

Recursos Hídricos

Volume 42, N.º 2 | dezembro 2021

VOLUME ESPECIAL

14ª ANUASBA



ASSOCIAÇÃO
PORTUGUESA DOS
RECURSOS HÍDRICOS

Título

Revista Recursos Hídricos

Data de publicação

22 de março de 2022

Data do número

Dezembro 2021

Proprietário

Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

Diretor

António Gonçalves Henriques

Subdirectora

Maria Manuela Portela

Diretores Associados

Fernanda Santiago

Paulo Rosa Santos

Conselho Editorial

António Betâmio de Almeida

António Guerreiro de Brito

António Pinheiro

António Trigo Teixeira

Catarina Roseta Palma

Fernando Veloso Gomes

Francisco Ferreira

Francisco Nunes Correia

Jaime Melo Baptista

João Pedroso de Lima

Jorge Matos

José Matos

Luís Ribeiro

Manuel Rijo

Manuela Moreira da Silva

Maria da Conceição Cunha

Paulo Canelas de Castro

Rafaela Matos

Rodrigo Maia

Rodrigo Oliveira

Susana Neto

Teresa Ferreira

Membros da Comissão Diretiva

Carlos Coelho (Presidente)

Cláudia Brandão (Vice-Presidente)

Jorge Cardoso Gonçalves (Vice-Presidente)

Carla Antunes (Vogal)

Ana Estela Barbosa (Vogal)

Secretariado

Ana Estêvão

André Cardoso

Conceição Martins

Redação, Administração e Sede do editor

Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

a/c LNEC

Av. do Brasil, 101

1700-066 Lisboa

PORTUGAL

Telefone 21 844 34 28 Fax 21 844 30 17

NIF n.º 501063706

Design

Ana Rosária Gonçalves

Periodicidade

Semestral

Edição digital gratuita**Estatuto Editorial**

<http://www.aprh.pt/rh/estatuto-editorial.html>

Os artigos publicados na Recursos Hídricos são identificados com DOI (Digital Object Identifier).

Registo de Pessoa Colectiva n.º 501063706

Registo na ERC n.º 125584

ISSN 0870-1741

Apoiantes



Direção-Geral de Agricultura
e Desenvolvimento Rural

INDÍCE

EDITORIAL	5
CT&I (CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO)	7
<i>Assessment of groundwater lowering for urban infrastructure works, a case study in Sumbe, Angola/Africa</i>	
Cássio G. Rampinelli, Tyler J. Smith, Ana E.M. Lima, Charles Silva de Aguiar, Celestina Diniz, Janilson T. Araújo	9
<i>Contributo do Método Electromagnético no Dominio do Tempo (TDEM) na prospecção hidrogeológica. Caso de estudo na Ilha do Fogo, Cabo Verde</i>	
João Duarte, António Lobo de Pina, Fernando Figueiredo, Marco Cunha, José Carvalho, Sónia Victoria	23
<i>Análise comparativa de métodos de transformação chuva-vazão para pequenas bacias urbanas</i>	
Luiz Carvalho, José Rodolfo Scarati	31
<i>Água Virtual e gestão de recursos hídricos: Reflexões sobre a pauta de exportação de produtos agrícolas no semiárido brasileiro</i>	
Sérgio R. Rocha, Ticiania M. C. Studart, M. Manuela Portela, Rogério S. Studart Filho, Alessandra de Mensurado Pires	39
<i>As lacunas na gestão de recursos hídricos sob a perspectiva de povos e comunidades tradicionais no Pantanal sul-mato-grossense</i>	
Josiane Felipe, Synara Broch, Áurea Garcia, Rafaela Nicola	49

EDITORIAL

Este número da revista Recursos Hídricos é publicado num contexto internacional que não pode deixar de abalar as nossas consciências: a agressão da Ucrânia pela Rússia, sem qualquer justificação plausível, com atos de desumanidade inadmissíveis a que somos obrigados a assistir, impotentes, e que julgaríamos inimagináveis neste século XXI.

Esta reflexão vem a propósito deste número, composto por um conjunto de artigos técnico-científicos que foram apresentados também num contexto internacional: o 14º SILUSBA, Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa que se realizou em setembro de 2019, na Cidade da Praia, Cabo Verde, sob o tema geral “SILUSBA - 25 anos construindo a Comunidade da Água da CPLP”.

Esta realização não podia ser mais contrastante com os acontecimentos da barbárie na Ucrânia, do assassínio em massa de crianças, de inocentes e de civis indefesos que estamos a vivenciar: O

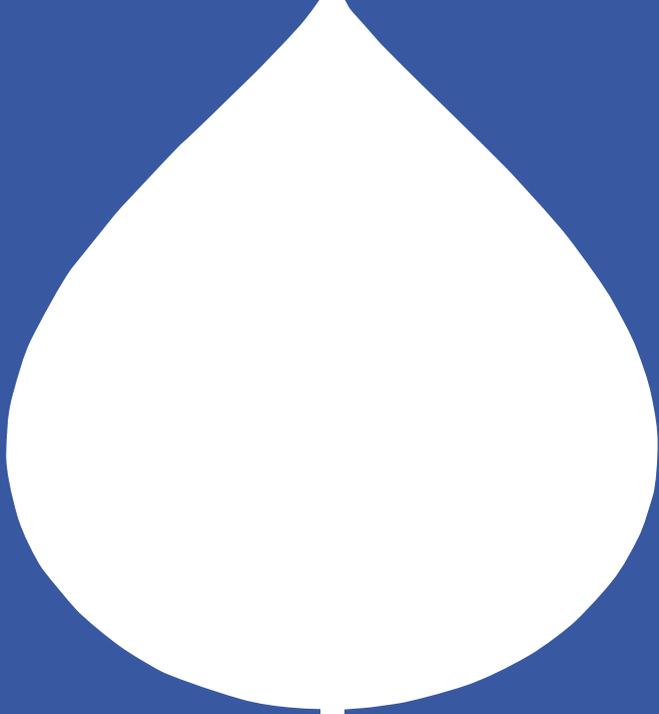
14º SILUSBA, uma reunião pacífica de homens e mulheres de origens muito distintas, unidos por uma língua comum, que se encontram para partilhar os seus trabalhos técnico-científicos, contribuindo para o progresso dos conhecimentos e desta forma para cimentar a paz e a amizade entre si e, através de cada um deles, unir os povos dos seus países. Uma reunião entre milhares de outras, que se sucedem todos os dias, evidenciando que o caráter internacional, intergeracional e intercultural da Ciência é um veículo de promoção da paz, do bem-estar e da convivência de todos os povos.

Bem hajam todos os organizadores do SILUSBA, todos os participantes e, em particular, os autores dos artigos agora publicados, pelo seu contributo efetivo para a harmonia dos povos dos países de língua portuguesa.

Março, 2022

António Gonçalves Henriques

Diretor da Revista Recursos Hídricos



ct&i

(Ciência, Tecnologia e Inovação)

Assessment of groundwater lowering for urban infrastructure works, a case study in Sumbe, Angola/Africa

Avaliação de rebaixamento de lençol freático para implantação de infraestrutura urbana, estudo de caso em Sumbe, Angola, África

Cássio G. RAMPINELLI^{®1}, Tyler J. SMITH², Ana E.M. LIMA³, Charles Silva de AGUIAR⁴, Celestina DINIZ⁵, Janilson T. ARAÚJO⁶

® Corresponding author: cassiorampinelli@gmail.com

¹ PhD Student, Clarkson University, USA.

² PhD, Professor, Clarkson University, USA.

^{3,4} Coordinator, Civil Engineer, BDM Engenharia e Tecnologia, Angola.

⁵ Civil Engineer, BDM Engenharia e Tecnologia, Angola.

⁶ Director, Civil Engineer, BDM Engenharia e Tecnologia, Angola.

ABSTRACT: This paper describes the hydrogeological study developed for Sumbe city, in Angola, Africa, to evaluate the feasibility of employing existing wells to drawdown the water table in the central area of the city both to facilitate the urban infrastructure implementation and to increase its lifespan. The hydraulic conductivity of the unsaturated zone was estimated based on the open hole and double ring infiltrometer tests conducted in several points of the site to capture the variability of the hydrogeologic condition of the zone of aeration. The transmissivity and the hydraulic conductivity of the saturation zone were estimated based on a pumping test performed in a pumping well and two monitoring wells. Hand auger, SPT and rotary boring were carried out and combined with all field data information to produce a simplified conceptual model of the hydrogeologic system for the study site. Based on the survey data and by applying the Dupuit approximation of the Boussinesq equation for unconfined aquifers, the piezometric surface and the radius of influence of the well were computed for an operational steady condition. The study demonstrated that the entire site location is on a thick layer of clay and employing wells for groundwater lowering is unfeasible for either permanent or temporary purposes. For temporary groundwater lowering, collecting the water drained at the excavation by direct pumping was suggested. Finally, additional considerations regarding the sewerage/stormwater systems and the drainage system for the pavement base were also addressed.

Keywords: groundwater lowering; infrastructure; hydraulic conductivity; influence radius of wells.

RESUMO: Este artigo descreve um estudo hidrogeológico desenvolvido para a cidade de Sumbe, em Angola, África, com o propósito de avaliar a viabilidade de se utilizar poços profundos existentes para efetuar o rebaixamento do lençol freático na área central da cidade de forma a facilitar a implementação das obras de infraestrutura, bem como incrementar a vida útil das instalações. A condutividade hidráulica da zona não saturada foi estimada baseada nos ensaios open and hole e de anéis concêntricos em locais diversos buscando caracterizar a variabilidade das condições hidrogeológicas da zona de aeração. A transmissividade e a condutividade hidráulica da zona saturada foram estimadas com base em um teste de aquífero realizado em um poço de bombeamento e dois poços de observação. Ensaios de sondagem à trado, SPT e rotativa foram realizados e combinados com diversos dados levantados em campo para produzir um modelo hidrogeológico conceitual para área de estudo. Com base nos levantamentos executados e por meio da aproximação de Dupuit para a equação de Boussinesq para aquíferos confinados e semiconfinados, a superfície piezométrica e o raio de influência do poço de bombeamento foram calculados para condição de operação em regime permanente do poço. As avaliações indicaram que toda a área de estudo encontra-se sobre uma camada espessa de argila e a utilização de poços profundos para rebaixamento do lençol freático, seja temporariamente ou de forma permanente, mostra-se inviável. Para o rebaixamento temporário, foi sugerido o uso de bombeamento direto das águas drenadas nas escavações executadas. Por fim, recomendações gerais foram realizadas para os projetos de drenagem, esgotamento sanitário e pavimentação.

Palavras-Chave: rebaixamento de aquíferos; infraestrutura; condutividade hidráulica; raio de influência de poços.

Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 42, N.º 2, 9-21 dezembro de 2021.

© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh42n2-cti1

1. INTRODUCTION

Lowering the groundwater level to facilitate subsurface construction is an important task in civil engineering projects such as the construction of stormwater and wastewater systems, pavements, building foundations, mining in deep excavations, slope stabilization structures or any other civil work that requires excavation in areas where the water table is shallow. Besides the inconvenience for civil engineering works, shallow groundwater may also contribute to groundwater flooding, especially in cities located in flood plain areas, such as the city of Oxford on the River Thames, in the UK (Macdonald *et al.* 2012). Another issue of concern in shallow groundwater areas is a higher susceptibility to ground water contamination. Burri *et al.* (2019) presented a review of several threats to groundwater quality caused by anthropic activities such as agriculture, mining, land use practices, solid and liquid waste deposition, industrial activities and wastewater disposals that generate compound chemicals, which may easily reach groundwater, especially in sites without a minimum width of an unsaturated layer as demonstrated in Nyenje *et al.* (2014). Al-Saedy & Abdulhussain (2013) also mention the effect of reduction in the land productivity state caused by an increase in soil salinity and alkalization due to shallow groundwater.

Regardless the reason for water table drawdown, the implementation of a groundwater withdrawal project must be done carefully to avoid undesirable side effects. Angel *et al.* (2015) highlight that controlling groundwater can be costly, not only during construction but also from resulting damages to infrastructure or properties around the working area. Roy & Robinson (2009) reported a case study indicating settlements as large as 36 cm extending to distances of several times the dimension of the area within which actual permanent dewatering was taking place in an underground construction in Vancouver, Canada. Modoni *et al.* (2013) evaluated land subsidence mainly caused by groundwater withdrawal for water supply in the city of Bologna, Italy, for the period 1943-2005, finding maximum cumulated settlements of 4 m in critical spots. The authors also mention several cases around the world in which subsidence induced by groundwater withdrawal has been an issue of concern.

As noticed by Angel *et al.* (2015), different factors must be taken into account to determine the most effective dewatering system. First, a thorough understanding of the subsurface rock and soil conditions at the site is necessary. This is achieved by conducting field tests to identify the soil type,

layer thickness and basic soil properties such as the hydraulic conductivity. Then, a general understanding of the hydrological characteristics at the site is essential to determine the source of the water and the water level behavior during the dewatering process. Finally, the effects of dewatering on adjacent structures must be considered in a cost-benefit analysis.

In this way, before proceeding with any cost benefit assessment, a model building process is required. Gupta *et al.* (2012) summarized the conceptualization of a model in three formal stages: conceptual model, mathematical model and computational model. Enemark *et al.* (2019) defined the groundwater system conceptualization as a collection of hypotheses describing the understanding of the different aspects of the groundwater system that are important to the modeling objective. The conceptual model is based on the available geological and hydrological information (observed water levels, estimation of soil parameters by field survey, etc.), but often also include geological insights or expert interpretation (Enemark *et al.* 2019). The mathematical model is related to the equations that will be derived to handle the states, fluxes and parameters of the modeled system and the computational model promotes the boundary conditions and numerical solutions for the system variables.

However, in practical engineering applications, besides the inherent limitations in representing a real process by a model, there are also time and budget constraints that push practitioners to seek simplistic empirical approaches adequate to allow for a successful and economic completion of their projects. In addition, for some conditions, as argued by Cashman & Preene, (2001), there is little practical justification for the use of sophisticated and time-consuming techniques, when simpler methods can give serviceable results, and this fits the context of this work.

In this context, this paper describes a case study to evaluate the feasibility of employing existing wells in the city of Sumbe/Angola to drawdown the water table both to facilitate the urban infrastructure implementation and to increase its lifespan.

2. METHODS

Due to the absence of previous technical studies and surveys in the study region, practical *in situ* tests were performed to allow a better characterization of the groundwater surface, the estimation of the hydraulic conductivity for the unsaturated and saturated zones, as well as a general classification

of the material for the soil layers. Initially, site description and a general characterization of the problem are presented. Then, a brief description of the tests and surveys is presented in this section followed by the methods adopted to estimate the radius of influence for a well at the study site. The tests and surveys were chosen based on the time and budget constraints but were found to be sufficient for the study purpose.

2.1 Site Description and Characterization of the Problem

Sumbe is a city located in the Cuanza Sul province in Angola, Africa (Figure 1). The city suffers from shallow groundwater in almost all regions in which urbanization works (pavement, drainage, wastewater and water distribution systems) must be implemented. Several points in the city have groundwater levels less than 80 cm below the surface, in other spots almost no water can be absorbed by the soil and permanent water puddles are found (Figure 2). This condition not only hampers civil works but also brings several flood spots to the city during the rainy season affecting Sumbe citizens.

Given the provided context and the existence of three inactivated wells in the city (Figure 1) that previously worked during the Portuguese colonization period, around the 1970s, the recovery or new implementation of the wells was considered for dewatering the area. However, aside from the oral history of the efficient use of the wells in the past, no technical information was available. Angel *et al* (2015) argue that a thorough understanding of the subsurface rock and soil conditions throughout the identification of the soil types and hydrological characteristics of the site are paramount in the development and implementation of a successful dewatering operation. In this way, to evaluate the possibility of employing the wells for groundwater lowering, at least some basic hydraulic parameters such as the soil hydraulic conductivity and transmissivity had to be determined, in addition to a general understanding of the hydrogeological features of the site.

Considering the limited availability of time for the field survey (15 days), some straightforward *in situ* tests were selected to allow a practical estimation of the hydraulic conductivity. For the unsaturated zone the open and hole and the double ring infiltrometer tests were employed. These tests

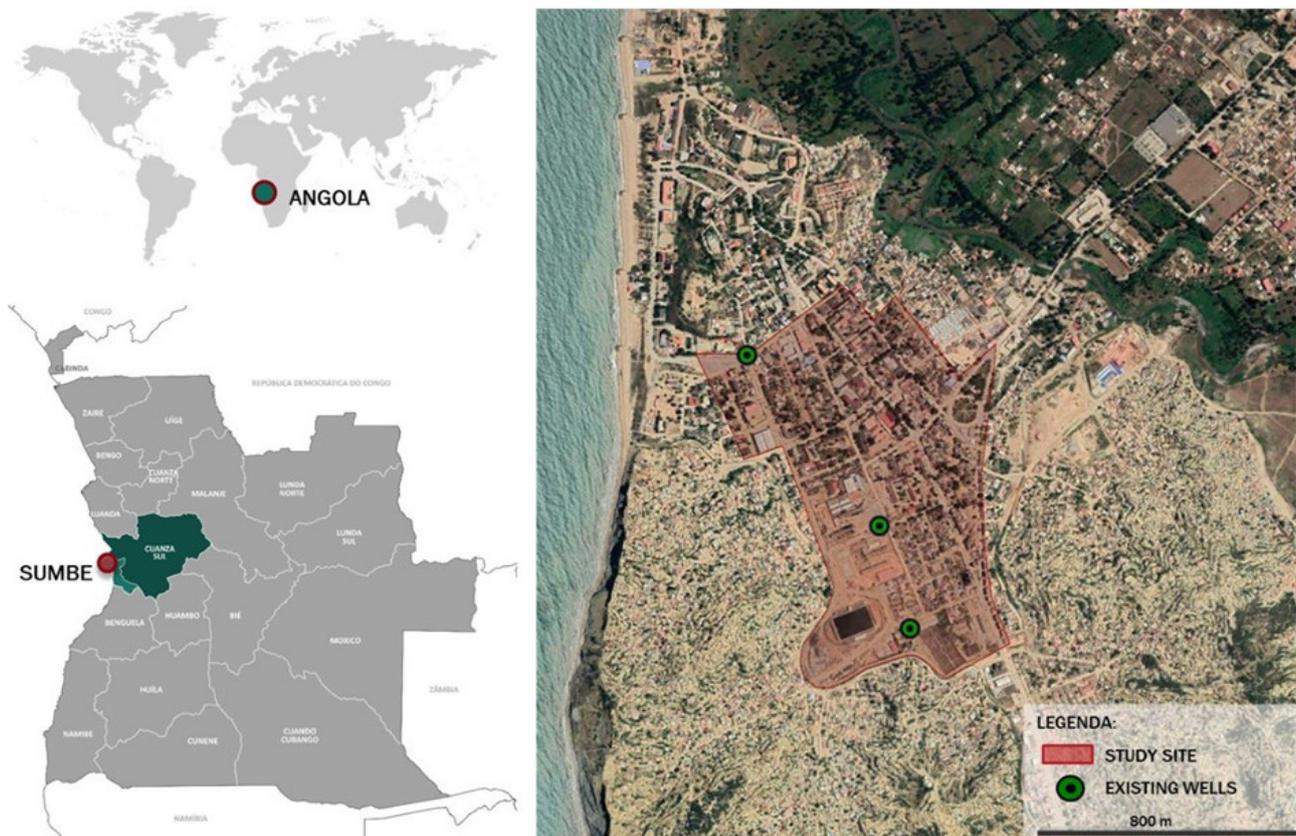


Figure 1. General localization map.



Figure 2. Example of shallow groundwater spots at the study site.

have been reported to determine the hydraulic conductivity for the unsaturated zone in several study cases in Brazil (Carvalho *et al.* 2013, Flori, 2010, Olivia *et al.* 2005). The transmissivity and the hydraulic conductivity of the saturation zone were estimated based on pumping test. Besides the *in situ* tests to estimate the hydraulic conductivity additional surveys and procedures were performed to address the main purpose of this study that was to evaluate the feasibility of using deep wells for dewatering the urban area of the city.

2.2 Double Ring Infiltrometer

The double ring infiltrometer test aims to estimate the vertical hydraulic conductivity of the unsaturated zone. In this method two cylinders with different sizes are concentrically arranged and nailed a few centimeters in the ground to prevent lateral dispersion of the inserted water (Figure 3). The length of the cylinder below the ground surface is measured resulting in the value of I . Initially, the external cylinder is filled with water until the water level stabilizes (when the soil becomes saturated and lateral water flux is avoided). Then, the internal cylinder is filled with water and the distance between the top of the cylinder and the water level is measured (M_i), allowing the computation of the initial water depth (h_0). After some time (around 15

min), this procedure is repeated and the distance between the top of the cylinder and the water level is verified for the second time resulting in the final measurement M_f , and, consequently, the final water depth (h). The vertical hydraulic conductivity (K_z) is computed by Equation (1).

$$K_z = U \cdot \frac{I}{\Delta t} \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) \quad (1)$$

Where, K_z is the vertical hydraulic conductivity (m/s), U is a unit conversion factor (1/60000), unit conversion factor, Δt is the time between initial and final measurements (s), h_0 is the initial water depth (mm) equals to $H - I - M_i$, h is the final water depth (mm) equals to $H - I - M_f$, H , is the total height of the cylinder (250 mm), I is the length of the cylinder nailed in the ground (mm), and M_i , and M_f are the initial and final distances between the top of the cylinder and the water level (mm) respectively. Five tests were performed in the study area with locations indicated in Figure 4.

2.3 Open and Hole

The Open and Hole test was also employed to determine the vertical hydraulic conductivity for the unsaturated zone, however, it considers 4 different depths (50, 100, 150 and 200 cm), as shown in Figure 5. Initially, four holes are dug using

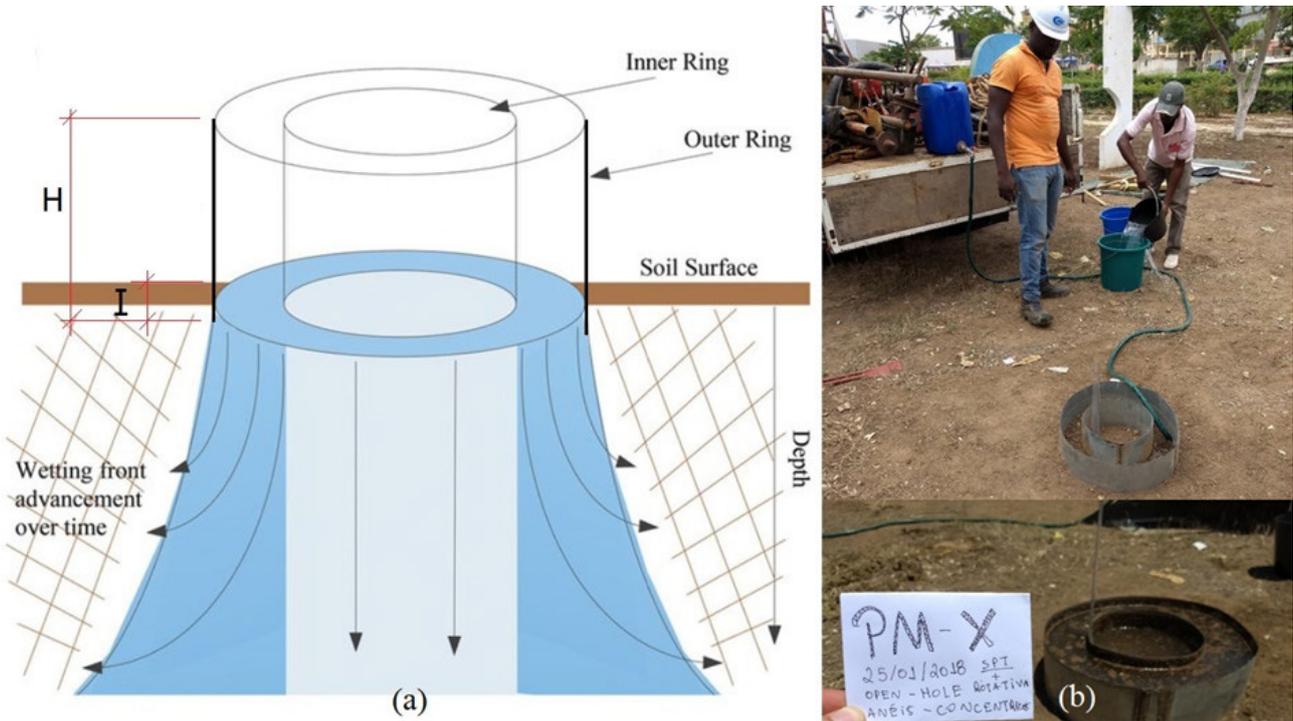


Figure 3. (a) General framework for the Double Ring Infiltrometer Test (adapted from Dixon, et al. 2018), (b) Double Ring Infiltrometer Test performed at the site location.

a hand auger and a PVC pipe with 50 mm diameter is inserted in each hole. Each pipe must be inserted a few centimeters in the ground to minimize lateral water flux during the infiltration. Then, the distance between the top of the pipe and the bottom of the hole inside the pipe is measured (X). Next, each pipe is filled with water and the initial distance between the top of the pipe and the water level is measured (M_i), allowing the computation of the initial water depth (h_0). After a time period of Δt , the measurement of the water level is repeated, resulting in M_f , and the final water depth is computed (h). The vertical hydraulic conductivity (K_z) is given by Equation (2).

$$K_z = 2.303 \cdot \frac{r}{b^4 \Delta t} \cdot \log\left(\frac{h_0}{h}\right) \quad (2)$$

Where, K_z = Vertical hydraulic conductivity (m/s), b is a unit conversion factor (2.303), Δt is the time interval between initial and final measurements (s), X is the distance between the top of the tube and the bottom of the hole inside the tube (cm), h_0 is the initial water depth (cm) given by $X - M_i$, r is the final water depth (cm) given by $X - M_f$, r is the inner radius of the pipe (m), M_i and M_f are the initial and final distances between the top of the cylinder and the water level (cm) respectively. Nine Open and Hole tests were performed on the study area, the locations are presented in Figure 4.

2.4 Pumping Test

To estimate the hydraulic conductivity for the saturated zone, a pumping test was performed near to an existing well (the central well on Figure 4). The water was pumped in the pumping well (P-2 in Figure 6) at a constant rate of 6 m³/m, while the water level was monitored at two observation wells located at 5 and 10 m from the pumping well. The monitoring wells were designed according to the ABNT (1997) and the test was performed between the second and third days of March/2018, based on the general standard procedures described in the technical literature (Kruseman & de Ridder, 1994; Ferris *et al.*, 1962; Stallman, 1971; CPRM, 2000; Lima & Filho, 2003; ADASA, 2016). The pumping phase took 12 hours while the water table recovery phase was monitored for 6 hours. Figure 6 shows a schematic profile of the monitoring and pumping wells and their respective locations.

2.5 Monitoring Wells

In order to characterize the groundwater depth in the study site, 43 monitoring wells were installed. Each well was composed of a 50 mm PVC pipe with 3 m depth and was dug by a 60 mm diameter hand auger. Starting 50 cm down from the top of the pipe, holes with 0.80 cm diameter were made in a stretch of 1.50 m to allow the water infiltration.

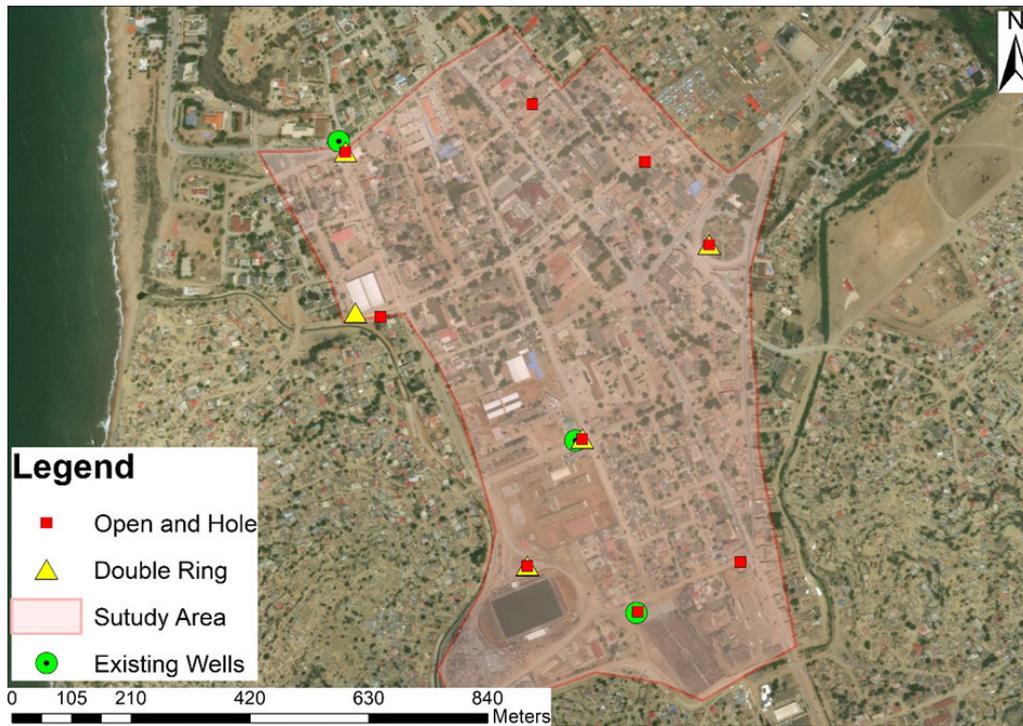


Figure 4. Double Ring Infiltrometer and Open Hole Test spots

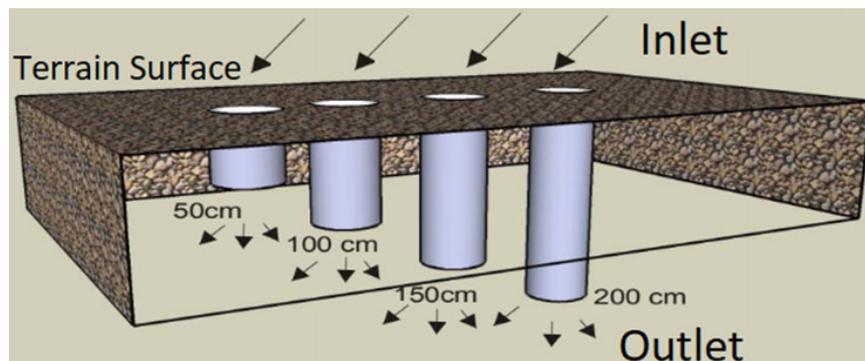


Figure 5. General framework for the Open and Hole Test.

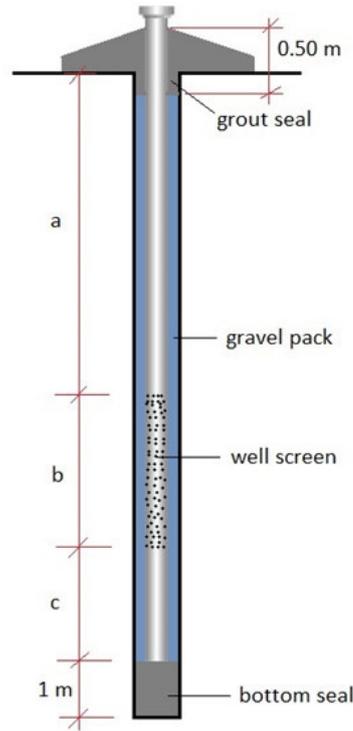
Profile of the wells

Monitoring wells

- P-2-1 ● P-2-2
- a=1.55 m a=2.85 m
- b=22.80 m b=19.95 m
- c=26.65 m c=17.10 m
- Pipe Diameter= 140 mm
- Hole Diameter=250 mm

Pumping well

- P-2
- a= 2.85 m
- b=57.00 m
- c=1.55 m
- Pipe Diameter= 200 mm
- Hole Diameter= 300 mm
- Pump bowl position= 35 m



Well locations



Figure 6. Monitoring and pumping wells profile and locations.

At the bottom of each well a cap was installed and the interface between the pipe and the ground was filled with gravel ranging from 1 to 2 cm diameter. In each well, a topographic landmark was installed and the elevations of the water level were monitored during February 2018. Figure 7 presents a general profile of the monitoring wells.

2.6 Geotechnical Investigations

Geotechnical investigations were carried out at the study site to support the general characterization of the physical properties of the soil, as well as to support a simplified hydrogeologic conceptual model for the site. The hand auger drills of all monitoring wells were used to characterize the superficial soil layer. In addition, three Standard Penetration Tests (SPT) associated with rotary boring were conducted closest to the existing wells, allowing the characterization of deeper soil layers (until 60 m depth). The SPT tests followed the ABNT (2001) guidelines.

2.7 Governing Equation

By assuming a two-dimensional, homogeneous and isotropic aquifer and applying the approximation first suggested by Dupuit (1863), one can obtain the

Boussinesq (Equation 3) equation to a steady state condition.

$$\nabla^2(h^2) = \frac{Q_w}{Kb} \tag{3}$$

Where, K is the hydraulic conductivity (m/h) assumed to be equal in any direction, h is the water table elevation or the saturated thickness (m), Q_w is the pumping rate (m³/h), b is the aquifer thickness (m); and $\nabla^2()$ is the Laplacian operator; A finite difference scheme was applied for the numerical solution of Equation (3) by assuming a 2-D discretization in a mesh with Δx by Δy resolution. For the mesh nodes without pumping, Equation (4) was employed while for the mesh node with the pumping, Equation (5) was used.

$$\frac{h_{i+1,j}-2h_{i,j}+h_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{h_{i,j+1}-2h_{i,j}+h_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{h_{i+1,j}-2h_{i,j}+h_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{h_{i,j+1}-2h_{i,j}+h_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} = \frac{W}{Kb} \tag{5}$$

Where (i,j) represents the node index for the x and y directions. The solutions of Equations (4)



Figure 7. General profile of the monitoring wells.

and (5) were numerically implemented allowing the computation of the groundwater level for any node of the mesh around the pumping well. Table 1 presents the parameters adopted for Equations (4) and (5).

Table 1. Parameters assumed for the numerical solution for Equations (4) and (5)

QW (m ³ /h)	K(m/h)	b(m)	Δx = Δy (m)
6,00	0.01015	60	1.5

2.8 Transmissivity and Hydraulic Conductivity

Assuming the same conditions adopted for the Boussinesq equation, the transmissivity (T), and the hydraulic conductivity (K) were computed based on Equations (6) and (7), as follows.

$$T = \frac{0,366 Q_w}{(s_1 - \frac{s_1^2}{2H_0}) - (s_2 - \frac{s_2^2}{2H_0})} \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (6)$$

$$K = \frac{T}{H_0} \quad (7)$$

Where, Q_w is the pumping rate (m³/s), s_1 is the water table drawdown at monitoring well 1 (m), s_2 is the water table drawdown at monitoring well 2 (m), r_1 is the distance between the pumping well and the monitoring well 1 (m), r_2 is the distance between the pumping well and the monitoring well 2 (m),

H_0 is the aquifer thickness (m), K is the hydraulic conductivity (m/s), and T is the Transmissivity of the aquifer (m²/s).

2.9 Radius of Influence

The radius of influence (R) for the pumping well was empirically determined by Equation (8), originally proposed by Sichard (1927).

$$R = 3000 \cdot s_w \sqrt{K} \quad (8)$$

Where, s_w is the water drawdown at the pumping well (m), R is the Radius of Influence (m), and K is the hydraulic conductivity (m/s).

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The results for the Double Ring Infiltrometer test are presented in Table 2. The hydraulic conductivity for the superficial soil layer ranged from 4.01E-05 to 9.70E-06 m/s with a mean of 1.25E-05 m/s and was classified as a silt-clay soil.

The results for the Open and Hole test employed to verify the hydraulic conductivity on soil layers ranging from 50 cm to 200 cm depth are presented in Table 3. The mean value for the four depths tested ranged from 1.01E-07 m/s to 1.86E-08 m/s.

Based on samples collected by the hand auger drills and the hydraulic conductivity determined by the *in situ* tests, the initial soil layer evaluated by

the Double Ring Infiltrometer test was classified as silt-clay while the superficial soil layer with depth between 50 to 200 cm tested by the Open and Hole method was classified as a clay-silt soil.

Table 2. Results for the Double Ring Infiltrometer Tests

SPOT	E	N	K(m/s)
POÇO 1	373148	8761547	4.01E-05
POÇO 2	373566	8761037	2.44E-06
PM-X	373790	8761382	8.41E-06
PM-Z	373165	8761261	9.70E-06
PM-3-3	373469	8760811	2.02E-06
MEAN			1.25E-05

Based on the hydraulic conductivity for the superficial soil layers, it is observed that, in general, as the depth increased, the hydraulic conductivity decreased, with values in some locations so small that it may be considered impermeable for practical purposes. The type of soil material identified by the hand auger samples for the soil layers between 100 cm to 200 cm was similar across all locations along the study region. The results correspond to what was expected based on the visual and tactile characterization of the material verified *in situ*. It should be noted that in some spots the presence of groundwater was identified, explaining the null/nearly impermeable values obtained for the hydraulic conductivity for some points.

Considering the parameters presented in Table 4 and Equations (6) and (7), the computed transmissivity (T) was 1.69E-04 m²/s and the hydraulic conductivity (K) was 2.82 E-06 m/s. Since the geotechnical investigations could not reach bed-rock, the saturated thickness (H0) was estimated at 60 m based on the general geologic

features of the study site. The maximum drawdown at the monitoring wells (P-2-1, P-2-2) were obtained from a logarithmic regression model fit to the drawdown curves for each monitoring well (Figure 8). The results suggest a silt-clay material property. By employing the empirical Equation (8) at the pumping well with a drawdown of 47.82 m and using the aquifer parameters from Table 4, the radius of influence was computed resulting in 61.32 m as shown in Figure 9.

The radius of influence for the pumping well was also estimated based on the numerical solution of Equation (3), computationally implemented via finite differences based on the Equations (4) and (5). This approach shows the water table elevation at each node of the 126 m by 126 m numerical mesh, where the well is positioned at the center of the mesh. Figure 10(a) presents a plan view of the numerical mesh indicating the behavior of the water table elevation by a color gradation pallet. The center of the figure matches the center of the well and the axes indicate the distance from the center of the pumping well.

The mesh resolution is equally sized (1.5 m) and the relevant parameters used for the numerical approach were presented in Table 1. Three hundred iterations were performed to reach the convergence criteria (assumed as an error less than 0.1% between the water table elevations in the last two iterations for the pumping well node). Figure 10(b) shows a profile view for a cross section passing along the x-axis intercepting the center of the pumping well. By the numerical approach, the water table is insensitive to the pumping (for a steady state condition) at distances greater than 40 m from the well. At distances greater than 20 m from the center of the well, the drawdown was found to be less than 1 m.

Table 3. Results for the Open and Hole tests.

SPOT	E	N	K(m/s)				MEAN
			50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	
PM-X	373790	8761382	4.62E-08	4.38E-08	1.95E-08	1.43E-08	3.09E-08
PM-3-3	373469	8760811	1.74E-08	6.03E-09	4.13E-10	2.91E-10	6.03E-09
POÇO 1	373148	8761547	1.32E-07	5.09E-09	2.00E-08	1.73E-09	3.98E-08
POÇO 2	373566	8761037	1.69E-09	1.38E-09	9.96E-10	4.23E-09	2.08E-09
	POÇO 3 373664 8760730		2.16E-08	1.11E-08	3.49E-10	0.00E+00	8.24E-09
P-M-J	373677	8761530	1.31E-08	7.28E-08	1.19E-08	2.95E-10	2.45E-08
P-M-Y	373478	8761632	1.58E-07	7.19E-10	4.53E-09	3.57E-09	4.18E-08
P-M-Z	373210	8761254	5.11E-07	8.86E-09	0.00E+00	1.40E-07	1.65E-07
P-M-K	373845	8760818	6.96E-09	3.31E-09	4.15E-08	3.06E-09	1.37E-08
MEAN			1.01E-07	1.70E-08	1.10E-08	1.86E-08	3.69E-08

Table 4. Pumping test parameters and results.

Parameter	P-2-1	P-2-2
Distance from the pumping well - r(m)	5.00	10.00
Maximum drawdown - s (m)	10.87	9.56
H0 (m)	60.00	
Qw (m ³ /s)	0.00166	
T (m ² /s)	1.69E-04	
K (m/s)	2.82E-06	

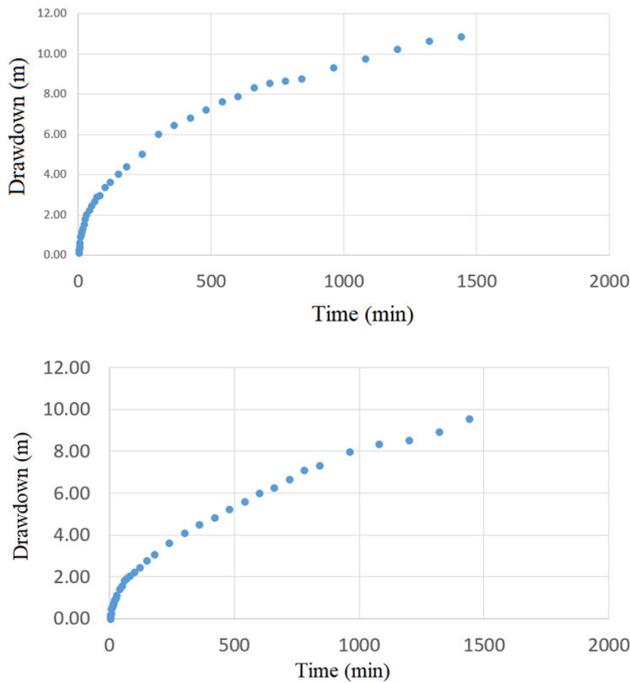


Figure 8. Drawdown curves of the monitoring wells.

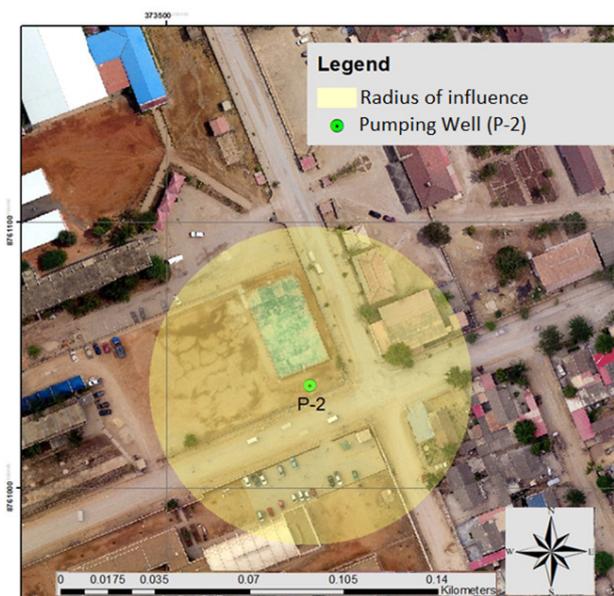


Figure 9. Radius of influence for the pumping well based on the empirical equation.

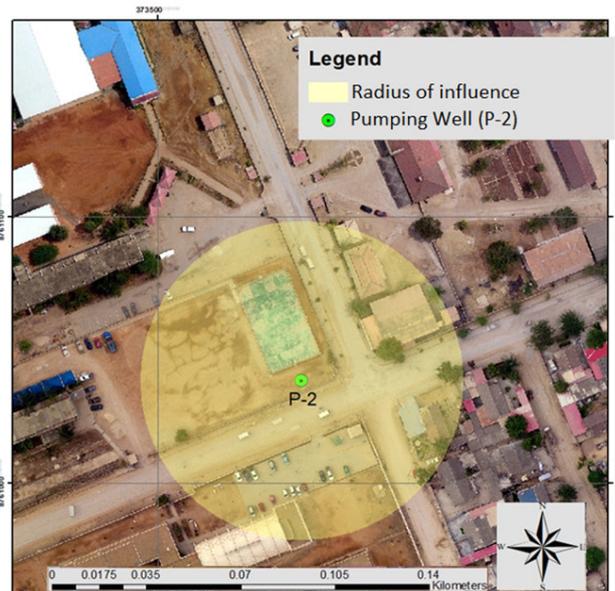


Figure 10. Radius of influence for the pumping well based on the numerical solution for Equation (3).

Based on the numerical approach, one can estimate the radius of influence as 40 m for the pumping well. Although the numerical and empirical approaches presented differing values for the radius of influence (the difference between the results is approximately 35% of the empirical output), for practical purposes both values suggest the use of wells for reducing groundwater levels to be unfeasible.

The mean values for the water elevation at the monitoring wells during February/2018 was used to generate a water table surface for the entire study area. Figure 11 presents the depth of the water table based on the water surface created by a 3D interpolation from the data of the monitoring wells. The dark blue color represents areas where the water table is close to the ground surface (less than 50 cm depth) while the red color indicates deeper groundwater (more than 250 m depth). It is clear that a majority of the study area is underlain by shallow groundwater.

Despite the absence of deeper geological investigations to allow for a detailed characterization of deeper soil layers as well as the bed rock material (which was not reached by the geotechnical investigations), the collected data and the *in situ* tests suggest that the study area is underlain by a deep layer of clay and silt with the potential for the development of a perched water table above the clay layer. Given the geological features of the area, it is believed that below the clay layer there is a sand layer where a confined aquifer may exist with some saltwater intrusion. At the study site, the bedrock is assumed to be deep, perhaps more than 100 meters deep. Figure 12 presents a sketch of the proposed conceptual model for the site.

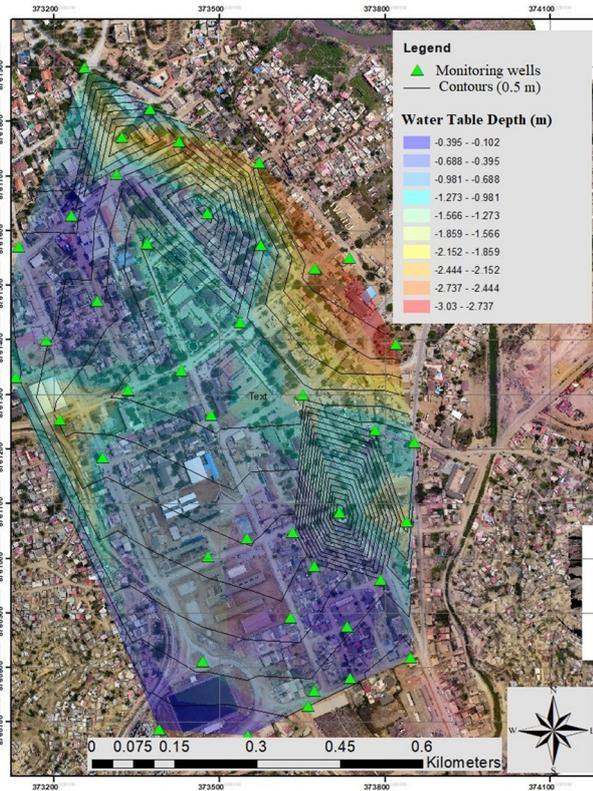


Figure 11. Water table depth and monitoring wells.

Although the proposed conceptual model was useful to indicate the infeasibility of using wells to drawdown the water table for the study site, it should be noted that further investigations are necessary to confirm and improve the suggested model including a detailed characterization of the composition of the layers materials as well as the depth of each layer.

4. CONCLUSIONS

The investigations suggest that most of the urban area in the city of Sumbe/Angola is located on a thick soil layer mainly composed of clay with similar hydrogeologic behavior along all the study area. The pumping test indicated that the area of influence of a pumping well in the study site is extremely localized, reaching no more than 60 m from the center of the well which makes the use of deep wells for lowering the water table inefficient and not cost-effective. Thus, it is recommended that urban infrastructure projects developed in this area must consider solutions that directly deal with shallow groundwater conditions. For drainage and sewage networks, it is suggested that maximum acceptable limits be used for the pipe slopes to preserve the best flow conditions.

For the drainage and sewage networks it is suggested that HDPE (High Density Polyethylene) be used to limit groundwater infiltration into the systems, as well as to limit the weight and provide more flexibility, while reducing possible disruption due to buoyant force on the system. Another alternative, in case of using concrete staves, is to use a residual flow (from 10% to 30%) added to the design discharge to taking into account the percolation of external water on the network. In addition, an annular filler with gravel and geotextile could be added to relieve external pressures on the network due to buoyancy. At specific spots in the design network, the external drainage flow should be pumped or conducted into the network.

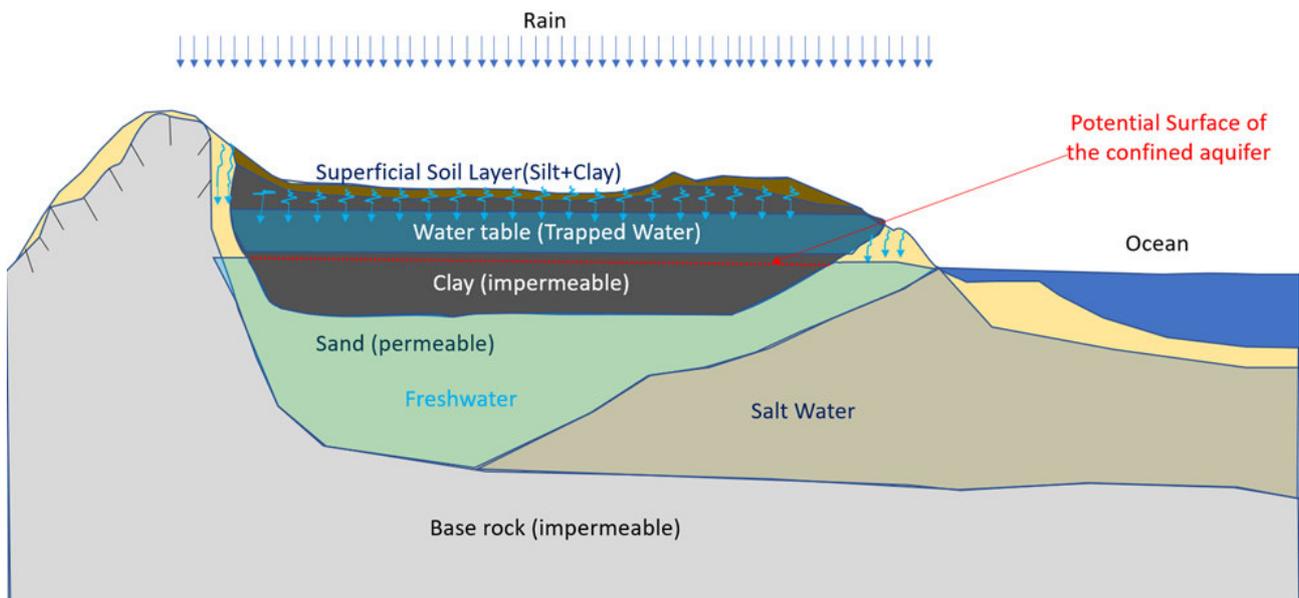


Figure 12. Conceptual hydrogeological model for the study site.

For paving, it is suggested that a gravel drainage layer wrapped by geotextile blanket be placed under the base of the paving with a slight slope from the center of the paving towards its margins. Longitudinally to the paving margins, it is recommended that drainage pipes be installed to conduct the drained water under the paved towards manholes. Such recommendations aim to extend the lifespan of the entire system given the exposure to shallow groundwater and salinity. Finally, regarding the construction of the network, it is recommended that direct pumping or wellpoints be used to temporarily lower the water table.

REFERENCES

- ABNT. (1997). NBR-13895-Construção de poços de monitoramento e amostragem. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (2001). NBR-6484- Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Metodo de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ADASA. (2016). Resumo Teórico e Prático para Testes de Aquíferos na Zona Saturada e Não Saturada: Ensaio de Infiltração *in situ*, Slug Test e Testes de Bombeamento. Brasília: Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal.
- Al-Saedy, B.K.N. & Abdulhussain, A.M. (2013). Lowering Groundwater Levels in Mishkhab City by Groundwater Modeling. *International Journal of Civil Engineering*, 2, pp. 45-56.
- Angel, M.L., Johnston, S., O'Steen, K., Brown, C. & Sando T. Groundwater Control Issues in Transportation Engineering: A Short Review of Dewatering Methods and Lessons Learned. (2015). *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 8, pp. 8-13.
- Burri, N. M., Weatherl, R., Moeck C., Schirmer, M. (2019) A review of threats to groundwater quality in the Anthropocene. *Science of the Total Environment*, 684, pp. 136-154.
- Cashman, P.M., Preene M. (2001). Groundwater lowering in construction : a practical guide. Taylor & Francis Group, New York, NY, USA.
- Carvalho, A. M., Gomes, L. G., Barbosa, A., Filho, J. A., & Mondelli, G. (2013). Determinação da condutividade hidráulica de uma área contaminada no município de Santo André utilizando-se método Slug Test. *Associação Brasileira de Águas Subterrâneas*, 3, pp. 71-87.
- CPRM. (2000). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações (2 ed.). Rio de Janeiro: CPRM-Serviço Geológico do Brasil.
- Dixon, N., Crosby, C.J., Stirling, R., Hughes, P.N., Smethurst, J., Briggs, K., Hughes, D., Gunn, D., Hobbs, P., Loveridge, F., Glendinning, S., Dijkstra, T., Hudson, A. (2018). measurements of near-surface hydraulic conductivity in engineered clay slopes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 52, pp. 123-135.
- Dupuit, J. (1863). Études Theoriques et Pratiques sur le Mouvement des Eaux dans les Canaux DéCauverts et á Travers les Terrains Permeables. Dunod, Paris, France, 2d ed.
- Enemark, T., Peeters, L.J.M, Mallants, D., Batelaan, O. (2019). Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. *Journal of Hydrology*, 569, pp. 310-329.
- Ferris, J.G., Knowles, D.B., Brown, R.H. & Stallman, R.W. (1962). Theory of aquifer tests, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1536 E.
- Flori, J. D. (2010). Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados. Brasília: Dissertação de mestrado submetida ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como pré requisito para obtenção do grau de mestre em geociências.
- Gupta, H. V., Clark, M. P., Vrugt, J. A., Abramowitz, G., Ming, Y. (2012) Towards a comprehensive assessment of model structural adequacy. *Water Resources Research*, 48, W08301.
- Kruseman, G.P. & de Ridder, N.A. (1994). Analysis and Evaluation of Pumping Test Data (2nd ed.), Publication 47, Intern. Inst. for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
- Macdonald, D., Dixon, A., Newell, A., Hallaways, A. (2012) Groundwater flooding within an urbanized flood plain. *Journal of Flood Risk Management*, 5 (1), pp 68-80.
- Modoni, G. Darini, G., Spacagna, R. L., Saroli, M., Russo, G., Croce, P. (2013). Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Engineering Geology*, 167, pp. 59-71.
- Nyenje, P. M., Havik, J.C.N., Foppen, J.W., Muwanga, A., Kulabako, R. (2014). Understanding the fate of sanitation-related nutrients in a shallow sandy aquifer below an urban slum area. *Journal of Contaminant Hydrology*, 164, pp. 259-274.

Roy, D., & Robinson, K. E. (2009). Surface settlements at a soft soil site due to bedrock dewatering. *Engineering Geology*, 107 (3-4), pp. 109-117.

Sichard, V. (1927) Das Fassungsvermögen von Bohrbrunnen und Eine Bedeutung für die Grundwasserersenkung insbesondere für grossere Absenktiefen. PhD thesis, Technische Hochschule, Berlin.

Stallman, R.W. (1971). Aquifer-test design, observation and data analysis, *Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey*, Book 3, Chapter B1.

Contributo do Método Electromagnético no Dominio do Tempo (TDEM) na prospecção hidrogeológica

Caso de estudo na Ilha do Fogo, Cabo Verde

Contribution of the Electromagnetic Method in the Time Domain (TDEM) in hydrogeological prospecting Case study on Fogo Island, Cape Verde

João DUARTE¹, António LOBO DE PINA², Fernando FIGUEIREDO³, Marco CUNHA⁴, José CARVALHO⁵, Sónia VICTORIA⁶

¹ IQGeo – Serviços, Lda. e Centro de Geociências da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Universidade de Coimbra, Portugal. joao.aduarte@iqgeo.pt

² Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Cabo Verde. antonio.pina@docente.unicv.edu.cv

³ Centro de Geociências da UC e Departamento de Ciências da Terra da UC, fpedro@dct.uc.pt

⁴ GeoSurveys – Consultores em Geofísica, Lda., Rua Narciso Espírito Santo 8, Maianga, Luanda, Angola. marcoaureliocunha@gmail.com

⁵ Centro de Geociências da UC, jose.carvalho.geo@gmail.com

⁶ Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Cabo Verde. sonia.silva@docente.unicv.edu.cv

RESUMO: A utilização do Método Eletromagnético no Domínio do Tempo [TDEM], contribui de uma forma significativa para localização de estruturas geológicas em profundidade e definição da sua geometria. Os modelos geológicos/estruturais obtidos por processamento dos dados da prospecção geofísica complementados com a integração de outra informação e metodologias, permitem identificar e localizar estruturas geológicas com potencial para a exploração de águas subterrâneas. A elaboração de modelos obtidos através do método TDEM permite ter uma perspetiva das estruturas geológicas, assim como identificar e interpretar a relação espacial entre elas, contribuindo desta forma para um melhor conhecimento da subsuperfície da cratera do vulcão da Ilha do Fogo. Em Cabo Verde, arquipélago com precipitações na generalidade fracas, cujos valores médios não ultrapassam 300mm/ano para as zonas situadas abaixo de 400 metros e 700mm/ano para as zonas situadas a mais de 500 metros de altitude (INGRH, 2000, Lima e Garcia, 2011), os recursos hídricos subterrâneos desempenham um papel fundamental, constituindo a principal fonte de abastecimento de água de pequenos aglomerados populacionais.

Após processamento dos dados adquiridos, foram criadas seções obtidas a partir da inversão das sondagens 1D extraídas do modelo de distribuição de valores de resistividades que contribuem para a compreensão da distribuição espacial e tipologia do sistema aquífero existente na área de estudo. No local foram efetuadas 21 sondagens eletromagnéticas verticais com o TDEM na localidade de Chã das Caldeira, Ilha Fogo, Cabo Verde. Para o efeito foi utilizado o equipamento TEM-FAST, com antena de geometria quadrada e dimensão de 200 metros (m) de lado, de modo a alcançar o maior número de estruturas geológicas em profundidade e a cobrir uma vasta área a partir da superfície do terreno. A partir do modelo tridimensional resultante da interpretação das 21 sondagens TDEM é possível verificar a existência de uma relação directa entre as anomalias geofísicas detectadas com as estruturas geológicas observáveis à superfície, assim como a existência de anomalias, subhorizontais, com baixo valor de resistividade (<400ohm/m) que estarão associadas à presença de um aquífero superficial. Este estudo revelou-se um contributo importante para a identificação, interpretação e delimitação da geometria das reservas de água existentes, permitindo desta forma planear com maior rigor e racionalidade as campanhas de captação.

Palavras-Chave: Cabo Verde, água subterrânea; TDEM, resistividade; modelos 2D e 3D.

ABSTRACT: The use of the Time Domain Electromagnetic Method [TDEM], contributes significantly to the location of geological structures in-depth and definition of their geometry. The geological/structural models obtained by processing geophysical prospecting data, complemented with the integration of other information and methodologies, allow identifying and locating geological structures with capability for groundwater exploration. The elaboration of models, obtained through the TDEM method, allows to have a perspective of geological structures, as well as to identify and interpret the spatial relationship between them, contributing to a better knowledge of the subsurface of the Ilha do Fogo volcano crater. In Cape Verde, an archipelago with generally low rainfall, whose average values do not exceed 300mm/year for areas located below 400 meters and 700mm/year for areas located more than 500 meters above sea level (INGRH, 2000, Lima and Garcia, 2011), underground water resources play a fundamental role, constituting the main source of water supply for small settlements.

After processing the acquired data, sections obtained from the inversion of 1D surveys were created, extracted from the resistivity values distribution model that contribute to the understanding of spatial distribution and type of the aquifer system present in the study area. At the site, 21 vertical electromagnetic surveys were carried out with the TDEM, in the town of Chã das Caldeira, Ilha Fogo, Cape Verde. For this purpose, it was used a TEM-FAST equipment with a square geometry antenna and with a dimension of 200 meters (m) sideways, to reach the largest number of geological structures in-depth and to cover a vast area from the surface of the terrain. From the three-dimensional model resulting from the interpretation of the 21 TDEM surveys, it is possible to verify the existence of a direct relationship between the geophysical anomalies detected with the geological structures observed on surface, as well as the existence of subhorizontal anomalies with a low resistivity value (<400ohm/m), which were associated with the presence of a superficial aquifer. This study proved to be an important contribution to the identification, interpretation and delimitation of the geometry of existing water reserves, allowing to plan with greater rigour and rationality the water abstraction campaigns.

Keywords: Cape Verde, groundwater; TDEM, resistivity; 2D and 3D models.

Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 42, N.º 2, 23-29 dezembro de 2021.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho pretende ser mais um contributo para conhecimento e avaliação do potencial das águas subterrâneas no arquipélago de Cabo Verde, complementando os vários estudos até à data efectuados com semelhante objectivo (Santos *et al.*, 2006, Gomes, 2007, Pina, 2009, Garcia, 2010). O uso dos métodos electromagnéticos neste tipo de prospecção, é cada vez mais corrente devido à facilidade de operação com os equipamentos de medida e à rápida recolha dos dados de campo. Estas vantagens são importantes do ponto de vista económico, tendo estes métodos uma grande aplicação em zonas com camadas superficiais muito resistivas, ou seja, onde os métodos eléctricos de resistividade são de difícil aplicação devido às resistências de contacto eléctrodo/solo elevadas. A utilização do TDEM, permite uma abordagem rápida e eficiente para localização das estruturas geológicas e avaliação hidrogeológica em profundidade. A construção de modelos geofísico-estruturais 3D, facilita a sua visualização, bem como o estudo das suas relações espaciais, contribuindo para um melhor conhecimento da subsuperfície da cratera do vulcão da Ilha do Fogo.

O método apresenta várias vantagens que fazem com que seja muito utilizado em estudos de prospecção geofísica aplicados a diversas áreas de estudo de uma forma geral, mas direccionada para o estudo da prospecção mineira de depósitos minerais profundos, fornecendo bons resultados na determinação da sua geometria e desenvolvimento vertical e horizontal (Duarte *et al.*, 2014). Esta técnica, permite a detecção e localização de formações que exibam valores de resistividade contrastantes com os do restante meio geológico (AEMR, 2007), condições essas que se verificam existir no local estudado. A facilidade de transporte e versatilidade do equipamento, baixo custo operacional e fiabilidade dos dados, permite um vasto campo de aplicação e tornam os trabalhos de campo relativamente expeditos neste tipo de ambientes vulcânicos (Duarte *et al.*, 2017, 2017). Este método tem elevada resolução vertical.

A aplicação do método em zonas vulcânicas aparece vulgarmente associado a estudos hidrogeológicos como meio de identificar a circulação de fluidos hidrotermais e sistemas aquíferos, sendo de realçar os estudos desenvolvidos no vulcão Kilauea no Hawaii, Monte Somma-Vesuvio em Itália, vulcão Piton de la Fournaise na ilha de Réunião, vulcão Newberry, Oregon, USA e caldeira Masaya na Nicarágua (Kauahikaua, 1993; Fitterman *et al.*, 1988; Lénat *et al.*, 2000; Manzella *et al.*, 2004; MacNeil *et al.*, 2007, Duarte *et al.*, 2017).

2. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

A ilha do Fogo pertence ao grupo de ilhas do sotavento do arquipélago de Cabo Verde, que está localizado no oceano Atlântico, a cerca de 500 km da costa Africana e possui uma área de 477 km² (Figura 1), com uma altitude máxima de 2829 metros no cone central (Pico) e uma cratera com 9km de diâmetro, sendo de realçar que a cratera apresenta uma fenda na sua bordadura oriental. Esta ilha apresenta características de natureza vulcano-estratigráfica, apresentada na cronologia dos acontecimentos geológicos (Figura 2). As rochas basálticas do Fogo, que ocupam a maior parte da ilha sob o modo de escoadas, filões e chaminés, correspondem à fase efusiva, enquanto que os inúmeros cones vulcânicos de material piroclástico, também basálticos, correspondem à fase explosiva das erupções (Machado & de Assunção, 1965). Estratigraficamente a ilha é caracterizada pela sequência de escoadas vulcânicas intercaladas por camadas piroclásticas, sobre um soco com rochas mais antigas:

1. Rochas do Complexo Antigo (CA): Rochas alcalinas e carbonatitos, atravessada por filões basálticos. Camada tida como impermeável (BURGEAP, 1974 e BARMEN *et al.*, 1990);
2. Complexo Eruptivo Principal (CEP): Intercalações de escoadas lávicas e camadas piroclásticas;
3. Parte superior da ilha: Escoadas basálticas recentes.



Figura 1. Localização da ilha do Fogo no arquipélago de Cabo Verde, assinalada com um polígono. (adaptado de <http://www.portugalcaboverde.com>).

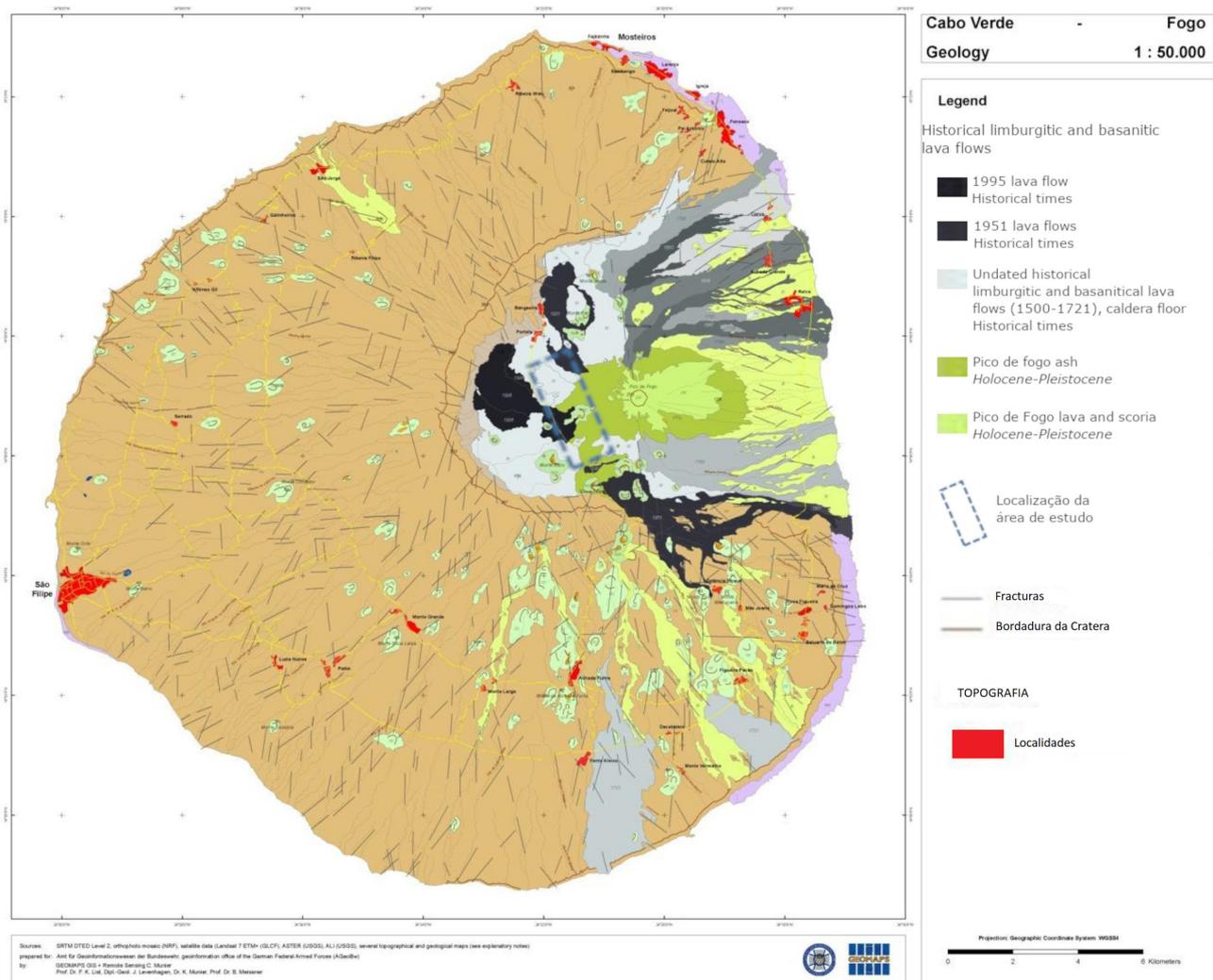


Figura 2. Carta geológica da ilha do Fogo, Cabo Verde, na escala de 1:50 000 e localização da área estudada, estando assinaladas na legenda da figura, com setas, as formações geológicas e escoadas vulcânicas abrangidas pela área estudada (adaptado de List *et al.*, 2007).

Estruturalmente é visível um grande número de estruturas tectónicas, sendo de realçar os três sistemas de falhas principais com orientações: NW-SE a WNW-ESE, N-S e NNE-SSW (Figura 3).

Cabo Verde é um arquipélago com precipitações na generalidade fracas, cujos valores médios não ultrapassam 300mm/ano para as zonas situadas abaixo de 400 metros de altitude e 700mm/ano para as zonas situadas a mais de 500 metros de altitude (INGRH, 2000, Lima e Garcia, 2011). O sistema hidrogeológico da Ilha foi descrito pela primeira vez nos trabalhos do BURGEAP (1974) onde é estabelecido um modelo de circulação que considera as pequenas nascentes, situadas a maior altitude, com a denominação local de “chupadeiros”, como se tratando de aquíferos locais, enquanto que as grandes nascentes, situadas na

costa, seriam resultado de aquíferos regionais com a zona de recarga localizada na caldeira do vulcão. A camada aquífera seria, segundo estes autores, a parte inferior, bastante fracturada, do CEP. A base do aquífero seria representada pelo topo do CA, considerado impermeável. Trabalhos posteriores (Barmem *et al.*, 1990) consideraram também o topo do CA como sendo impermeável e funcionando como base do aquífero regional, que teria início na caldeira do vulcão. Consideram também os “chupadeiros” como aquíferos locais devidos, no caso, à existência de grande número de filões na parte superior do CEP chamado, pelos autores, de Complexo Eruptivo da Bordeira (CEB). O modelo hidrogeológico está esquematizado na Figura 4 (Gesto, 2011).

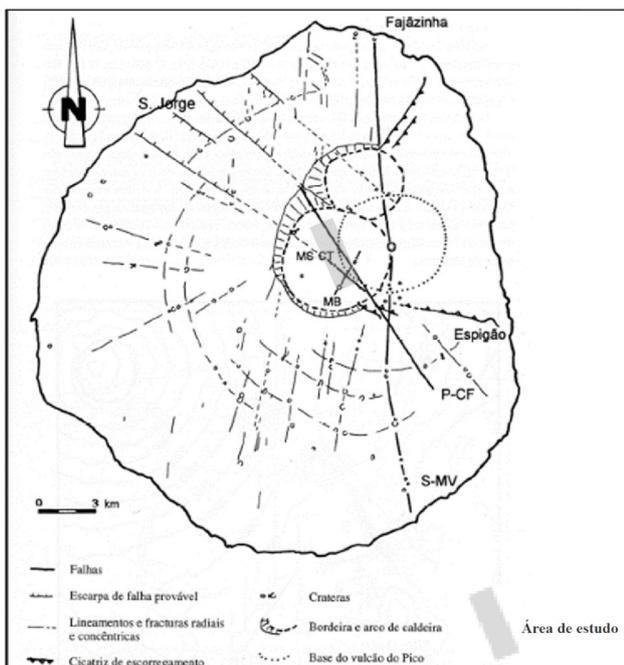


Figura 3. Esboço estrutural da Ilha do Fogo e localização da área estudada (adaptado de Brum da Silveira et al., 1997).

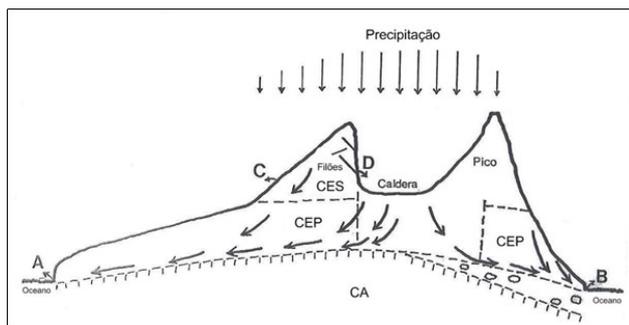


Figura 4. Modelo hidrogeológico da ilha do Fogo. CA – Complexo antigo, CEP – Complexo eruptivo principal, CES – Complexo eruptivo superior. A, B – nascentes junto à costa (Nossa Senhora do Socorro e Monte Vermelho, respectivamente. C – “Chupadeiros”, D – Nascente da Chã (Gesto, 2011).

3. MÉTODO E METODOLOGIA

A resistividade elétrica de uma formação geológica resulta diretamente da sua porosidade, do teor de água, à salinidade, à temperatura e ao aumento da presença de minerais de argila. Estes factores, conjuntamente com a anisotropia vertical e lateral dos materiais pétreos, são factores que tornam possível a monitorização de vulcões e sistemas hidrotermais através de métodos de prospecção geofísica que usem as propriedades físicas da resistividade eléctrica (Revil *et al.*, 2002). Os edifícios vulcânicos tendem a ter uma estrutura permeável que é facilmente infiltrada por água meteórica. Estes sistemas hidrotermais desenvolvem-se onde a água meteórica descendente encontra fluidos quentes e magmáticos, podendo estes, ser utilizados para produção de energia eléctrica a partir da geotermia.

Os conceitos teóricos, técnicas de interpretação e campos de aplicação do método TDEM estão descritos no trabalho de McNeill (1994).

A utilização deste método [TDEM] teve como objetivo a aplicação de uma metodologia de prospecção (dimensão das antenas, espaçamento entre sondagens e parâmetros físicos do equipamento) em ambientes vulcânicos, de modo a contribuir para a sua interpretação geofísica, geológica, estrutural e hidrogeológica.



Figura 5. Fotografia panorâmica do local da execução de uma das sondagens TDEM.

Para o efeito foram efetuadas 21 sondagens, georreferenciadas no seu ponto central, na proximidade da localidade de Chã das Caldeira, na Ilha Fogo, Cabo Verde, utilizado o equipamento TEM-FAST, com uma antena de geometria quadrada e dimensão com 200 metros de lado (Figura 5), que permita uma maior profundidade de investigação e alcançar estruturas geológicas em profundidade. A antena utilizada era de uma única espira, funcionando como transmissora e receptora do sinal. A distribuição dos 21 pontos de amostragem, foi seleccionada tendo em conta abranger uma vasta área que intercetasse o maior número de estruturas existentes, identificáveis à superfície (cones piroclásticos, escoadas e falhas) (Figura 6).



Figura 6. a) Localização da área de estudo, polígono a vermelho. b) Localização das sondagens eletromagnéticas e das erupções (Adaptado do Google Earth, 2017).

#	Name	X(m)	Y(m)	Z(m)	Res 1 (Ohm-m)	Res 2 (Ohm-m)	Res 3 (Ohm-m)	Res 4 (Ohm-m)	Thick 1 (m)	Thick 2 (m)
1	CABOVERDE	785293.0	1652024.0	1848.0	1279.34	1997.47	0.43	0.10	5.34	436.02
2	CABOVERDE	785290.0	1652168.0	1879.0	1260.00	1993.00	0.32	0.10	5.21	432.40
3	CABOVERDE	785249.0	1652278.0	1884.0	1536.00	1805.00	0.16	0.16	4.70	10.00
4	CABOVERDE	785198.0	1652374.0	1807.0	1111.00	1639.00	0.21	0.21	6.55	10.00
5	CABOVERDE	785106.0	1652270.0	1847.0	930.30	1648.00	0.47	0.47	7.50	10.00
6	CABOVERDE	784918.0	1652125.0	1801.0	47.51	1342.55	0.11	0.11	1.53	10.00
7	CABOVERDE	785085.0	1652555.0	1788.0	1899.00	0.93	0.14	0.14	442.50	10.00
8	CABOVERDE	784941.0	1652664.0	1809.0	1793.00	0.58	0.10	0.10	384.70	10.00
9	CABOVERDE	784843.0	1652757.0	1861.0	2000.00	3.48	15.90	15.90	608.70	10.00
10	CABOVERDE	784730.0	1652859.0	1856.0	1259.00	310.90	0.81	0.81	395.80	10.00
11	CABOVERDE	784685.0	1653024.0	1825.0	1991.00	0.39	0.10	0.10	312.00	10.00
12	CABOVERDE	784619.0	1653166.0	1811.0	2000.00	0.46	0.10	0.10	311.45	10.00
13	CABOVERDE	784737.0	1652541.0	1845.0	1329.00	88.30	0.10	0.10	350.20	10.00
14	CABOVERDE	784716.0	1652080.0	1781.0	1906.00	3.25	0.76	0.76	591.50	10.00
15	CABOVERDE	784102.0	1652052.0	1789.0	2000.00	0.56	0.10	0.10	381.50	10.00
16	CABOVERDE	783977.0	1652011.0	1821.0	2000.00	0.73	0.10	0.10	369.30	10.00
17	CABOVERDE	784010.0	1654144.0	1900.0	2000.00	0.49	0.10	0.10	408.70	10.00
18	CABOVERDE	783870.0	1654144.0	1740.0	2000.00	0.62	0.10	0.10	429.13	10.00
19	CABOVERDE	783941.0	1654146.0	1782.0	2000.00	1.56	0.10	0.10	371.10	10.00
20	CABOVERDE	783986.0	1654674.0	1843.0	1973.00	1.39	0.10	0.10	385.90	10.00
21	CABOVERDE	783882.0	1654835.0	1781.0	1794.97	1965.26	0.76	0.12	1.08	402.49

Figura 7. Valores das espessuras, profundidades e resistividades, em ficheiro .txt após inversão no TEM-RES-WIN.

O equipamento foi configurado para a aquisição ser efectuada com os seguintes parâmetros: Stack: 10; Time: 5; Frequência: 60Hz; Intensidade da corrente: 4A (com utilização de duas baterias de 12V, com tensão de alimentação de 24V), parâmetros esse que foram após a realização de alguns ensaios experimentais, considerados os mais adequados para obter dados com menor ruído possível e maior profundidade de investigação. Os dados recolhidos foram processados no programa TEM-RES-WIN (AEMR, 2009), tendo-se procedido à sua inversão para obtenção do modelo. Na primeira fase de processamento dos dados, foi efectuada com a utilização de algoritmos convencionais (inversão Occam e Marquardt, inversão quasi-2-D com limitação lateral) a inversão 1D dos valores registados das várias sondagens realizadas (Figura 7), sendo estes inicialmente verificados no próprio programa, de onde foram extraídos perfis 2D (Figura 8). Posteriormente foi efectuada uma interpolação em formato voxel data para a obtenção de um modelo geofísico tridimensional com representação das estruturas interpretadas, tendo-se procedido sequencialmente à integração do modelo geofísico na topografia para construção e coadjuvação na interpretação (Figura 8).

e descontinuidades), estruturas essas representadas na cartografia geológica já existente (Figura 10).

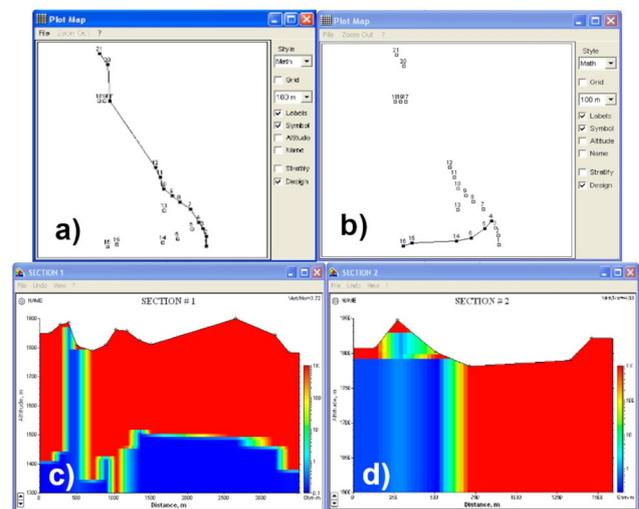


Figura 8. (a) Mapa de localização do perfil 1. (b) – Mapa de localização do perfil 2. (c) – Perfil 2D extraído de a. (d) – Perfil 2D extraído de b).

4. RESULTADOS

O modelo geofísico 3D obtido partir dos dados processados, evidencia a existência de valores de distribuição de resistividade bastante distintos, com amplitude que variam entre 655 e 1980 ohm/m. Os valores das anomalias superiores (>1185 ohm/m) pelo seu posicionamento, devem corresponder a escoadas de lava, que preenchem estruturas existentes e identificadas em Duarte *et al*, 2017 (Figura 9). Do modelo tridimensional, é perceptível o controlo estrutural das anomalias geofísicas subsuperficiais com uma relação directa com morfoestruturas existentes à superfície (falhas

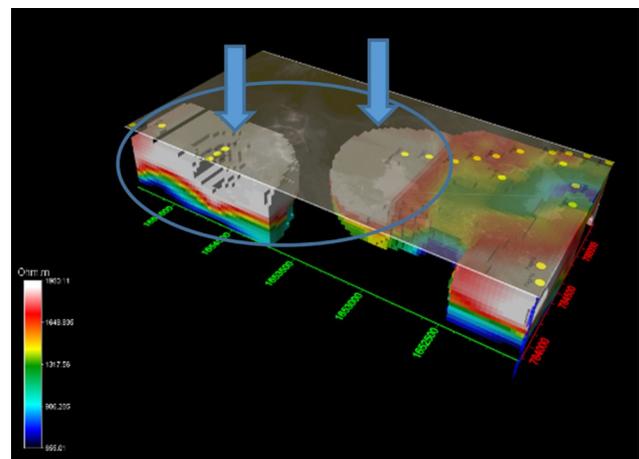


Figura 9. Modelo de resistividades 3D construído a partir da inversão dos dados de campo, com a localização das sondagens, (círculos amarelos) e escoadas de lava (elipse e setas azuis).

No modelo é ainda identificada uma anomalia com valores de resistividade inferiores ($<1185\text{ohm/m}$), que poderá corresponder aos limites de um possível aquífero superficial (indicado pela elipse azul), que se encontra a cerca de 200 m de profundidade, a uma altitude aproximada de 950 metros (Figura 11 b)). Na figura 11 a) observam-se anomalias com valores de resistividade mais baixa ($<1185\text{ohm/m}$) que poderão estar associadas à circulação de água através de uma estrutura subhorizontal. Este possível aquífero foi também evidenciado nos resultados obtidos pelo processamento dos dados de TDEM e de MT referidos no relatório da Gesto, 2011.

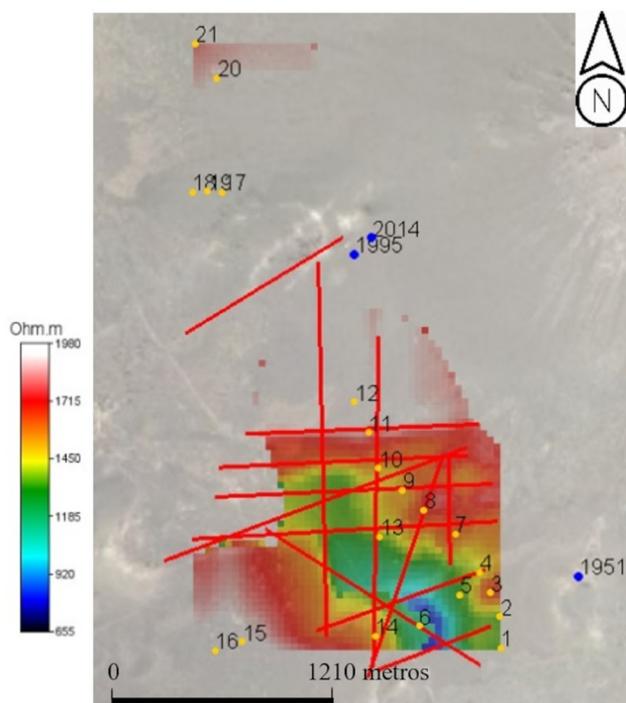


Figura 10. Modelo de resistividades 3D construído a partir da inversão dos dados de campo, com a localização das sondagens, (círculos amarelos), cones piroclásticos com a data das erupções (círculos azuis) e descontinuidades inferidas (linhas vermelhas).

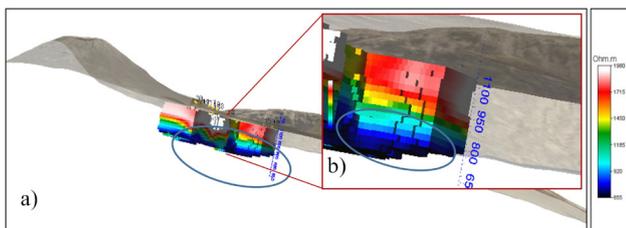


Figura 11. a) Modelo geofísico 3D, criado a partir dos valores de distribuições de resistividade por inversão dos dados das sondagens 1D. Elipse azul – Limites do possível aquífero. b) Pormenor dos limites e escala de altitudes.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

OTDEM revela-se como um método expedito, tanto no processo de aquisição como no processamento dos dados, podendo alcançar elevadas profundidades de investigação. É um método de prospecção pouco dispendioso, obtendo-se uma boa quantidade de informação a baixo custo e com boa resolução na obtenção de modelos que devem ser sempre correlacionados com dados de natureza topográfica e geológica/estrutural.

Em trabalhos futuros deveriam ser efectuadas mais campanhas de sondagens electromagnéticas, de modo a fazer uma melhor caracterização geofísica/geológica da unidade geológica onde está implantado o aquífero. Paralelamente, com o intuito de aumentar o conhecimento geológico e hidrogeológico da área devia proceder-se à execução de sondagens mecânicas com recuperação de testemunho, para calibração dos dados de campo recolhidos pela geofísica, fazer a sua correlação com a geologia da região, bem como proceder à execução de um furo para ensaios de bombagem, em locais a seleccionar de acordo com a geologia e os resultados obtidos nos trabalhos de prospecção geofísica. Com os resultados obtidos é possível caracterizar e dimensionar locais onde é possível construir novas captações de água, quer seja ela através de furos ou de pequenas galerias horizontais/subhorizontais construídas em flanco de encosta.

AGRADECIMENTOS

À IQGeo que disponibilizou equipamentos e suporte financeiro.

Ao Centro de Geociências da Universidade de Coimbra e ao Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra que disponibilizou o equipamento TEM-FAST.

À Universidade de Cabo Verde pelo apoio financeiro e logístico disponibilizados para a realização de missão. Agradecemos igualmente ao técnico Paulo Fernandes da UniCV pela colaboração prestada.

Agradecemos o apoio financeiro da FCT-MEC através de fundos nacionais e, quando aplicável, co-financiado pelo FEDER no âmbito da parceria PT2020, através do projecto de investigação UID/Multi/00073/2013 do Centro de Geociências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEMR (2007). Manual TEM-FAST48HPC. Version 7.3. Applied Electromagnetic Research (AEMR), The Netherlands.

- AEMR (2009). Manual TEM-RESEARCH. Version 7. Applied Electromagnetic Research (AEMR), The Netherlands.
- Barmem, G., Carvalho, V., Querido, A. (1990) – Groundwater-Related Geological and Isotopic Investigations on the Island of Fogo. Dept. of Engineering Geology Lund University Institute of Technology and Instituto Nacional de Investigação Tecnológica, Departamento de Geologia. Praia and Lund, 5 July, 1999.
- Brum da Silveira, A., Madeira, J., Serralheiro, A., Torres, P. C., Silva, L. C., & Mendes, M. H. (1997). O controlo estrutural da erupção de Abril de 1995 na ilha do Fogo. In 1st International Symposium “A erupção vulcânica de 1995 na ilha do Fogo, Cabo Verde, pp. 51-6).
- BURGEAP (1974) – La mise en valeur des eaux souterraines dans l’arquipel du Cap Vert. Brigada de Águas Subterrâneas de Cabo Verde. Final Report.
- Duarte, J. A. M., Figueiredo, F. P. O., & Mira, M. J. M. F. (2014). Caracterização geológico-estrutural de uma pedreira de dolerito com aplicação de prospecção geofísica e análise estrutural.
- Duarte, João; Cunha, Marco; Figueiredo, Fernando; Gonçalves, Gil; Lobo de Pina, António; Victória, Sónia (2017). CARACTERIZAÇÃO E MODELAÇÃO GEOFÍSICA NA CRATERA DO VULCÃO DO FOGO, CABO VERDE. In: 10º SIMPOSIO DE METEOROLOGIA E GEOFÍSICA DA APMG, 2017. Lisboa. 10º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG. 2017.
- Duarte, João; Cunha, Marco; Figueiredo, Fernando; Lobo de Pina, António; Victória, Sónia. (2017). CONTRIBUTO DO MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO DE TRANSIENTE (TEM) NA PROSPECÇÃO HIDROGEOLOGICA CASO DE ESTUDO NA ILHA DA BRAVA, CABO VERDE In: 11º Seminário sobre águas subterrâneas. Instituto Superior de Engenharia do Porto. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. ISBN: 978-989-8509-17-8. p. 12-13.
- Fitterman, D.V., Stanley, W. D., and Bisdorf, R. J. (1988). Electrical structure of Newberry volcano, Oregon, J. Geophys. Res., 93(B9), 10,119-10,134.
- Garcia, E. M. O. (2010) Gestão integrada dos recursos hídricos da ilha do Maio (Cabo Verde): o contributo das águas subterrâneas. Tese de mestrado, Universidade do Minho.
- Gesto (2011). PLANO ENERGÉTICO RENOVÁVEL DE CABO VERDE. Estudo do Recurso Geotérmico. p.14-15.
- Gomes, A. M. (2007) Hidrogeologia e recursos hídricos da Ilha de Santiago (Cabo Verde). Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.
- INGRH (2000) Visão Nacional sobre a Água, a Vida e o Ambiente no Horizonte. Instituto Nacional de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos, Praia, Cabo Verde.
- Kauahikaua, J. (1993). Geophysical characteristics of the hydrothermal systems of Kilauea volcano, Hawaii, Geothermics, 22(4), p. 271-299.
- Lénat, J. F., Fitterman, D., Jackson, D. B., and Labazuy, P. (2000). Geoelectrical structure of the central zone of Piton de la Fournaise volcano (Réunion), Bulletin of Volcanology, 62, 75-89.
- Lima, A. S. & Garcia, E.M.O. (2011) Gestão de águas subterrâneas em ambientes insulares. Caso de estudo da ilha do Maio (Cabo Verde).
- List, F. K., Klitzsch, E., Kusserow, H., Munier, K., Munier, C. & Levenhagen J. (2007) Cape Verde Islands: Santo Antão, São Vicente, Sal and Fogo, Thematic Maps, Geology. Geoinformations wesen der Bundeswehr (AGeoBW)/Geoinformation Office of the German Armed Forces.
- Machado, F., & de Assunção, C. F. T. (1965). Carta geológica de Cabo Verde, na escala de 1:100000 e notícia explicativa da folha da ilha do Fogo: estudos petrográficos. In: Garcia de Orta: Revista da Junta de Investigações do Ultramar. - Vol. 13, nº 4, p. 597-604.
- Manzella, A., Volpi, G., Zaja, A., and Meju, M. (2004). Combined TEM-MT investigations of shallow-depth resistivity structure of Mt Somma-Vesuvius, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 131, p. 19-32.
- McNeill, J.D. (1994). Principles and Application of Time Domain Electromagnetic Techniques for Resistivity Sounding. Technical Note TN-27, Geonics Ltd., Ontario, Canadá.
- MacNeil, R. A, Sanford, W. E, Connor, C. B., Sandberg, S. K. e Diez, M. (2007). Investigation of the groundwater system at Masaya Caldera, Nicaragua, using transient electromagnetics and numerical simulation. Journal of Volcanology and Geothermal Research 166 (2007), p 217 –232.
- Pina, A. F. L. (2009) Hidrogeoquímica e qualidade das águas subterrâneas da ilha de Santiago - Cabo Verde. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.
- Santos, F.A.M., Almeida, E.P., Gomes, A. M., & Pina, A. (2006) Hydrogeological investigation in Santiago Island (Cabo Verde) using magnetotellurics and VLF methods. Journal of African Earth Sciences, Volume 45, Issues 4–5, p. 421–430.

REFERÊNCIAS INTERNET

<http://www.portugalcaboverde.com>, consultada em Janeiro de 2019.

Google Earth Pro, consultada em Março de 2017.

Análise comparativa de métodos de transformação chuva-vazão para pequenas bacias urbanas

Comparative analyses of rainfall-runoff transformation methods for small urban basins

¹ Mestre em engenharia de recursos hídricos pela Escola Politécnica da USP. E-mail: luiz.carvalho.11@usp.br

² Professor Associado da EPUSP. Av. Prof. Almeida Prado, tr 3 n°380, 05508-970 São Paulo, SP. E-mail: scarati@usp.br

RESUMO: Diante da difusão do conceito de controle de cheias pela detenção distribuída em pequenas áreas, a escolha do método de transformação chuva-vazão e a estimativa das características geomorfológicas da bacia são determinantes para a qualidade do dimensionamento de pequenas estruturas de detenção aplicadas à drenagem urbana. Este trabalho, então, propõe uma análise comparativa do desempenho de três métodos de transformação chuva-vazão (Método do Hidrograma Unitário Racional, Método do NRCS e o Método de Clark) aplicados a uma pequena bacia localizada dentro dos limites do campus da Universidade de São Paulo, contrapondo-se a vazão de pico, o volume e a forma dos hidrogramas calculados aos dos hidrogramas de eventos reais. Para tanto, foram realizadas medições do nível d'água na seção de controle do canal de drenagem interno ao campus por meio de um sensor ultrassom de precisão de 0,25 centímetros e 1 minuto, desenvolvido no próprio laboratório da universidade, durante a época chuvosa do mês de março de 2019. As funções objetivo foram otimizadas ajustando-se os parâmetros relativos às perdas por infiltração e efeitos de retenção superficial concentradas no parâmetro C, no caso do método racional, e CN, no caso do método do NRCS, usado também para Clark.

Palavras-Chave: Drenagem urbana; hidrograma unitário; pequenas bacias.

ABSTRACT: In light of the diffusion of the concept of flood control by means of scattered retention in urban areas, the choice of the rainfall-runoff method and the estimation of the geomorphologic characteristics of the basin determine the accuracy of the sizing process of small retention structures applied to the context of urban drainage. This paper purposes a comparative analysis of the performance of three rainfall-runoff transformation methods (Modified Rational Unit Hydrograph, NRCS Unit Hydrograph and Clark Unit Hydrograph) applied to a small basin located within the borders of the University of São Paulo, comparing the peak discharge, the volume and the shape of the calculated hydrograph to the observed hydrograph. Water level measurements were then carried out on the control section of the universities' drainage canal using an ultrasonic sensor which was entirely developed inside the campus hydraulic laboratory, during the rainy month of March 2019. The optimization functions were refined adjusting the parameters relative to the losses by infiltration and initial retention concentrated in the parameter C, for the Rational Method, and CN for the NRCS method, used for Clark as well.

1. INTRODUÇÃO

Uma gama de soluções técnicas que realizam a detenção de um determinado volume de água de chuva em pequenos e médios lotes para reduzir o pico de runoff neles gerado foi e ainda está sendo desenvolvida e aprimorada recentemente, principalmente em países onde o conceito de drenagem sustentável está mais difundido, tanto no meio acadêmico quanto no meio técnico. São as chamadas LID's – Low Impact Development, WSUDS – Water Sensitive Urban Design ou SUDS – Sustainable Urban Drainage Systems, que incluem dentre outras técnicas, os reservatórios de detenção de pequeno porte para controle do escoamento na fonte (Mascarenhas *et al.*, 2005). Todavia, essas soluções apresentam ainda alguma incerteza em razão de alguns fatores, dentre eles, a carência de referências técnicas nacionais que balizem o seu dimensionamento adequado, notadamente quanto à localização e volume, assim como a carência de recursos para sua implantação.

A utilização, em pequenas bacias, de modelos hidrológicos originalmente desenvolvidos para contextos mais amplos ou genéricos pode frequentemente resultar picos de vazão e/ou volumes de armazenamento superestimados, levando a custos de implantação maiores que os necessários, o que torna a solução economicamente pouco interessante. (Mascarenhas *et al.*, 2005). Nesse contexto, o aprimoramento dos modelos hidrológicos que sejam mais adequados para o caso de pequenas bacias visa contribuir para o desenvolvimento de soluções menos sujeitas a distorções, as quais frequentemente aumentam o custo de implantação e dificultam a difusão do conceito.

A trajetória deste ramo da hidrologia registrou o nascimento de uma variedade desses modelos, dentre os quais destacam-se o Método do NRCS – Natural Resources Conservation Service (NRCS, 1957) e o Método de Clark (Clark, 1945). Ainda, existem aqueles derivados da teoria do Método Racional, dentre os quais destaca-se o Método do Hidrograma Unitário Racional (Singh e Cruise, 1992), concebido especificamente para pequenas bacias. Esses modelos são utilizados pela maioria dos softwares de modelagem hidrológica adotados na prática da engenharia de projetos em diferentes contextos, inclusive para o dimensionamento de pequenas estruturas de detenção. Vale destacar, porém, que a maioria desses modelos foram concebidos por meio de análises de grupos específicos de bacias, transmitindo as peculiaridades desses grupos para as características dos hidrogramas gerados pelos respectivos métodos. Dessa forma, a aplicação

generalizada desses métodos, frequentemente implica distorções, que ao longo do tempo motivaram o desenvolvimento de algumas adaptações a esses modelos de forma a incluir aspectos específicos regionais nas características dos hidrogramas gerados.

Esses três modelos aparecem frequentemente na literatura devido sua ampla utilização no meio técnico (Innocente e Chaffe, 2017) sendo que foram e continuam sendo avaliados comparativamente com relação ao seu desempenho em diferentes estudos de caso. Exemplos recentes indicam conclusões variadas pois frequentemente dependem do contexto em que estão sendo feitas as avaliações. Alguns estudos recentemente publicados apontam melhores resultados do Método de Clark em determinados casos quando comparado a outros métodos, como o Método Racional (Seibt *et al.*, 2012) e o Método do NRCS (Wilkerson e Merwade, 2010). Da mesma forma, existem estudos que apontam um melhor desempenho do método Racional em relação ao Método do NRCS em pequenas bacias (Tassi, 2015), e outros apontam um melhor desempenho do Método do NRCS em relação aos demais. Ainda assim, são poucos os trabalhos que tenham avaliado comparativamente o desempenho desses três modelos especificamente para pequenas bacias urbanas, menores que 2 km², ordem de grandeza comum para áreas drenadas por pequenas estruturas de detenção.

Este trabalho aborda a análise comparativa desses três métodos de transformação chuva-vazão aplicados a um mesmo contexto, uma bacia muito pequena drenada por um pequeno canal de drenagem aberto. Será analisada a aderência dos hidrogramas calculados aos hidrogramas observados, derivados de registros minuto a minuto da variação do nível d'água na seção de controle do canal que recebe a drenagem de grande parte da área do campus da USP. Serão avaliadas às vazões de pico, a forma do hidrograma e os volumes de escoamento de cada método sob as mesmas condições de contorno.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise comparativa do desempenho dos três métodos de transformação chuva-vazão selecionados será realizada por meio de um estudo de caso em uma pequena bacia urbana real, localizada no município de São Paulo, Brasil, e seu comportamento observado na ocorrência de cinco eventos pluviométricos de diferentes intensidades, durações e distribuições temporais, ocorridos durante o mês de março de 2019. Cada evento corresponderá a um pluviograma e um hidrograma

observados através de uma estação pluviográfica, localizada dentro do campus da USP, a poucos metros da seção de controle do canal de drenagem monitorado neste estudo.

Cada um dos três métodos receberá como dado de entrada a chuva total correspondente ao evento e produzirá um hidrograma, considerando as perdas iniciais por infiltração e retenção superficial em seus respectivos métodos de geração de chuva excedente e transformação do excesso em vazão. O método do hidrograma unitário racional modificado usará o parâmetro C para a quantificação desse efeito, em quanto o método do NRCS utilizará o parâmetro CN, atrelado ao cálculo de perdas desenvolvido pelo NRCS. O método de Clark também utilizará a metodologia do NRCS para o cálculo da chuva excedente, também por meio do parâmetro CN.

O tempo de concentração da bacia, grandeza de elevado significado físico e fundamental importância na caracterização do hidrograma, será estimado por meio de fórmulas semi-empíricas, que correlacionam as características geomorfológicas da bacia ao desenvolvimento do escoamento. O método do Hidrograma Racional Unitário Modificado utilizará a fórmula proposta pelo FAA – Federal Aviation Agency, que atrela o tempo de concentração ao parâmetro C da bacia. Os métodos do NRCS e de Clark utilizarão a fórmula proposta pelo NRCS, a qual relaciona o tempo de concentração ao tempo de retardo da bacia, também atrelando a sensibilidade desse parâmetro às características geomorfológicas da bacia, porém por meio do parâmetro CN.

Os hidrogramas gerados por cada modelo para cada evento serão comparados com os hidrogramas reais registrados, tomando-se como referência a vazão máxima, o erro médio absoluto (MAE) das ordenadas de vazão e o volume total do hidrograma. Cada hidrograma observado foi derivado dos registros de nível d'água a cada minuto durante a ocorrência do evento de precipitação, por meio da curva-chave do canal de drenagem desenvolvida para a seção de controle analisada neste estudo. A intenção da elevada precisão temporal dos registros é observar com maiores detalhes a sensibilidade do canal à passagem da onda de cheia gerada por precipitações de diferentes durações, distribuições temporais e intensidades (inclusive precipitações de pequeno volume) e a capacidade dos modelos de simular essa sensibilidade.

2.1 Caracterização da área de estudo

A bacia analisada neste estudo encontra-se localizada internamente ao campus da Universidade

de São Paulo e possui uma área de 1,089 km², a qual foi determinada após a análise cruzada da topografia, por meio do modelo digital de terreno, com as informações do levantamento cadastral das redes de drenagem do campus, ambos fornecidos pela administração central da universidade. A figura 1 abaixo ilustra a área de estudo e a seção de controle do canal de drenagem onde foram realizadas as medições da variação do nível d'água.



Figura 1. Imagem aérea e delimitação da bacia de estudo (fonte: Google Earth).

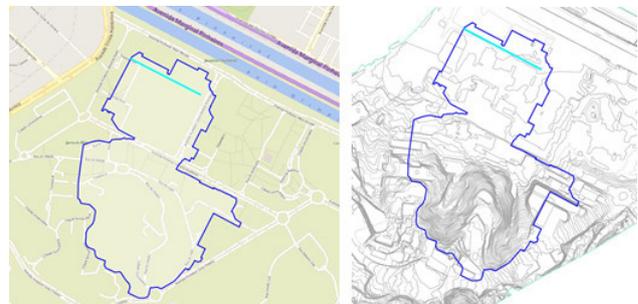


Figura 2. Delimitação da bacia em um mapa extraído do GoogleMaps (esq.) e em um modelo digital da topografia (dir.).

2.2 Monitoramento dos eventos

Para o registro da vazão escoada em cada evento foi estabelecida uma seção de controle em um canal para a qual foi estimada uma curva de descarga. Nesta seção foi estimado um registrador de nível ultrassônico com precisão de 0,25 centímetros e frequência de aquisição de 1 minuto, de modo a captar com precisão a resposta hidrológica da bacia para precipitações de diferentes características temporais e testar a aderência dos modelos a essa sensibilidade. O sensor foi instalado na face inferior

do tabuleiro de uma ponte de pedestres sobre o canal de drenagem da área de estudo. Extamente abaixo dessa ponte é a seção de estudo para a qual foi desenvolvida a curva chave do canal. O sensor utiliza tecnologia de um processador arduíno e um cartão de memória micro SD que registra os dados de altura d'água de minuto a minuto e os registra no cartão, que é posteriormente colhido e descarregado em computador pessoal.

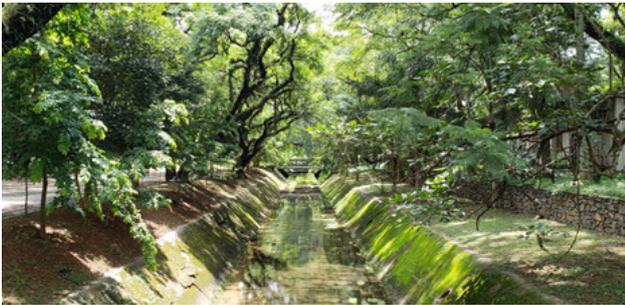


Figura 3. Canal de drenagem na seção de monitoramento do nível d'água.



Figura 4. Sensor ultrassônico e local de aferição de medidas.

Os hietogramas correspondentes aos eventos registrados pelo sensor foram obtidos do banco de dados do SAISP – Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (www.saisp.br), que monitora em tempo real a altura de precipitação de diversos pontos da bacia do Alto Tietê, onde se encontra a microbacia deste estudo. Foram então utilizados os dados do pluviômetro do CTH-USP, o qual é localizado a 480 metros do local da seção de estudo. No total foram registrados 9 eventos, de diferentes durações e intensidades, dos quais 5 foram selecionados para a calibração dos modelos analisados. As figuras abaixo mostram cada um dos eventos selecionados, combinando o hietograma e o hidrograma correspondente.

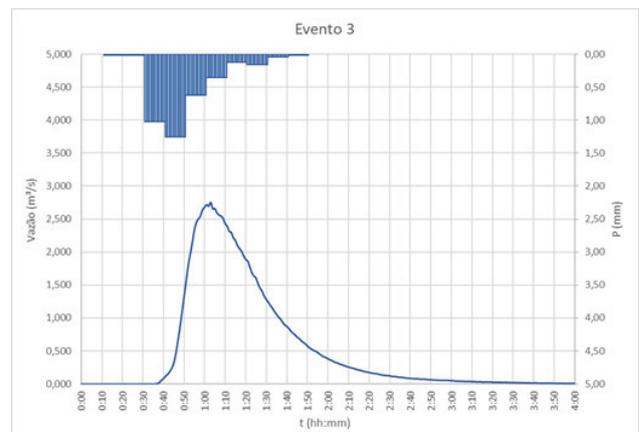
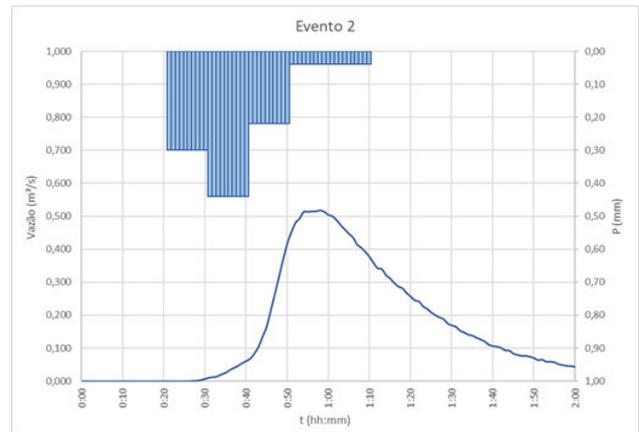
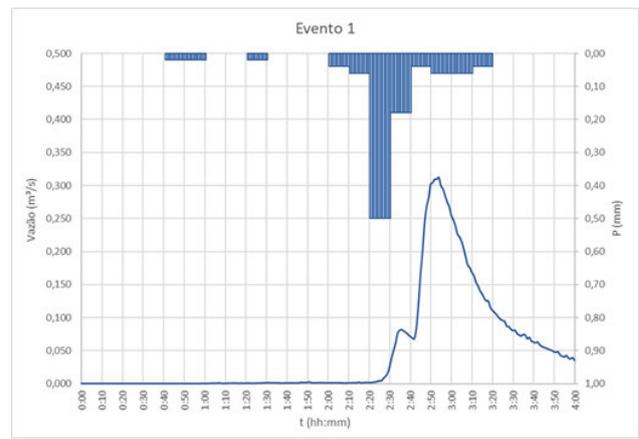


Figura 5. Eventos monitorados: hietogramas e hidrogramas correspondentes.

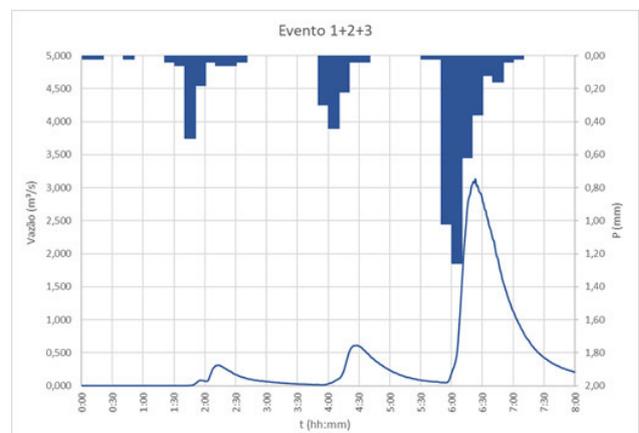


Figura 6. Eventos monitorados: hietogramas e hidrogramas correspondentes - continuação.

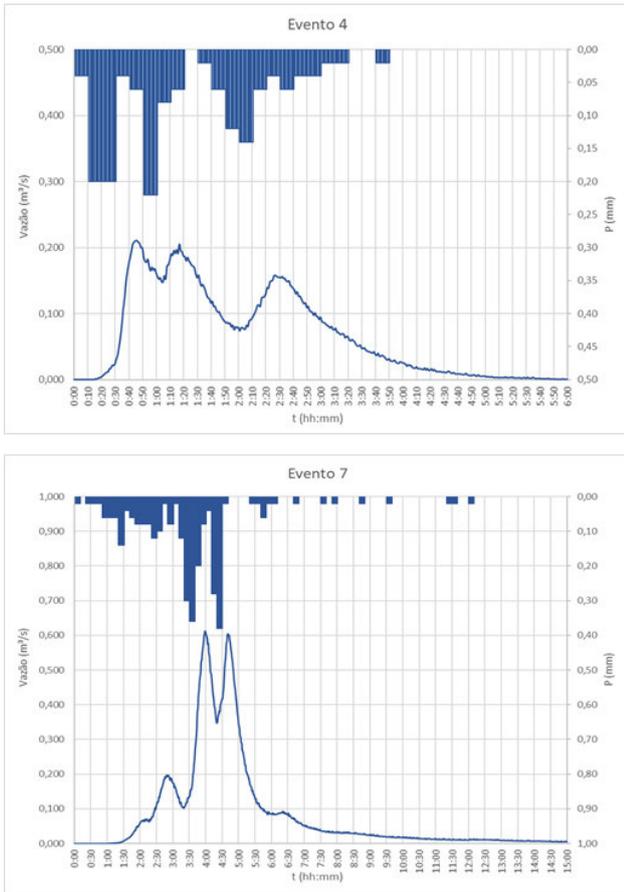


Figura 6. Eventos monitorados: hietogramas e hidrogramas correspondentes - continuação.

2.3 Calibração dos modelos

Para a análise foram estabelecidas três funções objetivos diferentes: a primeira considerando como parâmetro de otimização somente a vazão de pico; a segunda considerando somente a forma do hidrograma, expressa pelas ordenadas de vazão ponto a ponto e pelo tempo de pico; e a terceira considerando somente o volume máximo do hidrograma isoladamente. O critério utilizado para avaliar a qualidade da calibração dos modelos em relação à vazão máxima e ao volume máximo foi o erro percentual entre os valores calculados e observados, conforme expressas pelas equações 1 e 2, abaixo:

$$E_{Q_{m\acute{a}x}} = \left| \frac{Q_{m\acute{a}x\ calc} - Q_{m\acute{a}x\ obs}}{Q_{m\acute{a}x\ obs}} \right| \quad (1)$$

$$E_{V_{m\acute{a}x}} = \left| \frac{V_{m\acute{a}x\ calc} - V_{m\acute{a}x\ obs}}{V_{m\acute{a}x\ obs}} \right| \quad (2)$$

Já o critério utilizado para avaliar a qualidade da calibração dos modelos em relação à forma do hidrograma foi o MAE (*Mean Absolute Error*) que indica o erro médio absoluto das ordenadas de vazão, e o erro percentual entre os valores calculados

e observados do tempo de pico, cujas relações são indicadas pelas equações 3 e 4, respectivamente, abaixo:

$$MAE_Q = \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{calc_i} - Q_{obs_i}}{n} \right| \quad (3)$$

$$E_{t_p} = \left| \frac{t_{p\ calc} - t_{p\ obs}}{t_{p\ obs}} \right| \quad (4)$$

As funções objetivo para cada parâmetro foram então construídas de forma a minimizar os valores dos erros ajustando-se os parâmetros relativos às perdas por infiltração e efeitos de retenção superficial concentradas no parâmetro C, no caso do método racional, e CN, no caso do método do NRCS, usado também para Clark.

$$F.O._1 = \min(E_{Q_{m\acute{a}x}}) \quad (1)$$

$$F.O._2 = \min(E_{V_{m\acute{a}x}}) \quad (2)$$

$$F.O._3 = \min(MAE_Q + E_{t_p}) \quad (3)$$

Muitos trabalhos costumam apresentar o RMSE (Root Mean Squared error) alternativamente ao MAE, porém o RMSE apresenta algumas limitações, sobretudo na forma como pode tornar pouco clara e objetiva a interpretação do erro medido (Willmott and Matsuura 2005), e, portanto, será descartado para esta análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Cada um dos 5 eventos selecionados, e, também, o hidrograma dos eventos 1, 2 e 3 em sequência, foi simulado com os três métodos de transformação chuva-vazão e para as três funções objetivo estabelecidas em 2.3, totalizando 54 cenários de simulação. Cada cenário é calibrado para uma das 3 funções objetivo, mas também é avaliado em relação aos outros critérios de erro, sendo que o erro total é obtido pela soma da F.O. otimizada e os valores obtidos para os demais critérios eq. (1) a (4).

Tabela 1. Melhor evento simulado para cada método.

	Σ Erros	Evento	FO	Q
HRUM	0,462	7	FO2	0,612
NRCS	0,413	7	FO1	0,612
CLARK	0,377	1	FO1	0,312

A tabela 1 acima mostra o evento simulado com o menor erro total para cada um dos três métodos. O método que apresentou a melhor performance (o menor erro total, somando-se a F.O. otimizada e

os outros critérios de erro) foi o Método de Clark, calculado para o evento 1 e otimizado pela F.O.1, relativa à vazão máxima, cujo erro total foi calculado em 0,377, apresentado no hidrograma abaixo.

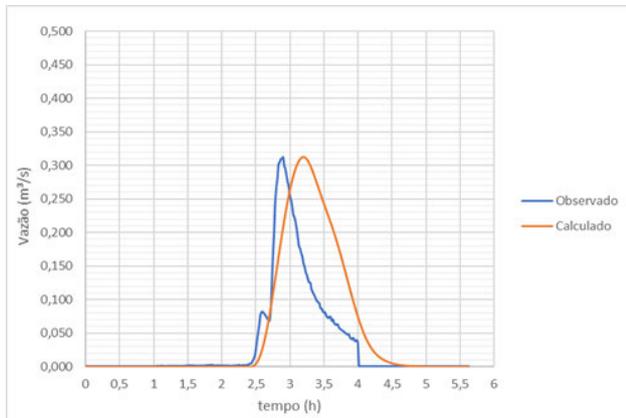


Figura 7. Cenário da melhor simulação: Método de Clark, Evento 1, F.O.1.

No entanto, considerando o desempenho geral dos 54 cenários simulados, nota-se duas conclusões importantes: em primeiro lugar, a F.O.2 foi a função objetivo que apresentou os melhores resultados de calibração considerando-se a soma dos erros de todas as simulações que foram calibradas pelo volume máximo, incluindo-se os erros dos outros critérios de performance relacionados; em segundo lugar, o Método de Clark foi o que apresentou os melhores resultados de calibração considerando a soma dos erros de todas os cenários simulados e considerando a calibração para as 3 F.O. No entanto, como não se realizou a calibração otimizando-se simultaneamente as 3 F.O.'s, vale ressaltar que cada F.O. apresentou um método específico mais aderente, conforme é possível inferir da tabela 2, a seguir.

Tabela 2. Soma dos erros de todas as simulações.

	HRUM	NRCS	CLARK	Σ Erros
FO1	11,334	8,337	7,317	26,988
FO2	6,564	7,805	9,521	23,890
FO3	8,581	11,471	9,284	29,337
Σ Erros	26,479	27,613	26,123	

4. CONCLUSÕES

As verificações indicam, a princípio, que o Método do Hidrograma Unitário Racional Modificado é o método que produz a pior aderência aos valores observados quando a calibração é realizada pela vazão máxima, F.O.1. No entanto, foi o método que apresentou a melhor performance geral quando a calibração é realizada pela otimização do volume

máximo, F.O.2. Ainda, em uma análise global, a calibração dos modelos pela vazão máxima, F.O.2, foi a que produziu os menores erros totais, sendo por tanto, a que menos influencia negativamente os demais parâmetros do hidrograma em benefício da otimização própria. No contexto do dimensionamento de estruturas de detenção em ambiente urbano, entende-se que a vazão máxima isoladamente não é suficiente para a adequada estimativa da evolução dos volumes de escoamento superficial no tempo, sendo, portanto, necessária a estimativa adequada dos volumes e da forma do hidrograma de cheia. Dessa maneira, os resultados sugerem que a simulação de eventos de projeto pelo Hidrograma Racional Unitário Modificado calibrado pela otimização dos volumes produziria os melhores resultados para o projeto de estruturas de detenção associadas à drenagem de pequenas bacias em ambiente urbano. Ainda assim, mais estudos de caso semelhantes ainda seriam necessários para a confirmação dos indícios apontados neste estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ANA – Agência Nacional de Águas através do Projeto CAPES/ANA – MOMA, e à FCTH – Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica pela viabilização da instrumentação usada na pesquisa.

REFERÊNCIAS

CLARK, C. O. Storage and the unit hydrograph: Transactions. American Society of Civil Engineers [Em linha]. vol. 110, n°2261 (1945), p.1419-1488. [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: http://ponce.sdsu.edu/clark_paper_portrait.pdf>.

INNOCENTE, C.; CHAFFE, P. L. B. Uma revisão preliminar sobre a aplicação do hidrograma unitário na pesquisa, no ensino e na engenharia. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil (2017). [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: http://evolvedoc.com.br/xxiibrh/detalhes-598_uma-revisao-preliminar-sobre-a-aplicacao-do-hidrograma-unitario-na-pesquisa-no-ensino-e-na-engenharia>

MASCARENHAS, F. et al. On-site stormwater detention as an alternative flood control measure in ultra-urban environments in developing countries. In: Seventh IAHS Scientific Assembly at

Foz do Iguaçu., At Foz do Iguaçu, Brazil. [Em linha]. vol. 110, nº293 (2005), p.196-203. [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: <https://iahs.info/uploads/dms/13112.32%20196-202%20s2-06%20Mascarenhas%2061.pdf>>

NRCS. Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application. U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C. (1957).

SEIBT, A. C. *et al.* Comparação das vazões de projeto pelo método racional e método tempo área para bacias urbanas do município de Goiânia – GO. REEC - Revista eletrônica de engenharia civil. [Em linha] vol. 4, nº2 (2012). [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/19513>>

TASSI, R. Comparação de duas metodologias para determinação do volume de detenção em pequenas bacias urbanas: O Caso De Porto Alegre/RS. Universidade Federal de Santa Maria.

In: Congreso nacional del agua e III simpósio de recursos hídricos del cono sur. (2005). [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.irrigacion.gov.ar/conagua2005/>>

WILKERSON, J. L.; MERWADE, V. M. Determination of Unit Hydrograph Parameters for Indiana Watersheds. Technical Release, final report. Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana (2010). [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: <https://docs.lib.purdue.edu/jtrp/1124/>>

WILLMOTT, C. J. & K. MATSUURA. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate research. Vol. 30, nº1 (2005), p. 79-82. [Consult. 21 Fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL: <https://www.int-res.com/abstracts/cr/v30/n1/p79-82/>>

Água Virtual e gestão de recursos hídricos: Reflexões sobre a pauta de exportação de produtos agrícolas no semiárido brasileiro

Virtual water and water resources management: Thoughts on agricultural trade policy in Semiarid Brazil

Sérgio R. ROCHA¹, Ticiano M. C. STUDART², M. Manuela PORTELA³, Rogério S. STUDART FILHO⁴, Alessandra de Mensurado PIRES⁵

¹ Banco Central do Brasil, Av. Heráclito Graça, 273 - Centro, Fortaleza, Ceará, Brasil, CEP 60140-061

² Dept. de Enga. Hidráulica e Ambiental (DEHA) - Universidade Federal do Ceará (UFC), Bloco 713, Campus do Pici, Fortaleza, Ceará, Brasil, CEP 60451-970, e-mail: ticiano@ufc.br

³ Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade, CERIS, Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa (UL), Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, email: maria.manuela.portela@ist.utl.pt

⁴ Mestrado em Bioenergia, Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), Universidade Nova de Lisboa, Calçada de Alfazina 2, 2825-149, Caparica, Portugal, email: rogeriosolianistudartfilho@gmail.com

⁵ Mestrado em Urbanismo Sustentável e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas (FCSH), Universidade Nova de Lisboa, Avenida Berna 26 C, 1069-061, Lisboa, Portugal, email:alessandramensurado@hotmail.com

RESUMO: O presente estudo estimou a pegada hídrica azul, verde e cinzenta dos principais produtos agrícolas da pauta de exportação do Estado do Ceará, no Semiárido Brasileiro, no período 1997 a 2012. Conclui-se que praticamente toda a água virtual exportada em produtos agrícolas pelo Ceará é proveniente da cadeia produtiva da castanha de caju, tanto pela grande quantidade exportada, como pela sua elevada pegada hídrica total. Felizmente, 72% da água virtual requerida na sua produção é água verde. O caso da castanha de caju evidencia que a água verde precisa de ser também urgentemente incorporada na gestão da água, eventualmente, através de técnicas de irrigação mais eficientes ou destinadas a reduzir a evapotranspiração do solo (como por exemplo o mulche). Este último aspeto é tanto mais relevante, quanto o Ceará executa há quase 30 anos uma política de gestão de recursos hídricos considerada exemplar no Brasil, contudo, sem nunca ter atendido à água virtual como uma nova dimensão do problema. A metodologia que se apresenta, para além de chamar a atenção para o problema da gestão dos recursos hídricos em zonas semiáridas e para a relevância da compreensão e da quantificação das transferências do recurso inerentes à exportação de produtos agrícolas (designadamente nas componentes azul, verde e cinzenta que constituem a água virtual), pode ser replicada a contextos afins, como os que ocorrem em algumas Ilhas de Cabo Verde.

Palavras-Chave: Água virtual; pegada hídrica; castanha de caju, Ceará

ABSTRACT: This paper aims to quantify the contribution of agricultural trade in terms of virtual water flows – blue, green and gray – between the state of Ceará-Brazil and its international partners from 1997 to 2012. Essentially, all virtual water exported and imported by Ceará in agricultural products came from cashew nuts, due its high virtual water consumption (in l/kg) and the large quantities produced (in kg). Fortunately, 72% of the virtual water required for cashew nut production comes directly from rain (green water). The cashew nut case highlighted that green water is by far the largest share of virtual water embodied in exportable agricultural products from Ceará State. Interestingly, virtual water has an important role in production but has been underestimated in the state's water resources management model, which despite successful over the past 30 years. The methodology presented, in addition to drawing attention to the problem of managing water resources in semi-arid areas and to the importance of understanding and quantifying the transfers of virtual water on agricultural products (blue, green and gray), can be replicated in similar contexts, such as those that occur in some Cabo Verde islands.

Keywords: Virtual water; water footprint; cashew nut; Ceará.

1. INTRODUÇÃO

O comércio internacional é visto hoje como um meio de permuta de recursos hídricos via água virtual entre regiões do Planeta (Fan *et al.* 2019; Dalin *et al.* 2012). Países exportadores de gêneros alimentícios são, na prática, fontes de água virtual (Yang *et al.* 2007; Dang 2015).

Inicialmente a 'água virtual' referia-se unicamente à água contida nos produtos (Allan 1998); ao longo dos anos o conceito evoluiu e hoje engloba toda a água envolvida na cadeia produtiva de um bem ou serviço (Allan 2011; Konar *et al.* 2011; Oki *et al.* 2017). A pegada hídrica, por sua vez, é um indicador de consumo e avalia o volume de água usado nos bens e serviços que são consumidos e utilizados pelos habitantes de uma região (Hoekstra *et al.* 2011; Wang *et al.* 2013; Hoekstra 2013; Hoekstra 2017).

A pegada hídrica da produção agrícola de um produto específico pode variar consideravelmente de uma região para outra, em consequência de diferenças climáticas e dos sistemas produtivos (Kongboon and Sampattagul 2012). A elevada evapotranspiração potencial característica das zonas áridas e semiáridas, faz com que a produtividade da água aí usada na produção agrícola seja baixa (Arabi *et al.* 2012). Com efeito e exemplificando, produzir um quilograma de uma gramínea numa região árida pode exigir duas ou três vezes mais água do que produzilo numa região húmida (Velázquez *et al.* 2011). Tal circunstância pode indicar se, do ponto de vista do recurso hídrico, a importação de um bem (mas também a de um serviço) é mais vantajosa do que a sua produção no local do consumo. Nesse entendimento, países ricos em água deveriam produzir commodities exportáveis requerendo alta incorporação de água nas suas cadeias produtivas, deste modo suprindo necessidades de países com escassez hídrica, os quais poderiam alocar seus limitados recursos hídricos para utilizações prioritárias (Verma *et al.* 2009; El-Sadek 2010).

O presente trabalho analisa a pegada hídrica associada a produtos agrícolas no Estado do Ceará, bem como trocas de água virtual – verde, azul e cinzenta - entre esse Estado e diversos países, seus principais parceiros comerciais. A pegada hídrica verde refere-se à utilização da água retida no solo; a azul, à utilização dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos; e a cinzenta, à água poluída em consequência da produção de bens ou de serviços, correspondendo ao volume necessário para assegurar a diluição dos poluentes e as metas de qualidade. A distinção entre água azul e água verde é importante, dado que a azul tem um custo de

oportunidade maior do que o da verde (Falkenmark 2003; Rockström 2001).

Localizado no Semiárido Brasileiro, o Ceará (área de cerca de 149.000 km²) é considerado hoje um dos estados brasileiros mais avançados na gestão de recursos hídricos. Apesar das suas características hidroclimatológicas desfavoráveis – alta variabilidade inter e intra anual da precipitação, rios intermitentes e altas taxas de evapotranspiração - os produtos agrícolas tem um peso considerável na balança comercial do Estado. Em termos financeiros, cerca de 22% da pauta de exportação cearense é constituída por castanha de caju e frutas.

Assim, o trabalho que se apresenta teve por objetivo compreender e quantificar os fluxos de 'água virtual' entre o Ceará e parceiros internacionais seus, analisando a pauta de exportação anual dos principais produtos agrícolas do Estado durante o período de 1997 a 2012, com especial atenção na castanha de caju, responsável por 16,4% da pauta de exportação e por 74%, da pauta dos produtos agrícolas mais relevantes. Análises do tipo da que se apresenta terão cada vez mais relevância na identificação de soluções para uma melhor gestão hídrica, designadamente em ambientes que se esperam vir a ser progressivamente mais afetados por escassez hídrica.

2. METODOLOGIA

Os dados quantitativos necessários ao estudo desenvolvido foram obtidos das seguintes fontes oficiais dos governos do Ceará e do Brasil (proveniências identificadas por Ceará e Brasil, respetivamente): Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC, Brasil), Sistema AgroStat de Estatísticas de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, Brasil), Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, Brasil), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, Brasil), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, Brasil), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, Brasil), Secretaria do Desenvolvimento Agrário do Estado do Ceará (SDA, Ceará), Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Ceará (EMATERCE, Ceará), Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE, Ceará), Agência do Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE, Ceará), Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Ceará (ADAGRI, Ceará), Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, Ceará) e Environmental Protection Agency (EPA, EUA).

Foram escolhidos os produtos básicos agrícolas

mais relevantes, constantes das estatísticas do MDIC (2013), avaliados em dólares americanos (US\$) e a preços Free On Board (FOB), das pautas de exportação do Estado do Ceará, para o período de 1997 a 2012 (período com dados disponibilizados pelo MDIC). Os dados mensais dos valores financeiros (US\$) e das quantidades exportadas (kg) foram obtidos na Secretaria de Comércio Exterior (SECEX), do MDIC, por intermédio do Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior (AliceWeb) (MDIC, 2013).

A pegada hídrica dos produtos exportados foi calculada, para efeitos da pesquisa inerente ao presente estudo, de acordo com a abordagem da produção, que quantifica a água virtual como sendo a consumida no lugar de produção da mercadoria (Chapagain and Hoekstra 2003), ou seja, para o caso de estudo, no Ceará. Para cada cultura exportada, foi selecionado o município cearense com maior produção (em quilogramas), no período pesquisado. O tipo de lavoura e o modo de satisfação das necessidades hídricas de cada cultura exportada foram os predominantes no respectivo município maior produtor.

O IPECE, o IBGE, o MAPA, a CONAB, a SDA, a EMBRAPA e a EMATERCE foram as fontes de pesquisa de dados de produtividade das culturas produzidas no Ceará. A produtividade de culturas de ciclo anual foi baseada nas estatísticas oficiais de produção agrícola, sendo considerada a produtividade média anual ao longo do ciclo completo da cultura. No presente estudo, foi calculada a média anual de produtividade de cada cultura, para os dezasseis anos pesquisados. Quanto às culturas permanentes, foi necessário atender a que a produtividade no primeiro ano da plantação é baixa, ou praticamente nula, cresce após alguns anos e diminui quando o ciclo da cultura finaliza. Para quantificar a consumo de água de uma cultura permanente é preciso determinar a média anual de utilização desse recurso ao longo de seu ciclo completo de vida (Hoekstra *et al.* 2011).

Os dados de coeficientes culturais e datas de plantação e de colheita no período de dezasseis anos a que se refere o estudo foram pesquisados na EMBRAPA e EMATERCE. Com base em tais dados, foram calculadas as respectivas médias anuais, para cada município e para cada cultura, as quais foram usadas nos cálculos anuais da pegada hídrica.

Resume-se, seguidamente, a metodologia de cálculo de cada componente da pegada hídrica, sendo que os padrões de pegada hídrica dos produtos selecionados foram quantificados de acordo com The Water Footprint Assessment Manual (Hoekstra *et al.* 2011).

2.1 Pegada hídrica verde

A componente verde da pegada hídrica, relativa ao processo de crescimento de uma cultura, arbórea ou não, foi determinado por meio da Equação 2.1.

$$PH_{verde} = \frac{10 \times \sum_{d=1}^{dpc} ET_{verde}}{P} \quad [2.1]$$

em que PH_{verde} é o padrão da pegada hídrica verde (m^3/t); 10, um fator adimensional que converte altura de água (mm) em volume por unidade de área (m^3/ha); ET_{verde} , a evapotranspiração verde da cultura (mm/dia), a qual é acumulada desde o dia da plantação, $d=1$, até ao final do período de crescimento, dpc (dias); e P é a produtividade da cultura (t/ha).

ET_{verde} é dada pelo valor mínimo da evapotranspiração da cultura, ET_c (mm/dia), e da precipitação efetiva PE (mm/dia) (Equação 2.2). A evapotranspiração verde é nula quando se tratar de uma cultura de regadio (Chapagain and Hoekstra 2011).

$$ET_{verde} = \min(ET_c, PE) \quad [2.2]$$

2.2 Pegada hídrica azul

Na quantificação da pegada hídrica azul utilizou-se a Equação 2.3:

$$PH_{azul} = \frac{10 \times \sum_{d=1}^{dpc} ET_{azul}}{P} \quad [2.3]$$

em que as novas variáveis se referem ao padrão da pegada hídrica azul, PH_{azul} (m^3/t) e à parcela de evapotranspiração baseada na água azul, ET_{azul} (mm/dia), a qual é também acumulada para o período antes especificado.

ET_{azul} é dada pelo valor máximo entre zero e a diferença entre a evapotranspiração cultura e a precipitação efetiva (Equação 2.4). Se a precipitação efetiva for superior à evapotranspiração da cultura (caso, por exemplo, de uma cultura de sequeiro), a evapotranspiração azul é nula (Chapagain and Hoekstra 2011).

$$ET_{azul} = \max(0, ET_c - PE) \quad [2.4]$$

2.3 Pegada hídrica cinzenta

A quantificação da pegada hídrica cinzenta foi efetuada de acordo com a Equação 2.5:

$$PH_{cinzenta} = \frac{(\alpha \times TA) / (c_{máx} - c_{nat})}{P} \quad [2.5]$$

em que $PH_{cinzenta}$ é o padrão da pegada hídrica cinzenta (m^3/t); α , a fração de lixiviação

(adimensional); TA , a taxa de aplicação de fertilizantes, inseticidas ou pesticidas (kg/ha); $c_{máx}$ e c_{nat} as concentrações máxima admissível e natural do poluente no meio hídrico receptor; e P (t/ha) tem o significado antes apresentado.

Os poluentes são constituídos, de modo geral, por fertilizantes (nitrogénio, fósforo, potássio e outros), inseticidas e pesticidas. O nitrogénio pode ser considerado como o principal indicador de impacto da utilização de fertilizantes em sistemas produtivos, sendo utilizada a fração de lixiviação – quantidade de nitrogénio que chega livre aos corpos hídricos – de 10% da taxa de aplicação, em kg/ha, de acordo com padrão de água potável, recomendado pela EPA, de 10 mg N/litro (EPA 2013), que, para efeitos dos cálculos efetuados no trabalho que se apresenta, foi adotado como sendo a concentração máxima. Os valores adotados para as para taxas de aplicação de nitrogénio foram obtidos da EMBRAPA e EMATERCE.

2.4 A pegada hídrica total

O padrão da pegada hídrica total, PH_{total} (m³/t), é dada pela soma dos padrões relativos às componentes verde, azul e cinzenta de todo o processo de crescimento da cultura, conforme Equação 2.6:

$$PH_{total} = PH_{verde} + PH_{azul} + PH_{cinzenta} \quad [2.6]$$

Os dados de precipitação foram facultados pela FUNCEME, sendo que em todos os municípios selecionados existem postos udométricos. A precipitação média diária refere-se aos dezasseis anos estudados. Ressalte-se que cada cultura tem seu período de crescimento específico, sendo considerada, para efeitos de suprimento da respetiva necessidade hídrica, a precipitação que realmente ocorreu durante esse período.

O cálculo da evapotranspiração de referência de cada cultura, ET_o , utilizou o método Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), baseado no efeito combinado do transporte convectivo das massas de ar e da radiação líquida e que requer dados de temperatura, humidade, insolação e velocidade do vento, de solo, além de características da cultura. Tais dados foram obtidos a partir das estações meteorológicas do INMET localizadas em cada um dos municípios selecionado como principal produtor de uma dada cultura. Caso não exista uma estação meteorológica nas anteriores condições, adotaram-se os dados da estação mais próxima. As estações climatológicas selecionadas foram as que se seguem, sendo que os municípios são identificados entre parêntesis:

Beberibe (Jaguaruana), Icapuí (Jaguaruana), Iguatu (Iguatu), Limoeiro do Norte (Morada Nova), Mauriti (Barbalha), Meruoca (Sobral), Morada Nova (Morada Nova), Santa Quitéria (Sobral), Trairi (Acarauá) e Varjota (Sobral).

Para cada município, foi calculada a média anual de evaporação de referência. A evapotranspiração de cada cultura foi obtida multiplicando a anterior evapotranspiração pelo coeficiente de cultura em causa, conforme a Equação 2.7.

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad [2.7]$$

em que ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm); K_c , o coeficiente de cultura (adimensional); e ET_o , a evapotranspiração de referência (mm).

A quantificação do volume da pegada hídrica de um produto foi obtida por meio da multiplicação do padrão de consumo da pegada hídrica pela quantidade exportada ou importada, de acordo com a Equação 2.8.

$$PH_{exp/imp} = PH_{total} \times Q_{exp/imp} \quad [2.8]$$

em que $PH_{exp/imp}$ é o volume total, exportado ou importado, da pegada hídrica por produto (l); PH_{total} , é o padrão de pegada hídrica total do produto exportado ou importado (l/kg); e $Q_{exp/imp}$, a quantidade exportada ou importada desse produto (kg).

3. RESULTADOS

Os produtos agrícolas exportados selecionados estão discriminados na Tabela 3.1, representando, em termos financeiros, cerca de 22% de toda a pauta de exportação cearense entre 1997 e 2012. Realça-se a grande importância da castanha de caju, responsável por 16,4%, da pauta de exportação, e por 74%, da pauta dos produtos agrícolas mais relevantes. Em quantidade (t), o produto agrícola mais exportado é o melão fresco.

A Tabela 3.2 apresenta, para cada cultura exportada, o município cearense com maior produção no período considerado, o tipo de agricultura praticada e o modo de satisfação das necessidades hídricas dessa cultura. Como referido, a pegada hídrica dos produtos exportados foi calculada de acordo com a abordagem da produção, que considera a água virtual como sendo a consumida nos respetivos locais de produção.

Na Tabelas 3.3 apresenta-se a produtividade, o coeficiente de cultura, o período de plantação e de colheita e a taxa de aplicação de fertilizantes, pesticidas e inseticidas por produto de exportação do Ceará (1997–2012), para as culturas exportadas.

Verifica-se que, de entre as culturas exportáveis, a castanha de caju possui a menor taxa de aplicação de fertilizantes, inseticidas e pesticidas (22kg/ha). Verifica-se, ainda, que não obstante a correspondente evapotranspiração de referência (ET_o) ser próxima das evapotranspirações de referência das demais culturas, o baixo coeficiente cultural (K_c = 0,55) faz com que as perdas por evapotranspiração sejam mais reduzidas. Contudo,

a baixa produtividade (apenas de 0,3 t/ha) implica extensas áreas agricultadas.

As pegadas hídricas (verde, azul, cinzenta e total) obtidas para os diferentes produtos exportados no período analisado são apresentadas na Tabela 3.4. As pegadas de cada tipo dependem da cultura, do modo de satisfação da necessidade hídrica e do local de produção, nomeadamente, em termos de solo e de clima.

Tabela 3.1. Produtos selecionados da pauta de exportação do Ceará (1997–2012).

Produto	Quantidade (t)	10° US\$	% da pauta de exportação
Abacaxi fresco ou seco	111.841,8	52,7	0,39
Banana fresca ou seca	113.023,7	45,5	0,33
Banana fresca ou seca, exceto banana-da-terra	22.233,5	9,8	0,07
Castanha de caju, fresca ou seca, sem casca	463.251,4	2.228,7	16,37
Manga fresca ou seca	29.244,8	19,8	0,15
Mamão (papaia) fresco	5.256,3	4,2	0,03
Melancia fresca	142.852,8	62,3	0,46
Melão fresco	876.643,9	559,8	4,11
Total		2.982,8	21,91

Fonte: MDIC (2013).

Tabela 3.2. Pauta de exportação do Ceará (1997–2012). Municípios produtores, tipo de agricultura e modo de satisfação da necessidade hídrica por produto.

Produto	Município	Agricultura	Modos de satisfação da necessidade hídrica
Abacaxi fresco ou seco	Icapuí	Temporária	Sequeiro e irrigação
Banana fresca ou seca	Limoeiro do Norte	Permanente	Sequeiro e irrigação
Banana fresca ou seca, exceto banana-da-terra	Limoeiro do Norte	Permanente	Sequeiro e irrigação
Castanha de caju, fresca ou seca, sem casca	Beberibe	Permanente	Sequeiro e irrigação
Manga fresca ou seca	Varjota	Permanente	Sequeiro e irrigação
Mamão (papaia) fresco	Mauriti	Permanente	Sequeiro e irrigação
Melancia fresca	Icapuí	Temporária	Irrigação
Melão fresco	Icapuí	Temporária	Irrigação

Fonte: MDIC (2013), MAPA (2013), CONAB (2013), EMBRAPA (2013), IBGE (2013), SDA (2013), EMATERCE (2013) e IPECE (2013).

Tabela 3.3. Produtos da pauta de exportação do Ceará (1997–2012). Produtividade (Prod), período de plantação e de colheita das culturas, taxa de aplicação de fertilizantes, pesticidas e inseticidas por produto (TF), coeficiente de cultura (K_c), evapotranspiração de referência (ET_o) e evapotranspiração da cultura.

Produto	Prod (t/ha)	Plantação e colheita		TF (kg/ha)	(K _c)	E _{to} (mm)	E _c (mm)
		Período	Duração (dias)				
Abacaxi fresco ou seco	60,1	Março a abril do outro ano	420	80	0,88	5,2	4,57
Banana fresca ou seca	23,0	Permanente	365	100	0,96	5,6	5,36
Banana fresca ou seca, exceto banana-da-terra	23,0	Permanente	365	100	0,96	5,6	5,36
Castanha de caju, fresca ou seca, sem casca	0,3	Permanente	365	22	0,55	5,2	2,85
Manga fresca ou seca	55,7	Permanente	365	240	0,91	5,0	4,59
Mamão (papaia) fresco	16,5	Permanente	365	118	0,71	4,7	3,34
Melancia fresca	37,8	Agosto a outubro	75	102	1,10	5,2	5,71
Melão fresco	28,3	Agosto a outubro	65	50	1,06	5,2	5,50

Fonte: Elaborado com base em dados de IPECE (2013), IBGE (2013), MAPA (2013), CONAB (2013), SDA (2013), EMBRAPA (2013) e EMATERCE (2013), INMET (2013)

Observa-se que a castanha de caju apresenta a maior pegada hídrica total, correspondendo, em valor absoluto, a 99,1% de toda a água virtual exportada em produtos agrícolas. Felizmente, 72% da água virtual necessária à sua produção provém diretamente da chuva (visto tratar-se de uma cultura de sequeiro). A nível mundial, as médias das pegadas hídricas verde, azul e cinzenta da castanha de caju são de 90,4%, 6,5% e 3,1%, respetivamente, pelo que se conclui que a utilização, em termos percentuais, de água oriunda da irrigação (água azul) para produzir castanha de caju no Ceará é superior à média mundial. O padrão de consumo de água cinzenta no Ceará é de 2,1% é inferior a média mundial.

De entre os resultados obtidos, menciona-se a estimativa de cerca de 40.000 l/kg de água virtual para produzir castanha de caju no Ceará; nas Honduras tal valor reduz-se para cerca de 7.000 l/kg, sendo que a correspondente média mundial é de aproximadamente 14.000 l/kg (Mekonnen; Hoekstra, 2010). Constata-se, assim, a pouca eficiência do Estado do Ceará no que respeita à produção da castanha de caju. Apesar deste facto, o Ceará é responsável por 80% de toda a castanha de caju brasileira exportada. Em 2011, o Brasil foi o quinto maior produtor e o terceiro maior exportador mundial dessa mercadoria (MDIC 2013). Face ao elevado consumo de água virtual da castanha de caju produzida no Ceará (em l/kg) e das grandes quantidades produzidas (em kg), e devido a sua importância económica para o Estado - a castanha responde por 16,4% de toda a pauta de exportação (em valores financeiros) - os

gestores de recursos hídricos do Ceará poderiam realizar estudos visando diminuir a correspondente pegada azul. No período analisado, a água virtual azul exportada somente nesse produto foi estimada em 4.742,6 hm³, correspondendo a cerca de 70% da capacidade do reservatório Castanhão, o maior reservatório do Estado do Ceará e a sua mais importante reserva estratégica, com uma capacidade de armazenamento (6.700,0 hm³) tal que o classifica também como a maior barragem para fins múltiplos da América Latina.

Como se explicita na Tabela 3.7, 71,5% da água virtual necessária para produzir os produtos agrícolas exportáveis é verde, ou seja, é diretamente oriunda da chuva, referindo-se a agricultura de sequeiro.

De entre os produtos irrigados que mais consomem água azul - a qual poderia ser alocada a outros usos - estão o melão, a melancia e a banana (por esta ordem). A melancia, além de uma das maiores pegadas hídricas azuis, é a que apresenta maior pegada cinzenta, o que indica a utilização de fertilizantes, pesticidas e inseticidas na sua produção, contribuindo para a contaminação da água na bacia hidrográfica onde é cultivada. Observa-se que a água virtual azul exportada nas mercadorias agrícolas (4.878,3 hm³) no período de dezasseis anos analisado representa igualmente uma fração muito elevada da capacidade do reservatório Castanhão, ou ainda cerca de 2,5 vezes a capacidade do reservatório Orós (1.940 hm³), a segunda maior reserva de água do Estado.

Este estudo também identificou os países que mais importaram água virtual do Estado do Ceará

Tabela 3.4. Pegadas hídricas (PHs) verde, azul e cinzenta e total (PHT) por produto de exportação do Ceará (1997–2012).

Produto	PH Verde		PH Azul		PH Cinzenta		PH Total	
	Consumo (hm ³)	%	Consumo (hm ³)	%	Consumo (hm ³)	%	Consumo (hm ³)	%
Abacaxi fresco ou seco	22,5	60,5	13,2	35,5	1,5	4,0	37,2	0,2
Banana fresca ou seca	34,1	33,7	62,0	61,4	4,9	4,9	101,0	0,5
Banana fresca ou seca, exceto banana-da-terra	6,7	33,7	12,2	61,4	1,0	4,9	19,9	0,1
Castanha de caju, fresca ou seca, sem casca	13.200,1	72,0	4.742,6	25,9	378,9	2,1	18.321,5	99,1
Manga fresca ou seca	0,9	47,9	0,7	39,6	0,2	12,5	1,8	0,0
Mamão (papaia) fresco	13,7	58,1	7,8	33,1	2,1	8,8	23,7	0,1
Melancia fresca	-	0,0	16,2	80,8	3,9	19,2	20,0	0,1
Melão fresco	-	0,0	110,9	87,7	15,5	12,3	126,5	0,7
Soma	13.214,7	-	4.878,3	-	400,5	-	18.493,5	-
% PHT de todas as culturas	71,5		26,4		2,2			

Fonte: Elaborado com base em dados de MDIC (2013), FUNCEME (2013), INMET (2013), MAPA (2013), CONAB (2013), EMBRAPA (2013), IBGE (2013), SDA (2013), EMATERCE (2013), IPECE (2013), ADECE (2013), ADAGRI (2013) e EPA (2013).

no período analisado. Concluiu-se, assim, que os Estados Unidos, isoladamente, respondem por 65,3% da água virtual exportada em produtos agrícolas pelo Ceará, resultante, principalmente da compra da castanha de caju: de entre os 72 países importadores desse produto, 66,5% vai para os Estados Unidos. Dado que 99,1% das exportações de água virtual via produtos agrícolas do Ceará se refere à castanha de caju (4.742,6 hm³, como antes referido), significa que os EUA receberam do Ceará 3.153,4 hm³ de água virtual, ou seja, cerca de 94% de toda a água virtual exportada pelo Ceará.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que, em termos monetários, a castanha de caju é responsável por 16,4% da pauta de exportação do Estado. Pela grande quantidade exportada e pela sua elevada pegada hídrica total - a maior entre todos os produtos agrícolas exportados - praticamente toda (99,1%) a água virtual exportada em produtos agrícolas pelo Ceará é proveniente da cadeia produtiva dessa cultura. Felizmente, 72% da água virtual requerida na sua produção provem diretamente da chuva (agricultura de sequeiro), sendo que não produz muita carga poluente (a pegada hídrica cinzenta é de apenas 2,1% da sua pegada hídrica total). Contudo, a água azul necessária à sua produção (25,6%) é muito significativa (4.742,6 hm³, cerca de 70% da capacidade do reservatório Castanhão - o maior reservatório do Estado do Ceará e a sua mais importante reserva estratégica, com uma capacidade de armazenamento de 6.700,0 hm³) tal que o classifica também como a maior barragem para fins múltiplos da América Latina.

Não obstante o volume de água virtual necessário para produzir 1 kg de castanha de caju no Ceará (40.000 l) ser quase o triplo da média mundial (Mekonnen and Hoekstra 2010) tal Estado é responsável por 80% de toda a castanha de caju brasileira exportada. Em 2011, o Brasil foi o quinto maior produtor e o terceiro maior exportador mundial desse produto (MDIC, 2013).

Os Estados Unidos, isoladamente, receberam 65,3% de toda a água virtual transferida do Ceará nos produtos agrícolas, resultante, principalmente da compra da castanha de caju, ou seja, 3.153,4 hm³ de água destinada à irrigação (água azul) (o equivalente a cerca de metade da capacidade do reservatório Castanhão).

É importante ressaltar o papel da água verde para a pauta de exportação do Estado. No Ceará, apesar do bem sucedido modelo de gestão de recursos hídricos, as águas geridas são unicamente as azuis,

armazenadas em reservatórios superficiais, os quais são operados de modo eficiente pela companhia de gestão de águas do Estado, com a participação pública. Contudo, o foco no Estado exclusivamente na água azul subestima o papel da água verde, como fator de produção relevante e que precisa de ser também urgentemente incorporado na gestão da água, eventualmente, através de técnicas de irrigação mais eficientes ou destinadas a reduzir a evapotranspiração do solo (tais como o mulche). É importante lembrar que a precipitação interceptada, absorvida pelas plantas e evapotranspirada compreende cerca de 65% dos fluxos de água doce da Terra (Falkenmark and Rockstrom 2004). Contudo, por regra, as interações água-solo-planta são completamente desconsideradas (Brown *et al.* 2009).

No caso de estudo, este último aspeto é tanto mais relevante, quanto o Ceará executa há quase 30 anos uma política de gestão de recursos hídricos considerada exemplar no Brasil, contudo, sem nunca ter atendido à água virtual como uma nova dimensão do problema.

A finalizar, não se pode deixar de destacar a metodologia utilizada que, para além de quantificar das transferências do recurso inerentes à exportação de produtos agrícolas (designadamente nas componentes azul, verde e cinzenta que constituem a água virtual), é detalhada o bastante para poder ser replicada a contextos afins, como os que ocorrem em algumas Ilhas de Cabo Verde.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, para o segundo autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAGRI. AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO ESTADO DO CEARÁ. Governo do Estado do Ceará. Secretaria do Desenvolvimento Agrário. *Defesa vegetal*. Disponível em: <www.adagri.ce.gov.br>. Acesso em: 23 dez. 2013.

ADECE. AGÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DO CEARÁ. Governo do Estado do Ceará. Conselho Estadual de Desenvolvimento Econômico. *Setores da economia*. Disponível em: <<http://www.adece.ce.gov.br>>. Acesso em: 24 dez. 2013.

Allen, R. G.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture

- Organization of the United Nations (FAO) Irrigation and Drainage, Rome, paper 56, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/XO49OE/XO49OEOO.htm>>. Acesso em: 13 fev. 2013.
- Arabi, A.; Alizadeh, A.; Rajaei, Y. V.; Jam, K.; Niknia, N. Agricultural water footprint and virtual water budget in Iran related to the consumption of crop products by conserving irrigation efficiency. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 4, p. 318-324, 2012.
- Brown, S.; Schreier, H.; Lavkulich, L. M. Incorporating virtual water into water management: a British Columbia example. *Water Resources Management*, v. 23, p. 2681-2696, 2009.
- Chapagain, A. K.; Hoekstra A. Y. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products. *Value of Water Research Report Series*, Delft, the Netherlands, Unesco-IHE Institute for Water Education, n. 13, 2003.
- Chapagain, A. K.; Hoekstra A. Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, v. 70, p. 749-758, feb. 2011.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Governo do Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Produtos e serviços: indicadores da agropecuária*. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 20 dez. 2013.
- Dalin, C.; Konar, M.; Hanasaki, N.; Rinaldo, A.; Rodriguez-Iturbe, I. Evolution of the global virtual water trade network. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) of the United States of America*, v. 109, n. 16, p. 5989-5994, 2012.
- Dang, Q; Lin, X; Konar, M. Agricultural virtual water flows within the United States. *Water Resources Research*, v. 51, n. 2, p. 973-986, feb. 2015.
- El-Sadek, A. Virtual water trade as a solution for water scarcity in Egypt. *Water Resources Management*, v. 24, p. 2437-2448, 2010.
- EMATERCE. EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO CEARÁ. Governo do Estado do Ceará. Secretaria do Desenvolvimento Agrário. *Publicações*. Disponível em: <www.ematerce.ce.gov.br/>. Acesso em: 13 out. 2013.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Governo do Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Agricultura*. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/>>. Acesso em: 11 out. 2013.
- EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Drinking water contaminants*. Disponível em: <www.epa.gov/safewater/mcl.html#1>. Acesso em: 29 nov. 2013.
- Falkenmark, M.; Rockström, J. *Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology*. London: Earthscan, July 2004.
- Fan, X.; Li, X.; Yin, J.; Liang, J. Temporal Characteristics and Spatial Homogeneity of Virtual Water Trade: A Complex Network Analysis. *Water Resources Management*, v. 33, p. 1467-1480, 2019.
- FUNCEME. FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. Governo do Estado do Ceará. Secretaria da Ciência, Tecnologia e Educação Superior. *Tempo: download das séries históricas*. Disponível em: <<http://www.funceme.br/>>. Acesso em: 13 nov. 2013.
- Hoekstra, A. Y. The water footprint of modern consumer society. *Water Resources Management*, v. 27, n. 11, p. 3846-3848, sept. 2013.
- Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. *The water footprint assessment manual: setting the global standard*. Water Footprint Network. London: Earthscan, 2011.
- Hoekstra, A. Y. Water Footprint Assessment: Evolution of a New Research Field. *Water Resources Management*, v. 31: 3061, 2017.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Governo do Brasil. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. *Banco de dados*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 19 nov. 2013.
- INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Governo do Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Estações e dados*. Disponível em: <www.inmet.gov.br/>. Acesso em: 23 out. 2013.
- IPECE. INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. Governo do Estado do Ceará. Secretaria do Planejamento e Gestão. *Banco de dados: cipp*. Disponível em: <<http://www.ipece.ce.gov.br/>>. Acesso em: 13 out. 2013.
- Konar, M.; Dalin, C.; Suweis, S.; Hanasaki, N.; Rinaldo, A.; Rodriguez-Iturbe, I. Water for food: the global virtual water trade network. *Water Resources Research*, v. 47, n. 5, May 2011.

- Kongboon, R.; Sampattagul, S. The water footprint of sugarcane and cassava in northern Thailand. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, v. 40, p. 451-460, 2012.
- MAPA. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Governo do Brasil. *Vegetal*. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 13 dez. 2013.
- MDIC. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. Governo do Brasil. Secretaria de Comércio Exterior (Secex). *Comércio exterior*, 2013 <<http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/index.php?area=5>>. Acesso em: 13 out. 2013.
- Mekonnen, M. M.; Hoekstra, A. Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Value of Water Research Report Series*, Delft, the Netherlands, Unesco-IHE Institute for Water Education, n. 47, 2010.
- Oki T, Yano S, Hanasaki N (2017) Economic aspects of virtual water trade. *Environ Res Lett* 12(4):044002
- Rockström, J.; Gordon, L. Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: implications for future ecohydrological landscape management. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, v. 26, n. 11-12, p. 843-85, 2001.
- SDA. Secretaria do Desenvolvimento Agrário do Estado Ceará. Governo do Estado do Ceará. *Informações e serviços*. Disponível em: <www.sda.ce.gov.br/>. Acesso em: 13 out. 2013.
- Velázquez, E.; Madrid, C.; Beltrán, M. J. Rethinking the concepts of virtual water and water footprint in relation to the production-consumption binomial and the water-energy nexus. *Water Resources Management*, v. 25, p. 743-761, 2011.
- Verma, S.; Kampman, D. A.; Van Der Zaag, P.; Hoekstra, A. Y. Going against the flow: a critical analysis of inter-state virtual water trade in the context of India's national river linking program. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 34, p. 261-269, 2009.
- Wang, Z.; Huang, K.; Yang, S.; Yu, Y. An input-output approach to evaluate the water footprint and virtual water trade of Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, v. 42, p. 172-179, mar. 2013.
- Yang, H.; Zehnder, A. "Virtual water": an unfolding concept in integrated water resources management. *Water Resources Research*, v. 43, n. 12, dec. 2007.

As lacunas na gestão de recursos hídricos sob a perspectiva de povos e comunidades tradicionais no Pantanal sul-mato-grossense

Gaps in water resources management from the perspective of traditional peoples and communities in the Pantanal of Mato Grosso do Sul

Josiane FELIPE¹, Synara BROCH², Áurea GARCIA³, Rafaela NICOLA⁴

¹ Engenheira Ambiental, josianebarbosa.engenharia@gmail.com

² Professora adjunta da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Geografia (FAENG), synara.broch@gmail.com

³ Doutoranda em Ensino de Ciências pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), aureasgarcia@gmail.com

⁴ Mestre em Ecologia e Conservação, Diretora Executiva da Wetlands International no Brasil, rafaela.nicola.eco@gmail.com

RESUMO: No Pantanal sul-mato-grossense, situado na Bacia do Alto Paraguai, o modo de vida de povos e comunidades tradicionais está intimamente ligado aos recursos hídricos locais, pois vivem e desenvolvem seus valores econômicos, culturais, sociais, religiosos e ancestrais subsidiados pelas águas da região. Com o objetivo de identificar as lacunas da gestão hídrica que afetam as comunidades tradicionais que vivem na região do pantanal sul-mato-grossense, foi realizada uma pesquisa qualitativa exploratória por meio da análise de entrevistas realizadas junto a ribeirinhos, isqueiros, pescadores e quilombolas nas cidades de Corumbá, Coxim, Sonora e Pedro Gomes, no estado de Mato Grosso do Sul, situado no Brasil. A análise foi embasada em referências bibliográficas com o intuito de correlacionar os resultados obtidos pelas entrevistas e as situações presenciadas em campo com as ações propostas no Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Paraguai. A pesquisa de campo foi realizada no âmbito das atividades do Programa Corredor Azul, da Wetlands International, promovido no Brasil com o apoio da organização não governamental Mulheres em Ação no Pantanal. A atividade mostrou problemas pontuais de acesso à água potável, uma vez que não há serviço de saneamento básico. Foram observadas alterações nas atividades econômicas de pesca e conflitos pelo uso da água. Conforme relatos dos entrevistados, a construção de barragens é a principal causa para a diminuição dos estoques pesqueiros evidenciado pelos mesmos. Há incipiente participação dos membros dessas comunidades nos colegiados de gerenciamento de recursos hídricos. Concluiu-se que os conflitos potenciais e existentes pelo uso das águas no pantanal sul-mato-grossense atingem as comunidades tradicionais de maneira distinta não apontada na aplicação dos instrumentos de planejamento e gestão de recursos hídricos em tramite. Sendo assim, há indicativo de que abordagens que acompanhem as necessidades e particularidades dessas comunidades tradicionais sejam necessárias para a manutenção do modo de vida de povos e comunidades tradicionais da região.

Palavras-Chave: plano de recursos hídricos, gestão, povos e comunidades tradicionais

ABSTRACT: In the Pantanal of the state of Mato Grosso do Sul, located in the Upper Paraguay Basin, the way of life of traditional peoples and communities is closely linked to local water resources, as they live and develop their economic, cultural, social, religious and ancestry values subsidized by the waters of the region. In order to identify water management gaps that affect traditional communities living in the Pantanal region of Mato Grosso do Sul, an exploratory qualitative research was conducted through the analysis of interviews with riverine people, live bait collectors, fishermen and quilombolas. The research was conducted in the cities of Corumbá, Coxim, Sonora and Pedro Gomes, all in the state of Mato Grosso do Sul. The analysis was based on bibliographical references in order to correlate the results obtained by the interviews and the situations witnessed in the field with the actions proposed in the Water Resource Plan of the Paraguay Hydrographic Region. The field research was carried out under the activities of the Wetlands International, Corredor Azul Programme, promoted in Brazil with the support of the non-governmental organization Women in Action in the Pantanal. The activity showed occasional problems of access to drinking water, since there is no basic sanitation service. Changes in economic fishing activities and conflicts over water use were observed. According to interviewees' reports, the construction of dams is the main cause for the decrease in fish stocks evidenced by them. Members of these communities are incipiently participating in water management collegiate bodies. It was concluded that the potential and existing conflicts over the use of water in the Pantanal of Mato Grosso do Sul reach the traditional communities in a different way than in the application of the water resources planning and management instruments. Therefore, there is an indication of which approaches that meets the needs and particularities of these traditional communities are necessary to maintain the livelihoods of the region's traditional peoples and communities.

Keywords: Water Resource Plan, management, traditional people and communities

Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 42, N.º 2, 49-53 dezembro de 2021.

© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh42n2-cti5

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o Decreto Federal nº. 6.040/2000 define que povos e comunidades tradicionais são grupos culturalmente diferenciados e se reconhecem como tais, que ocupam e usam territórios e recursos naturais como condição para sua reprodução cultural, social, religiosa, ancestral e econômica. Os povos e comunidades tradicionais encontradas no Pantanal são compostos por ribeirinhos, isqueiros, pescadores artesanais, quilombolas e indígenas.

O Pantanal é considerado uma das maiores extensões de áreas alagadas do planeta e faz parte da Bacia do Alto Paraguai (BAP). Essa bacia possui área de cerca de 600 mil km², abrangendo parte do território brasileiro (aproximadamente 360 mil km² - 61% da área total), e parte dos territórios do Paraguai (138 mil km² - 23%) e da Bolívia (96 mil km² - 16%). O Pantanal foi declarado Patrimônio Nacional pela Constituição Brasileira de 1988, sítio designado como área de relevante importância internacional pela Convenção de Áreas Úmidas RAMSAR, no ano de 1993, e Reserva da Biosfera pela UNESCO, no ano de 2000 (ANA,2018).

Em sua porção brasileira, o Pantanal está inserido na Região Hidrográfica do Paraguai conforme demonstra a Figura 1, abrangendo parte dos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, e segundo IBGE (2004) possui área total aproximada de 150.355 km². A gestão hídrica nessa área úmida tem uma importância singular, pois a sustentação dos serviços ecossistêmicos do dessa área úmida está intimamente ligada aos recursos hídricos da região. O desenvolvimento da fauna, flora e população dependem do regime hidrológico da planície, caracterizado pela variabilidade espacial e sazonal das inundações (TUCCI, 2005).

Em nível nacional brasileiro, o arcabouço legal da questão hídrica é constituído principalmente pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e pelo Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH), instituídos pela Lei Federal nº 9.433/97. O Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Paraguai é o mais recente instrumento da Política Nacional de Recursos Hídricos, aprovado em 2018 pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). O mesmo surgiu com o objetivo de apresentar um diagnóstico quali-quantitativo da disponibilidade hídrica na Região Hidrográfica do Paraguai, um prognóstico e propor um plano de ações. Esse Plano é de grande importância para a sociedade e principalmente para a população moradora na região. Na Região Hidrográfica do Paraguai, onde está inserido o Pantanal em território brasileiro, as populações

tradicionais apresentam uma grande relação de interdependência com os recursos hídricos (ANA, 2018).

O estado de Mato Grosso do Sul possui grande disponibilidade hídrica, permitindo assim o uso múltiplo da água (irrigação, indústria, abastecimento, navegação, entre outros). Porém, apesar da disponibilidade, há conflitos pelo uso d'água relacionado majoritariamente a questões socioambientais (BROCH, 2003; PERH, 2010).

O presente trabalho buscou identificar as lacunas na gestão hídrica que afetam as comunidades tradicionais que vivem na região do pantanal sul-mato-grossense.

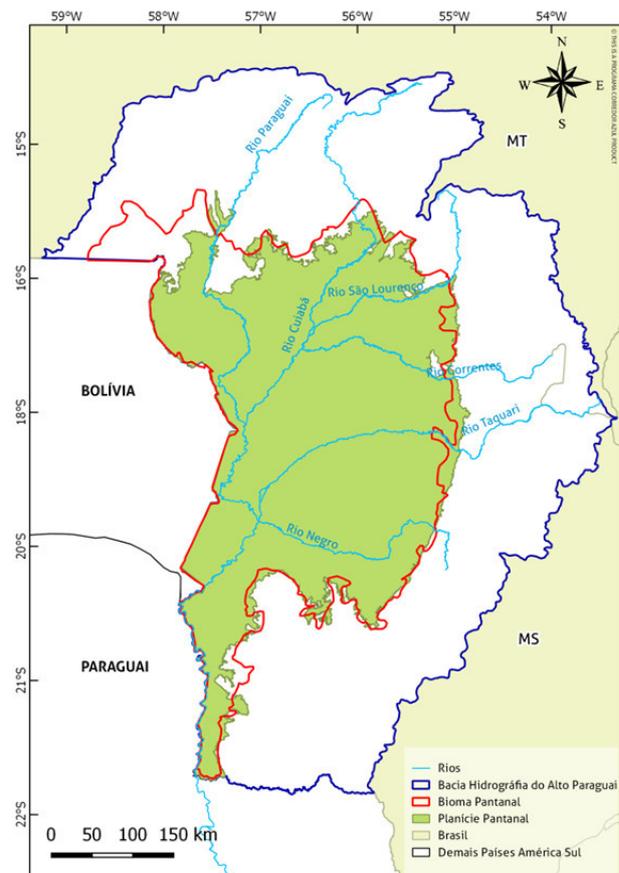


Figura 1. Localização do Pantanal na Região Hidrográfica do Paraguai no Brasil.

2. METODOLOGIA

Para elaboração do estudo foi realizada a análise de entrevistas realizadas com comunidades tradicionais no Pantanal sul matogrossense. As entrevistas foram realizadas no âmbito das atividades do Programa Corredor Azul da Wetlands International, promovido no Brasil com o apoio da organização não governamental Mulheres em Ação no Pantanal (Mupan). O Programa Corredor Azul tem como objetivo preservar a saúde ambiental e a

conectividade do sistema de áreas úmidas Paraná-Paraguai, como patrimônio natural para o sustento e subsistência das comunidades locais, e para o desenvolvimento sustentável da região.

De acordo com Catalao (2012) a água deve ser estudada sob uma ótica transdisciplinar, que relacione seus diversos aspectos de produção, preservação e consumo, levando-se em conta a realidade social e cultural das comunidades. O objetivo das entrevistas realizadas com a prática de storytelling – método que consiste na transmissão de uma história por meio de palavras, sons ou imagens – foi identificar a relação da população de comunidades tradicionais com os recursos hídricos da região, regime hídrico característico de inundações do Pantanal e conflitos socioambientais relativos ao uso da água. As atividades de campo foram realizadas nas cidades de Corumbá, Coxim, Pedro Gomes e Sonora, todas localizadas no estado de Mato Grosso do Sul.

A análise pós-atividade de campo consistiu no levantamento das ferramentas de gestão hídrica vigentes na região e percepções das comunidades com as mesmas. Realizou-se a relação dos conflitos relatados pelas populações com as ações propostas no Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Paraguai. Considerou-se também a presença de palavras-chave no PRH-Paraguai e em documentos afins, de forma a levantar aspectos socioambientais considerados nessa ferramenta de gestão hídrica em âmbito regional.

A pesquisa documental e análise de dados secundários também ocorreram em documentos relacionados aos recursos hídricos locais, como planos de bacia hidrográfica, Plano Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul e atas de comitês de bacias hidrográficas da Região Hidrográfica do Paraguai. Em Mato Grosso do Sul, apenas duas bacias hidrográficas possuem seus planos de bacia elaborados: bacia hidrográfica do rio Miranda e bacia hidrográfica do rio Ivinhema. Das quatro cidades visitadas na atividade de campo apenas a cidade de Corumbá pertence à bacia hidrográfica com plano elaborado, a bacia do rio Miranda.

3. RESULTADOS

Durante nove dias foram realizadas entrevistas com cerca de 30 indivíduos na região de estudo, tais diálogos foram realizados com ribeirinhos, isqueiros, pescadores, garimpeiros artesanais e quilombolas. Na cidade de Coxim, na região norte do estado de Mato Grosso do Sul, as comunidades tradicionais de pescadores têm grande parte de sua renda

familiar atrelada à venda de pescado e relataram a diminuição do número de peixes na região ao longo dos anos. Atribuem esse fenômeno às intervenções de proprietários agropecuários nos arrombados (como é conhecido o processo de quando o rio, por causa do assoreamento, ultrapassa as margens e inunda as áreas contíguas) do rio Coxim e Jauru. A prática que se referem consiste na construção de diques para evitar os arrombados.

Já na região oeste do estado de Mato Grosso do Sul, na cidade de Corumbá, grande parte da renda das comunidades ribeirinhas é proveniente do comércio de iscas vivas e não relataram mudanças nas atividades econômicas devido a possíveis mudanças oriundas de impactos ambientais nos corpos hídricos da região. Porém, foram observados problemas pontuais de acesso à água potável, uma vez que não há serviço de saneamento básico, e de onde captam a água para o consumo humano há a presença de fontes de cargas poluentes produzidas, muitas vezes, pela própria comunidade.

Nas cidades de Sonora e Pedro Gomes, no norte do estado de Mato Grosso do Sul, foram visitadas comunidades quilombolas, com moradores autônomos também ribeirinhos. Entretanto, durante a visita de campo e diálogos não foram relatados conflitos relacionados aos usos dos recursos hídricos locais.

No Pantanal, também há conflitos hídricos referentes à construção de obras hidrelétricas, que afetam as comunidades tradicionais. Em 2018 a Agência Nacional de Águas (ANA) suspendeu até o ano de 2020 as outorgas de direito de uso de recursos hídricos para novos empreendimentos hidrelétricos na Região Hidrográfica do Paraguai, que inclui o Pantanal (ASCOM/ANA, 2018). O embargo das novas outorgas fica condicionado aos resultados dos estudos coordenados pela ANA, que compreende pesquisas multidisciplinares nos campos de hidrologia, hidrosedimentologia, ictiofauna, socioeconomia, dentre outros. Para Calheiros *et al* (2009) a avaliação ao licenciamento dessas obras deve considerar as sinergias espaço-temporais, de modo a garantir o funcionamento hidro-ecológico do Pantanal, uma vez que empreendimentos no planalto da Região Hidrográfica do Paraguai podem alterar o regime de inundações sazonais e interanuais de toda a planície pantaneira.

Tal suspensão da agência reguladora é consequência dos resultados obtidos pela implementação de uma das ações identificadas como necessárias no Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Paraguai (PRH Paraguai), documento base de análise pós-atividade de campo. As metas

prioritárias do PRH Paraguai são definidas em quatro componentes estratégicos, sendo esses: Governança para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos; Implementação e Aperfeiçoamento dos Instrumentos de Gestão dos Recursos Hídricos; Solução de Conflitos pelo Uso dos Recursos Hídricos; e Conservação dos Recursos Hídricos.

O PRH-Paraguai inovou em sua formulação e possui também um Manual Operativo (MOP), que possui formato e conteúdo direcionados a instrumentalizar os primeiros passos da implementação do PRH, com detalhamento das atividades de curto prazo. Porém, apesar da elaboração do PRH contar com diagnóstico e consultas populares, as metas previstas não alcançam de forma direcionada as necessidades e particularidades desses indivíduos culturalmente diferenciados.

O Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Miranda aborda povos e comunidades tradicionais de forma pontual na caracterização da bacia e programas governamentais existentes, além de menção das comunidades ribeirinhas nas recomendações para o setor de Pesca e Aquicultura.

A incipiente participação dos membros dessas comunidades nos colegiados de gerenciamento de recursos hídricos também foi observada na pesquisa. Um exemplo é a vacância da vaga destinada a comunidade indígena no Comitê de bacia hidrográfica do rio Miranda, durante várias gestões do colegiado. A participação dessas comunidades em espaços de tomada de decisão da gestão hídrica pode fortalecer o comitê, com representações legítimas e atuantes para com as suas necessidades. Segundo apresentado por Damasceno *et al* (2017), tão quanto seja maior a participação social na elaboração e monitoramento das políticas públicas, tanto maior será o gerenciamento de riscos que influenciam a saúde humana e as funções do ecossistema numa perspectiva ambiental e social, muito pouco defendidas tanto pelo marco legal, quanto pelas ações governamentais.

Os desafios atuais da gestão hídrica na planície pantaneira, especialmente no que se refere a comunidades tradicionais, são majoritariamente relacionados aos conflitos gerados pelos impactos socioeconômicos e ambientais oriundos da instalação de obras de infraestrutura e de empreendimentos hidrelétricos. Entretanto, outros problemas hídricos também afetam esses grupos.

CONCLUSÃO

As atividades realizadas em campo permitiram observar os conflitos relativos aos recursos hídricos que afetam os povos e comunidades tradicionais na

região do Pantanal sul-mato-grossense. Os mesmos não possuem suas particularidades atendidas nos instrumentos de planejamento de recursos hídricos da região. Dessa forma, para que atenda as ações da gestão hídrica e a perspectiva dessas comunidades, as abordagens necessitam acompanhar as suas particularidades. Como a água possui papel fundamental para a produção e reprodução social dessa população, a manutenção dos modos de vida, no que tange aos recursos hídricos locais, pode também contribuir para a conservação dos cursos d'água e a eficiente gestão hídrica no Pantanal sul-mato-grossense.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Paraguai – PRH Paraguai: Relatório Final / Agência Nacional de Águas. – Brasília: ANA, 2018.

ASCOM/ANA – ANA interrompe temporariamente concessão de outorgas para novas hidrelétricas na Região Hidrográfica do Paraguai. 2018. Disponível em: < <https://www.ana.gov.br/noticias/ana-interrompe-temporariamente-concessao-de-outorgas-para-novas-hidreletricas-na-regiao-hidrografica-do-paraguai>> Acesso em: jun/2019

BRASIL – Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1997/lei-9433-8-janeiro-1997-374778-norma-pl.html>>. Brasília, 8 de janeiro de 1997; Acesso em: mar/19

BRASIL – Decreto nº 6.040, de 07 de fevereiro de 2007. Institui a Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 07 de fevereiro de 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/decreto/d6040.htm> Acesso em: mar/19

BROCH, Synara Aparecida Olendzki.. Mato Grosso do Sul. A fronteira é hídrica no Estado das Águas. Revista Techno, Basil, p. 200-201, 2003.

CALHEIROS, Débora Fernandes [et al.] – Influências de usinas hidrelétricas no funcionamento hidro-ecológico do Pantanal Mato-Grossense – recomendações. Embrapa Pantanal-Documentos (INFOTECA-E), 2009. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/>>

publicacao/812813/influencias-de-usinas-hidretricas-no-funcionamento-hidro-ecologico-do-pantanal-mato-grossense---recomendacoes> Acesso em: jun/2019

CATALAO, V. M. L.; IBANEZ, M. S. R. (Org.). *Água e Transdisciplinaridade : para uma ecologia de saberes*. 1ª. ed. Brasília - DF: Senado Federal, 2012. v. 1. 246p

DAMASCENO, Ângela Patrícia Deiró [et al.] – Comunidades tradicionais nas escalas da política das águas na bacia do rio São Francisco. *Revista da Associação Brasileira de Pesquisadores/as Negros/as (ABPN)*, v. 9, n. 23, p. 31-56, 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Mapa de Biomas e de Vegetação*. 2004. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>

JÚNIOR, José de Sena Pereira – *Recursos Hídricos: conceituação, disponibilidade e usos*. Brasília: Biblioteca Digital Câmara, 2004. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema14/2004_2687.pdf>. Acesso em: abr/19

PERH, Plano Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, do Planejamento, da Ciência e Tecnologia e Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul *Plano estadual de recursos hídricos de Mato Grosso do Sul*. Campo Grande, MS: Editora UEMS, 2010, ISBN: 978-85-99880-24-1.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli – *Recursos hídricos do Pantanal*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2005.

NORMAS PARA SUBMISSÃO DE ARTIGOS

Os autores interessados em publicar artigos científico-técnicos ou discussões de artigos anteriormente publicados na revista Recursos Hídricos deverão respeitar as seguintes normas:

1. O artigo, necessariamente original e preferencialmente redigido em Português, na forma impessoal, tem de ser entregue em suporte informático. O processador de texto a utilizar deverá ser o Word (Microsoft). São também aceites artigos redigidos em Inglês.
2. O título, o nome do(s) autor(es) e o texto do artigo (incluindo quadros e figuras) devem ser compostos e guardados num ficheiro único, devidamente identificado (por exemplo, artigo.doc). Tal ficheiro tem de conter a indicação, de forma clara, das zonas onde se pretendem inserir as figuras, desenhos ou fotografias. O texto do artigo deve ser corrido a uma coluna, com espaçamento normal e com a extensão máxima de quarenta mil caracteres (incluindo espaços).
3. O título do artigo tem de ser redigido em Português e em Inglês.
4. A seguir ao título deve ser indicado o nome do(s) autor(es) e um máximo de três referências aos seus graus académicos ou cargos profissionais, assim como o número de associado, caso seja membro da APRH.
5. O corpo do artigo tem de ser antecedido do resumo, redigido em Português e em Inglês (abstract). O resumo em qualquer um dos anteriores idiomas não deve exceder dois mil e quinhentos caracteres (incluindo espaços).
6. Os elementos gráficos (figuras, desenhos e fotografias) têm também de ser fornecidos separadamente em suporte informático, num único ficheiro ou em ficheiros individuais, mas sempre devidamente identificados (por exemplo, Figuras.doc, Figura1.jpg, etc.). Não existe qualquer restrição quanto à utilização de cor naqueles elementos.
7. As referências bibliográficas no corpo do texto devem ser feitas de acordo com a norma portuguesa NP-405 de 1996, indicando o nome do autor (sem iniciais) seguido do ano de publicação entre parêntesis. No caso de mais de uma referência relativa ao mesmo autor e ao mesmo ano, devem ser usados sufixos a), b), etc.
8. Os artigos devem terminar por uma lista de referências bibliográficas organizada por ordem alfabética do nome (apelido) do primeiro autor, seguido dos nomes dos outros autores, caso os haja, do título da obra, editor, local e ano de publicação (ou referência completa da revista em que foi publicada). De tal lista só podem constar as referências bibliográficas efectivamente citadas no corpo do texto.
9. Só serão aceites discussões de artigos publicados até dois meses após a publicação do número da revista onde esse artigo se insere. As discussões serão enviadas ao autor do artigo, o qual poderá responder sob a forma de réplica. Discussões e réplica, caso exista, serão, tanto quanto possível, publicados conjuntamente.
10. O título das discussões e da réplica por elas originada é o mesmo do artigo original acrescido da indicação Discussão ou Réplica. Seguidamente, deve constar o nome do autor da discussão ou da réplica de acordo com o indicado no ponto 4.
11. À publicação de discussões e de réplicas aplicam-se as normas antes explicitadas para a publicação de artigos
12. Os artigos e as discussões devem ser enviados por correio electrónico para o endereço da APRH (aprh@aprh.pt). O assunto desse correio electrónico deve elucidar sobre o respectivo conteúdo (por exemplo, submissão de artigo ou discussão de artigo). No corpo do correio, o autor ou os autores têm ainda de sugerir três revisores que considerem adequados, face ao teor científico técnico e ao idioma do respectivo artigo.

Secretariado da APRH
A/c LNEC – Av. do Brasil, 101
1700-066 Lisboa
Portugal

