferentes latitudes apresentam as suas pesquisas sobre diferentes temas da Geomorfologia fluvial, hidrologia e hidráulica. Esta obra foi considerada como um dos melhores “Best Geomorphology Books of All Time” sendo premiada pela Book Authority, conforme apresentado pela CNN e Forbes em 2020.

A ideia do livro centra-se sobre práticas e noções básicas de hidráulica e geomorfologia fluvial, engenharia fluvial, gestão de bacias hidrográficas e recursos hídricos. São assim considerados temas que incluem princípios de hidráulica de canais abertos, estruturas hidráulicas em rios, conceitos de ecoidrologia, transporte de sedimentos e modelação do escoamento fluvial. É evidente nesta obra o vínculo ao conhecimento teórico e prático de pessoas que trabalham com rios e estruturas hidráulicas, numa relação científica com a geomorfologia fluvial.

Com princípios de geomorfologia fluvial, medições de parâmetros fluviais em campo e mudanças contemporâneas do corredor fluvial, este livro é direccionado a geomorfólogos fluviais, engenheiros hidráulicos, hidrólogos, geógrafos físicos, geofísicos e gestores de recursos hídricos e constitui um excelente guia para profissionais, académicos e estudantes. Trata-se por isso de uma obra que se enquadra perfeitamente no tema deste número da revista *“Riscos Hidrogeomorfológicos e seus impactes Socioambientais”*, com trabalhos que discutem a potência de fluxos e levantamentos geomorfológicos, a influência antrópica em riachos e rios de montanha, as inundações, com base na análise do fenómeno e modelação, a influência dos incêndios nas bacias hidrográficas e as bases da hidrobiologia para engenheiros hidráulicos e geógrafos.

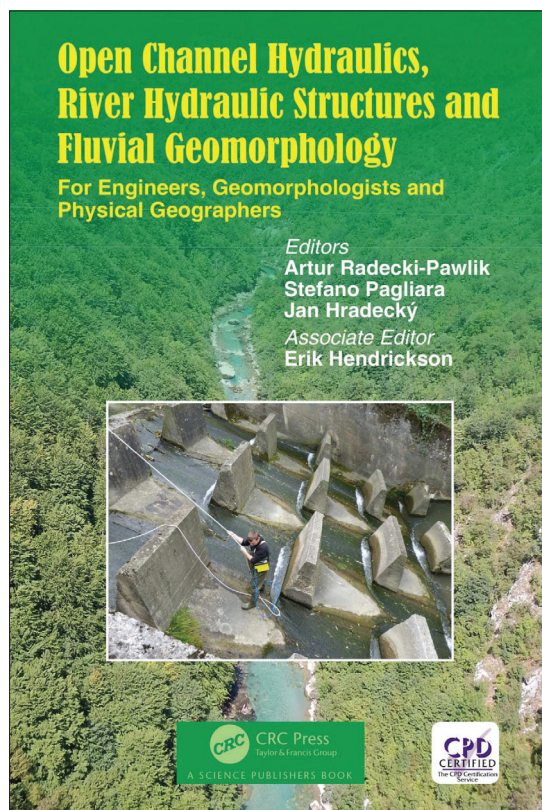


Fig. 1 - Frontispício da obra “Hidráulica de Canal Aberto, Estruturas Hidráulicas Fluviais e Geomorfologia Fluvial: Para Engenheiros, Geomorfologistas e Geógrafos Físicos”.

Fig. 1 - Frontispiece of the book *“Open Channel Hydraulics, River Hydraulic Structures and Fluvial Geomorphology: For Engineers, Geomorphologists and Physical Geographers”*.

Temos assim vários capítulos que podemos organizar com base nas ciências da geomorfologia (*“Selected Principles of Fluvial Geomorphology”*; *“On measurements of fluvial geomorphology parameters in the field”*; *“Slope Stability Basic Information”*; *“Mountain Slopes Protection and Stabilization after Forest Fires in Mediterranean Areas Research Developed in Mountain Areas in Portugal”*), hidrologia fluvial (*“Basics of Hydrology for Streams and Rivers”*; *“Basics of River Flow Modelling”*; *“Human*

Impact on Mountain Streams and rivers”; “Introduction to Floods analysis and Modelling”; “Application of Remote Sensing and the GIS in Interpretation of River Geomorphic Response to Floods”) e hidráulica (“Principles of Hydraulics of Open Channels”; “Hydraulics of Selected Hydraulic Structures”; “Hydrodynamics of River Structures Constructed with Natural Materials”; “Understanding the past of rivers reading the history of rivers from Documents and Maps”; “Geomorphology and Hydraulics of Steep Mountain Channels”; “Changes of Mountain river Channels and their environmental effects”; “Sediment Transport and Channel Morphology Implications for Fish Habitat”; “Sediment Yield in Different Scales in a Semiarid Basin the Case of the Jaguaribe river, Brazil”; “Hydraulic Calculations for Fish Passes”; “Weir Classifications”; “Block Ramps A Field Example”; “River Embankments”; “Bed Shear Stresses and Bed Shear Velocities Ubiquitous Variables in River Hydraulics”; “Gene Expression Programming in Open Channel Hydraulics”). Diferentes abordagens, umas mais conceptuais, outras mais metodológicas, apresentam-se a partir de reflexões teóricas, ou então do trabalho de campo realizado em diferentes regiões do mundo, com recurso ao uso de ferramentas como a modelação, os SIG e a cartografia.

Os autores Stefano Pagliara e Michele Palermo debatem os princípios básicos da hidráulica de canal aberto aplicados aos fenómenos mais comuns que estão incluídos no capítulo de Hubert Chanson e Stefan Felder sobre as estruturas hidráulicas e a interação com o escoamento superficial, para auxiliar a mitigação de inundações, a proteção costeira ou a melhoria e controlo de fluxos em rios. Por sua vez, Blake Tullis concentra-se especificamente sobre os açudes tradicionais, normalmente usados como estruturas de controlo de fluxo e/ou medição de fluxo em rios, canais e reservatórios.

Novas abordagens são apresentadas, como é o estudo de Kohji Michioku sobre o uso e manejo da vegetação ciliar como estrutura natural para prevenir desastres de inundações, controlar fluxos, sedimentação e fornecer vários serviços ecossistémicos. Apesar da significativa atividade de pesquisa, ainda há muito trabalho a ser feito para compreender os complexos sistemas inter-relacionados entre hidrodinâmica fluvial, processos e o ecossistema.

Václav Škarpich dá seu contributo focando-se na abordagem metodológica da análise morfológica, pesquisa fluvial e o uso do mapeamento de campo geomorfológico fluvial demonstrando que esboços e

mapas de paisagens fluviais e acidentes geográficos foram e são métodos fundamentais para analisar e visualizar características superficiais e próximas à superfície. Por sua vez, Tomasz Dysarz destaca a utilização bem-sucedida de modelos matemáticos na implementação da Directiva Europeia sobre Inundações.

O livro contempla também ambientes fluviais de montanha como o caso apresentado por Elżbieta Gorczyc, Kazimierz Krzemień, Maciej Liro e Mateusz Sobucki sobre a complexidade e os elevados níveis de energia destes sistemas fluviais e como causam dificuldades em compreender a resposta à intervenção humana. A propósito do desmatamento das florestas, Joanna Korpak realça a suscetibilidade dos canais dos rios de montanha a este tipo de intervenção devido à natureza única do material transportado.

Os riscos geomorfológicos são mais especificamente abordados por Tymoteusz Zydrón, Anna Bucala-Hrabia, Andrzej Gruchot e Veronika Kapustova, com exemplos de movimentos em massa sobre encostas naturais estruturas de engenharia artificiais e os respetivos impactes na paisagem.

Realçamos dois trabalhos de autores portugueses. Com base em fontes documentais de arquivos históricos, Francisco Costa, Antonio Vieira e Bento Gonçalves mostram o contributo destas para compreender a dinâmica fluvial de muitos rios do Norte de Portugal, a partir de processos de obras sobre trabalhos de manutenção e correção fluvial. António Vieira, Bento Gonçalves, Francisco Costa, Luís Vinha e Flora Leite abordam a importância da implementação de medidas de mitigação pós-fogo para promover a protecção do solo contra a erosão e auxiliar a recuperação da vegetação em florestas de montanha. No entanto, com base na experiência de campo destes investigadores, para algumas áreas ardidas é preferível não aplicar qualquer tipo de tratamento.

O último capítulo sobre ecohidrologia, da autoria de Maciej Zalewski, fornece um excelente quadro-síntese metodológico sobre como utilizar os processos ecossistémicos, ou seja, a interação água-biota, como ferramenta de gestão.

Fica por isso o convite à leitura desta obra coletiva “*Open Channel Hydraulics, River Hydraulic Structures and Fluvial Geomorphology*”, com vários contributos sobre o tema deste número “*Riscos Hidrogeomorfológicos e seus impactes Socioambientais*”.

NOTA DE ABERTURA

Adélia Nunes	3
--------------------	---

ARTIGOS

Rocio Marisol Alanís Anaya Susceptibilidad a inestabilidad del terreno derivada del crecimiento urbano en la ciudad de Querétaro, México ...	5	133
Carolina Acero e Andres Ortiz Desarrollo de un modelo de regresión logística para evaluar el riesgo por inundación en la localidad de Fontibón, Bogotá D.C.-Colombia	19	
Lucas Gomes, Maria Manuela Portela e Luis Espinosa Bivariate analysis of short-duration extreme rainfalls. Application to the study of the debris floods (alluviums) in the Funchal region (Madeira Island)	31	
Marlissson Lopes de Araújo e Milena Marília Nogueira de Andrade Inundações e unidades construídas em Marabá: um estudo de caso na Amazônia brasileira	43	
Walmira Ferreira Lopes e Milena Marília Nogueira de Andrade Análise de medidas estruturais de mitigação à erosão costeira no município de Belém, Pará, Brasil	59	
Romeu Gerardo e Isabel Pedroso de Lima Aplicação de imagens multiespectrais de sentinel-2 na monitorização do jacinto-de-água: estudo de caso no Baixo Mondego (Portugal)	73	

NOTAS

Carla Carocha Apresentação de recente metodologia útil para a gestão do risco no litoral	87
Helena Maria Simão, Alfeu Sá Marques, Nuno Eduardo Simões e José Paulo de Almeida Avaliação de reservas de água superficial e de risco de inundação na Guarda, Portugal	103
André Francisco Pugas e Sílvia Midori Saito Análise sobre a tecnologia SMS em sistemas de alertas de risco de desastres no Brasil	111

NOTÍCIAS

Patricia Mie Matsuo Muito além da chuva: práticas educativas na era dos desastres. Vencedora do Prêmio CAPES de Tese 2023 - melhor tese de ensino	124
Fernando Félix, Fátima Velez de Castro e João Luís Fernandes XVI Encontro Nacional de Riscos " Educação para o Risco: Práticas e Projetos"	126
Fernando Félix e João Luís Fernandes XVII Encontro Nacional de Riscos	130

RECENSÕES

Francisco Costa Open Channel Hydraulics, River Hydraulic Structures and Fluvial Geomorphology: For Engineers, Geomorphologists and Physical Geographers	131
--	-----



RISCOS

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA
DE RISCOS, PREVENÇÃO
E SEGURANÇA

1 2



9 0

iu

IMPRENSA DA
UNIVERSIDADE
DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS