

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Recursos Hídricos Subterrâneos em Aquíferos Cársicos:  
Caso de Estudo do Sistema Aquífero de Cesareda**

Afonso Ribeiro Cordeiro Leal Ferreira

**Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do  
Território**

Dissertação orientada por:  
Maria do Rosário da Encarnação de Carvalho

## Resumo

A água subterrânea constitui um recurso hídrico estratégico, considerando a vulnerabilidade da água superficial. Por isso é necessário compreender o funcionamento e a capacidade de armazenamento dos sistemas aquíferos, para uma gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, e sua proteção quantitativa e qualitativa.

Os sistemas aquíferos cársicos são os mais vulneráveis à contaminação e aqueles que, apesar de serem drenados por nascentes de grande caudal, são mais sensíveis às variações de recarga, devido à grande heterogeneidade das propriedades hidráulicas e, normalmente, elevada permeabilidade.

O trabalho de investigação desenvolvido no âmbito desta dissertação teve como objetivo compreender o funcionamento do sistema aquífero da Cesareda e avaliar os seus recursos hídricos subterrâneos. Foi realizado trabalho de campo para recolha de amostras de água em furos e nascentes, ao qual se seguiu a recolha de informação sobre as características climáticas, geológicas e hidrogeológicas existentes, bem como a consulta de metodologias de avaliação de recarga para avaliação dos recursos disponíveis.

A avaliação de recarga do sistema foi realizada através de três métodos: Método de Índice de Potencial de Infiltração (IPI); Índice de Recarga Efetiva (IRef); Método de Balanço Hídrico Mensal de Thornthwaite (ao nível do solo). Através do IPI obteve-se a infiltração potencial do sistema aquífero entre 34% e 58%, com média de 53%. O IRef avalia a infiltração de sistemas através de um índice que varia entre 9,8 e 1, sendo 9,8 alta infiltração e 1 baixa infiltração a nula. A área apresentou valores de IRef de 9,8 a 6,8 com uma média de 8,25. O método de Balanço Hídrico Mensal de Thornthwaite (ao nível do solo) apresentou apenas *superavit* entre outubro e fevereiro.

A vulnerabilidade do sistema foi calculada pelo método de EPIK, demonstrando que 99% da região se encontra na classe de “muito alta vulnerabilidade” e os restantes 1% dentro da classe “alta vulnerabilidade”. Segundo a Portaria n.º 336/2019, do Diário da República, ambas as classes deveriam ser consideradas Reserva Ecológica Nacional (REN).

**Palavras-chave:** Aquíferos Cársicos, Infiltração, Vulnerabilidade, Recursos hídricos subterrâneos

## Abstract

Groundwater is a strategic water resource, given the vulnerability of the surface water. It is therefore necessary to understand how it functions and the storage capacity of aquifer systems, in order to sustainably manage the groundwater resources and protect them from over-exploitation and contamination.

Karst aquifer systems are the most susceptible to contamination and those which, despite being drained by high-flow springs, are more volatile in terms of water quantity, due to the existence of long families of fractures ranging from small closed fractures to huge galleries.

The aim of the research carried out as part of this dissertation was to understand how the Cesareda aquifer system works and assess its groundwater resources. Fieldwork was carried out to collect water samples from boreholes and springs, followed by gathering information on the existing climatic, geological and hydrogeological characteristics and consulting recharge assessment methodologies to evaluate the available resources.

The system was assessed using three methods: the Infiltration Potential Index (IPI) method; the Effective Recharge Index (IRef); and the soil water balance by Thornthwaite (at the level of the soil). The IPI obtained potential infiltration of the aquifer system between 34% and 58%, with an average of 53%. The IRef assesses the infiltration of systems through an index that varies between 9.8 and 1, with 9.8 being high infiltration and 1 being low to zero infiltration. The area showed IRef values of 9.8 to 6.8, averaging 8.25. The soil water balance by Thornthwaite (at the level of the soil) showed that there was only superavit between October and February.

The vulnerability of the system was calculated using the EPIK method, it assessed that 98.5% of the region is in the "very high vulnerability" class and the remaining 1.5% in the "high vulnerability" class. According to Portaria n.º 336/2019, of the Diário da República, both should be considered Reserva Ecológica Nacional (REN).

**Key-words:** Karst Aquifer, Infiltration, Vulnerability, Groundwater Resources

## Agradecimentos

Durante a execução de todo este trabalho, várias foram as pessoas que me ajudaram a manter o rumo em todo este processo.

À minha orientadora, Professora Maria do Rosário Carvalho, que doou imensos dos seus dias de descanso para me ajudar em trabalhos de campo, correções e dúvidas. Que me acompanhou e ajudou a terminar este trabalho. Agradeço a presença não só durante este mestrado, mas também durante a licenciatura.

Aos geólogos da APA, Dr.<sup>a</sup> Ana Lopes e Dr. Nuno Guerreiro que me disponibilizaram o seu tempo e informação que foi de grande importância para esta tese.

Aos amigos das Cesaredas, especialmente à Senhora Maria Matos, que de bom grado ajudou na procura dos vários locais de colheita, que doou os dados meteorológicos e informações relacionadas com os caudais das nascentes.

A todos os proprietários que permitiram a colheita de água e que ofereceram alguma informação não só geral, mas também antiga sobre a água e a região.

À Dr.<sup>a</sup> Rute Durão que me animou e ajudou durante todo este processo.

A todos os meus familiares que demonstraram incansável apoio durante todo este processo. Especialmente à minha mãe e irmã que em nenhum momento me deixaram desistir, aos meus tios José e Marília que fizeram de tudo para que algumas colheitas fossem possíveis e à minha prima Catarina que me facilitou entrar em contacto com pessoas que me ajudaram imenso.

E por fim, mas não menos importantes, a todos os meus amigos que fizeram parte deste processo e que passaram pelos vários, risos, lágrimas e frustrações. Gostaria de mencionar especialmente o meu melhor amigo Ricardo Oliveira, que é basicamente um irmão e que, sem pensar nele mesmo estive lá para mim sempre que precisei. À Bárbara Silva que incansavelmente estive presente quando mais precisei de alguém e que se demonstrou sempre disponível. Por fim ao meu colega de Orientadora Diogo Faria, que apesar de muito eu reclamar com ele, faz parte das pessoas mais próximas que tenho e que me ajudaram sempre sem pedir nada em retorno.

Por fim, gostaria de dedicar toda a minha tese ao meu falecido avô António Carlos Cordeiro, que um dos grandes sonhos dele foi ver-me na faculdade. Sonho que lhe foi retirado pela doença, que o impedia de me reconhecer. Mas sei que independentemente do resultado ele estaria orgulhoso.

# Índice:

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos.....	3
2. Estado da Arte .....	3
2.1. Metodologias de cálculo de recarga e da vulnerabilidade .....	3
2.2. Metodologias de análise do grau de carsificação .....	5
2.3. Metodologias de avaliação de parâmetros hidráulicos .....	8
2.4. Recarga e infiltração em sistemas aquíferos cársicos.....	9
3. Caracterização da Área de Estudo .....	10
3.1. Enquadramento Geográfico .....	10
3.2. Enquadramento Geológico .....	10
3.3. Enquadramento Hidrogeológico .....	13
4. Metodologia.....	15
4.1. Metodologia geral .....	15
4.2. Amostragem e análise de Água Subterrânea .....	15
4.3. Tratamento de dados de precipitação.....	16
4.4. Métodos de Recarga e Infiltração .....	17
4.4.1. Método de balanço hídrico mensal de Thornthwaite .....	17
4.4.2. Método de Índice de Potencial de Infiltração (IPI) .....	18
4.4.3. Índice de Recarga Efetiva ( $I_{REF}$ ).....	21
4.4.4. Índice de Vulnerabilidade EPIK (F).....	22
5. Resultados e Discussão .....	24
5.1. Variáveis Climáticas.....	24
5.2. Composição físico-química das águas.....	27
5.3. Avaliação de Recursos.....	30
5.3.1. Índice de Potencial de Infiltração (IPI) .....	30
5.3.2. Índice de recarga efetiva (IREF) .....	32
5.3.3. Índice de vulnerabilidade EPIK.....	33
6. Conclusão .....	35
7. Bibliografia.....	37
Anexos.....	0

## Índice de Tabelas:

Tabela 4.1 - Comparação de pesos relativos ISEP (APA & ISEP, 2017) e pesos utilizados. ...	19
Tabela 4.2- Pesos relativos dos parâmetros utilizados no método de IPI (adaptado de APA e ISEP, 2017). .....	19
Tabela 4.3 - Valores utilizados para o Parâmetro "Litologia" (adaptados de CCDR-LVT, 2015). .....	19
Tabela 4.4- Valores utilizados para o Parâmetro "Declive" (CCDR-LVT, 2015).....	20
Tabela 4.5- Valores utilizados para o Parâmetro "Epicarso" (CCDR-LVT, 2015).....	20
Tabela 4.6 - Valores utilizados para o Parâmetro "Ocupação de Solo" (adaptada de Ribeiro,2005).....	20
Tabela 4.7- Valores utilizados para o Parâmetro "Densidade da Rede Hidrográfica" (CCDR-LVT, 2015).....	21
Tabela 4.8- Valores utilizados para o Parâmetro "Recarga Potencial" (CCDR-LVT, 2015)...	21
Tabela 4.9- Valores utilizados para o Parâmetro "Decliva da Superfície Topográfica" (CCDR-LVT, 2015).....	22
Tabela 4.10 - Valores utilizados nas classes do parâmetro "Litologia e estrutura da Zona Vadosa" (CCDR-LVT, 2015).....	22
Tabela 4.11- Avaliação de vulnerabilidade de aquíferos cársicos utilizando o Índice EPIK (adaptada de CCDR-LVT, 2015). .....	23
Tabela 4.12- Valores utilizados para o Parâmetro "Epicarso" (adaptada de CCDR-LVT, 2015). .....	23
Tabela 4.13- Valores utilizados para o Parâmetro "Cobertura de Proteção" (adaptada de CCDR-LVT, 2015).....	23
Tabela 4.14- Valores utilizados para o Parâmetro "Condições de Infiltração" (adaptada de CCDR-LVT, 2015).....	23
Tabela 4.15- Valores utilizados para o Parâmetro "Grau de Desenvolvimento da Rede Cársica" (adaptada de CCDR-LVT, 2015). .....	24
Tabela 5.1 - Resultados dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas medidos no campo .....	28
Tabela 5.2- Tabela resumo das análises químicas.....	28
Tabela 5.3 - Tabela resumo de precipitações e infiltrações da região (Através do IPI). .....	32

## Índice de Figuras:

Figura 1-1 - Modelo conceptual de um aquífero cársico (retirado de Calçada, 2016). .....	2
Figura 2-1 - Conceptualização do processo de recarga em meios cársicos aflorantes (LNEC, 2011).....	4
Figura 2-2 - Forma esquemática de um hidrograma de nascente, adaptado de Kovács et al., (2005, in Calçada, 2016). .....	5
Figura 2-3 - Hidrogramas de nascentes cársicas (Durozoy e Paloc, 1973; Williams, 1977; Smart, 1983; Crispim, 1995, in Calçada, 2016).....	6
Figura 2-4 - Hidrograma de nascente cársica onde se observam diferentes regimes de escoamento (Taylor e Greene, 2008, in Calçada, 2016).....	7
Figura 2-5 - Pluviosidade e variação de concentração de magnésio (Hunkeler e Mudry, 2007, in Calçada, 2016).....	8
Figura 2-6 - Resposta teórica da curva tempo-rebaixamento ao efeito da porosidade dupla de aquíferos cársicos (Kresic, 2007, in Calçada, 2016). .....	9
Figura 3-1 - Enquadramento geográfico da área em estudo, gerado em software ArcGIS Pro.10	
Figura 3-2 - – Enquadramento geológico do sistema aquífero de Cesaredas, sobre folhas da Carta Geológica de Portugal na escala de 1:50000; a amarelo a localização de pontos de amostragem de água subterrânea no âmbito desta dissertação.....	11
Figura 3-3 – Delimitação do sistema aquífero de Cesaredas (Almeida et al., 2000).....	14
Figura 4-1 – Enquadramento das localizações dos furos, poços e nascentes analisados. Gerado em software ArcGIS Pro. ....	16
Figura 4-2 - Diagrama de método de balanço hídrico mensal.....	18
Figura 5-1 - Temperatura média mensal (°C) para Cesareda nos anos hidrológicos de 22/23, 23/24 e de Portugal continental dos anos 1971-2000.....	24
Figura 5-2 - Precipitação total mensal para Cesareda nos anos hidrológicos de 22/23, 23/24 e de Portugal continental dos anos 1971-2000. ....	25
Figura 5-3- Valores de Precipitação, Água no solo, Superavit e Evapotranspiração Real do ano hidrológico de 22/23 em Cesareda utilizando o método de Thornthwaite. ....	26
Figura 5-4- Valores de Precipitação, Água no solo, Superavit e Evapotranspiração Real da média dos anos 1971-2000 em Portugal Continental utilizando o método de Thornthwaite.....	26
Figura 5-5- Valores de Precipitação, Água no solo, Superavit e Evapotranspiração Real do ano hidrológico de 23/24em Cesareda utilizando o método de Thornthwaite. ....	27
Figura 5-6 Representação das águas amostradas num Diagrama de Piper e % de concentração de iões dissolvidos nas amostras. Gerado em software QualiGraf.....	29
Figura 5-7- Modelo representativo do método de obtenção dos mapas de parâmetros.....	30
Figura 5-8- Índice de Potencial de Infiltração do Sistema Aquífero da Cesareda.....	31
Figura 5-9- Índice de Recarga Efetiva do Sistema Aquífero da Cesareda. ....	33
Figura 5-10 - Espessura de Solos na região do planalto das Cesaredas (retirado de Duarte, 2022). .....	34
Figura 5-11 - Vulnerabilidade do Sistema Aquífero da Cesareda. ....	34
Figura A.0-1- Gráfico de precipitação diária (azul) em mm/h e temperatura diária (a vermelho) em °C no ano hidrológico 2022/2023. Estação dos Amigos das Cesaredas em Cesareda. ....	0
Figura A.0-2 - Método de Thornthwaite para a média dos anos 1971-2000. ....	1
Figura A.0-3- Método de Thornthwaite para o ano de 2022. ....	2
Figura A.0-4- Método de Thornthwaite para o ano de 2023. ....	2
Figura A.0-5 - Densidade da Rede Hidrográfica do Sistema Aquífero da Cesareda.....	3

Figura A.0-6 - Parâmetro Densidade da Rede Hidrográfica do Sistema Aquífero da Cesareda para IPI.....	4
Figura A.0-7 - Ocupação de Solo da Região do Sistema Aquífero da Cesareda.....	5
Figura A.0-8 - Parâmetro Ocupação de Solos do Sistema Aquífero da Cesareda para IPI.....	6
Figura A.0-9 - Declives do Sistema Aquífero da Cesareda.....	7
Figura A.0-10 - Parâmetro Declive do Sistema Aquífero da Cesareda para IPI.....	8
Figura A.0-11 - Litologia do Sistema Aquífero da Cesareda.....	9
Figura A.0-12 - Parâmetro Litologia do Sistema Aquífero da Cesareda para IPI.....	10
Figura A.0-13 - Epicarso do Sistema Aquífero da Cesareda.....	11
Figura A.0-14 - Parâmetro Epicarso do Sistema Aquífero da Cesareda para IPI.....	12
Figura A.0-15 - Recarga do sistema para o ano hidrológico 22/23, para o ano de 2023 e entre Outubro de 22 e Dezembro de 2023.....	13
Figura A.0-16 - Parâmetro Declive do Sistema Aquífero da Cesareda para IREF.....	14
Figura A.0-17 - Parâmetro Recarga Potencial do Sistema Aquífero da Cesareda para IREF..	15
Figura A.0-18 - Parâmetro Zona Vadosa do Sistema Aquífero da Cesareda para IREF.....	16
Figura A.0-19 - Parâmetro Epicarso do Sistema Aquífero da Cesareda para EPIK.....	17
Figura A.0-20 - Parâmetro Cobertura de Solo do Sistema Aquífero da Cesareda para EPIK..	18
Figura A.0-21 - Parâmetro Condições de Infiltração do Sistema Aquífero da Cesareda para EPIK.....	19
Figura A.0-22 - Parâmetro Grau de Desenvolvimento da Carsificação do Sistema Aquífero da Cesareda para EPIK.....	20

## **Acrónimos:**

APA – Associação Portuguesa do Ambiente

CCDR-LVT – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo

CZ - Cesareda

DH – *Déficit* Mensal

ETP – Evapotranspiração Potencial

ETR – Evapotranspiração Real

F - Furo

IR<sub>EF</sub> – Índice de Recarga Efetiva

IPI – Índice de Potencial de Infiltração

N - Nascente

OVT – Oeste e Vale do Tejo

REN – Reserva Ecológica Nacional

SH – *Superavit* Mensal

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

# 1. Introdução

Segundo Ford e Williams (1989) os aquíferos cársicos são de extrema importância como fonte de água para o abastecimento de populações e regadios. Cerca de 20 a 25% da água que abastece as populações mundiais advém de aquíferos cársicos. Em Portugal, várias regiões são abastecidas por estes sistemas, em particular a região Centro e as zonas de Alentejo e Algarve (Peixinho de Cristo, 1988; Ramos *et al.*, 1988). Um exemplo da importância destes sistemas é demonstrado pelo facto de Lisboa ter sido, durante muito tempo, abastecida pelo aqueduto das águas livres que obtinha água das nascentes do Vale de Carenque (Paradela e Zbyszewski, 1971 e Mendonça, 2013).

Os maciços calcários apresentam propriedades distintas dos restantes maciços desenvolvidos em rochas compactas (aquíferos fraturados). Isto deve-se ao grande desenvolvimento das redes de descontinuidades que, por dissolução da rocha, se alargam progressivamente. Estas descontinuidades constituem, muitas das vezes, sistemas hierarquizados e organizados de escoamento de águas (Calçada, 2016).

A evolução de maciços calcários requer a presença de uma rede de descontinuidades pré-existente, uma zona de recarga e uma zona de descarga, que está interligada à anisotropia e à heterogeneidade dos maciços. A evolução ocorre devido ao alargamento das descontinuidades aptas à circulação, o que leva à formação de grandes contrastes de permeabilidade dentro do maciço.

Como exemplo, é possível referir-se que apenas a nascente do Alviela no Maciço Calcário Estremenho remove em solução, anualmente, cerca de 24000 toneladas de calcário, o que correspondente à remoção de um volume de quase 10000 m<sup>3</sup> (Almeida, 1992). Um exemplo, mais recente da constante evolução dos maciços calcários é o dos abatimentos que ocorreram no Monte da Queijeira no Sistema Aquífero de Escusa (Dolomitos do Devónico médio). Estes abatimentos intersectam o rio subterrâneo que alimenta a exurgência dos Olhos de Água e outras nascentes da Ribeira de Porto Espada (Crispim *et al.*, 2013).

Conceptualmente, os aquíferos cársicos dividem-se em dois meios com propriedades muito diferentes. O primeiro corresponde à rede de coletores (galerias freáticas e fraturas) onde a permeabilidade é elevada, mas a capacidade de armazenamento é exígua. O segundo meio é formado por blocos com baixa permeabilidade, mas com uma considerável capacidade de campo que é gerada pela existência de um número elevado de fissuras e poros de baixa dimensão (epicarso) (Goldscheider *et al.*, 2007). Estes meios são observáveis no modelo apresentado na Figura 1-1.

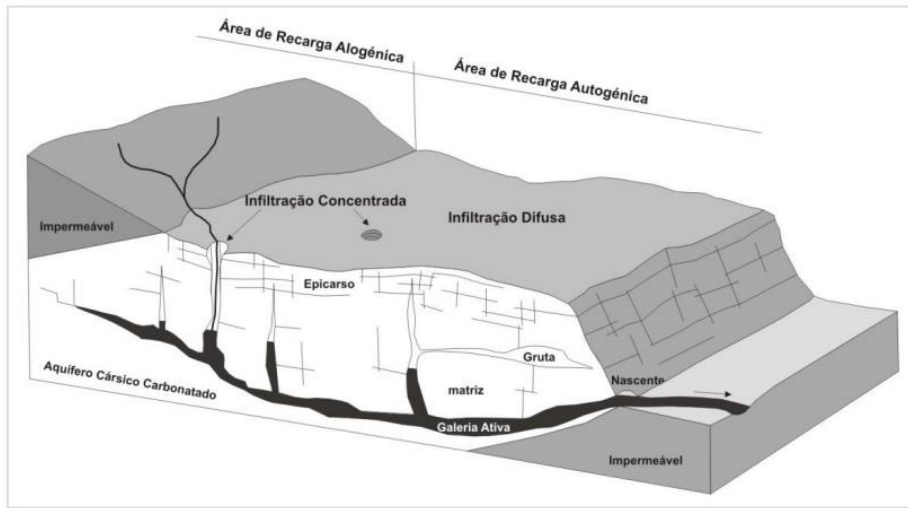


Figura 1-1 - Modelo conceitual de um aquífero cárstico (retirado de Calçada, 2016).

Tendo em conta a elevada importância destes sistemas aquíferos é importante ter em consideração que, dada a presença de carso, estas regiões são geralmente muito vulneráveis, não só em relação à quantidade de água, mas também à qualidade da mesma. Isto traduz-se em problemas na implantação de furos de captação que, mesmo localizados no redor de zonas de elevada permeabilidade e caudal, podem encontrar-se com mínimos caudais ou mesmo completamente secos.

A exploração sustentável dos recursos hídricos subterrâneos de aquíferos cársticos é ditada, principalmente, pela sua taxa de recarga, sendo essencial quantificar com precisão os recursos disponíveis. A natureza complicada destes sistemas, que se caracteriza pela ocorrência de múltiplas nascentes, sumidouros e a hierarquização de estruturas cársticas, cria grandes obstáculos na sua avaliação.

São conhecidas metodologias para estimar o volume de água infiltrada em aquíferos cársticos, metodologias essas que consideram variáveis como a precipitação, o relevo, o tipo de solo, a fraturação, o desenvolvimento cárstico, etc. Todavia, a água nos aquíferos cársticos tem, de modo geral, pouco tempo de permanência. A capacidade de armazenamento e, conseqüentemente, o volume de água armazenado são fortemente condicionados pela presença e grau de carsificação em profundidade, assim como pela conexão e forma das condutas.

A avaliação dos recursos hídricos subterrâneos em aquíferos cársticos, com vista à sua exploração sustentável, não pode ser baseada apenas na estimativa dos volumes de água infiltrados. É, também, necessário suportar esta avaliação com estudos hidrogeológicos de caracterização dos sistemas que permitam estimar a sua capacidade de armazenamento e as suas respostas a alterações na recarga, como por exemplo as resultantes das alterações climáticas.

O Sistema Aquífero de Cesareda foi selecionado como caso de estudo, por se tratar de um sistema cárstico para o qual não existe consenso quanto à taxa de recarga e volumes armazenados. Deste modo, são ainda desconhecidos os recursos hídricos subterrâneos disponíveis e a resposta do sistema a eventos extremos num contexto de alterações climáticas.

## 1.1. Objetivos

Este trabalho tem, como principal objetivo avaliar os recursos hídricos subterrâneos no Sistema Aquífero Cársico de Cesareda durante um ano hidrológico e compreender a resposta do sistema a alterações climáticas, nomeadamente a situações de tempestade e de longos períodos de seca. Assim como avaliar a infiltração, recarga e vulnerabilidade do sistema de modo a contribuir para o modelo conceptual do sistema aquífero de Cesareda.

## 2. Estado da Arte

### 2.1. Metodologias de cálculo de recarga e da vulnerabilidade

O estudo da recarga de aquíferos tem sido longamente desenvolvido ao longo dos tempos (Thorntwaite, 1984; Silva, 1984; Kirkham *et al.*, 1984; Abrunhosa, 1988; Oliveira *et al.*, 2004; Oliveira, 2006), com o objetivo de se avaliarem os recursos hídricos subterrâneos disponíveis. Várias metodologias, utilizando inúmeras técnicas e instrumentos, foram desenvolvidas, umas estimando os recursos hídricos superficiais disponíveis, outras a taxa de infiltração e algumas chegando ao cálculo da recarga e dos volumes de água armazenados nos aquíferos.

Os métodos de cálculo de recarga podem ser divididos em métodos diretos e indiretos (Vilaverde, 2016). No entanto se aumentarmos a quantidade de características a avaliar e avaliarmos as hidrometeorológicas de um sistema. Este já se pode subdividir em mais métodos (APA e ISEP, 2017): Métodos diretos; Balanço hídrico sequencial; Modelos físicos; Modelos determinísticos; Traçadores; Métodos indiretos; Índices Metros-Caudal (IMC); Potenciais de Infiltração.

Os métodos diretos mais utilizados são: 1) Lisímetros (Kirkham *et al.*, 1984), que consistem em tanques ou blocos de solo alterado/inalterado que têm como objetivo o cálculo da evapotranspiração através de balanças ou drenagem; 2) Infiltrómetros, que consistem em bacias ou pequenas áreas onde é avaliada a capacidade de infiltração modo qualitativo; 3) Hidrogramas de escoamento superficial (Oliveira, 1997), que consiste na avaliação da recarga com base na análise e decomposição de hidrogramas de escoamento superficial, assumindo que o escoamento de base na bacia resulta da componente infiltrada da água de precipitação, que emerge à superfície ainda dentro da bacia hidrográfica.

Os métodos de balanço hídrico sequencial consistem em formulações empíricas para a determinação do volume de água disponível para recarga, a partir de entradas e saídas de um sistema (APA e ISEP, 2017). Os mais utilizados são o método de balanço hídrico mensal a nível do solo (Thorntwaite, 1984; Silva, 1984; Abrunhosa, 1988; Oliveira, 2004) e o balanço hídrico diário a nível do solo utilizando modelos numéricos e analíticos, sendo um destes o BALSEQ-MOD (Oliveira, 2006).

Este modelo assume que a única entrada de água no sistema é através da água de precipitação, que em nenhuma ocasião o nível freático se encontra acima da topografia, o que indica que não há qualquer descarga para a superfície nem ocorre evapotranspiração a partir da zona saturada. O escoamento do solo é feito na vertical, não havendo saídas laterais do volume de controlo, nem

armazenamento ou evaporação de água superficial e a não existência de quaisquer extrações de água superficial (Oliveira, 2006) e estima a evapotranspiração real através da Equação 2.1.

$$ETR = (K_a * K_{cb} + K_e) * ET_0 \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde  $K_a$  é o coeficiente de *stress* hídrico,  $K_{cb}$  é o coeficiente cultural basal,  $K_e$  é o coeficiente de evaporação de água do solo e  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência para determinadas condições climáticas. O modelo tem sido aplicado a aquíferos cársicos (LNEC, 2011), como é apresentado na Figura 2-1.

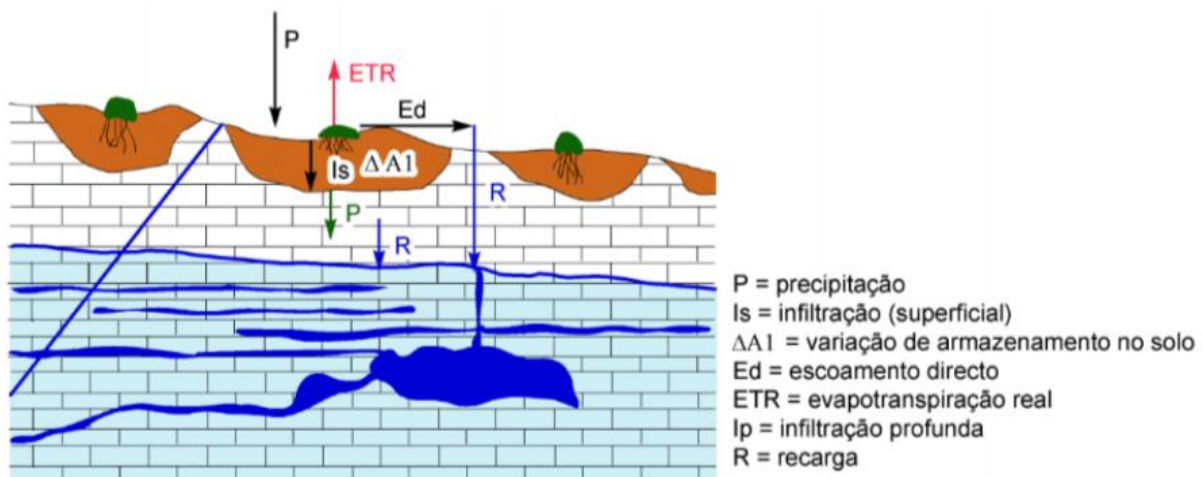


Figura 2-1 - Conceptualização do processo de recarga em meios cársicos aflorantes (LNEC, 2011).

Os métodos de traçados químicos e isotópicos consistem na utilização de substâncias detetáveis na água, visualmente ou analiticamente, com o objetivo de definir caminhos preferenciais de fluxo. Os mais utilizados são o Método dos Cloretos e utilização de isótopos estáveis  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ .

Os métodos indiretos consistem na observação da resposta de um aquífero a mudanças da sua taxa de recarga, tentando compreender se este aumenta ou diminui o seu gradiente hidráulico através de mudanças nos níveis piezométricos ou através da utilização da Lei de Darcy.

O método de índice metros-caudal (IMC) considera que a recarga dos aquíferos é condicionada por dois grandes fatores: 1) A água disponível associada a fatores hidrometeorológicos; 2) A capacidade de ingestão, que depende das características do reservatório geológico (tipo de permeabilidade, a sua magnitude e outros parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos). Através desses cálculos o IMC permite avaliar custos da água, os riscos geológicos de insucesso e a transmissividade mediana (APA e ISEP, 2017).

O índice de potencial de infiltração trata-se de um método desenvolvido por Teixeira *et al.* (2010), para determinar zonas de maior potencial de circulação de águas subterrâneas, fazendo uso da hidrogeomorfologia como ferramenta. De forma a determinar estas áreas, são estimados fatores condicionantes, sendo alguns destes, declive do terreno, ocupação do solo, geologia local, densidade da rede hidrográfica e epicarso (APA e ISEP, 2017).

## 2.2. Metodologias de análise do grau de carsificação

Os sistemas cársicos são naturalmente heterogêneos e anisotrópicos, o que dificulta o seu estudo e a compreensão das suas propriedades hidráulicas. Entender como interagem os diferentes subsistemas é indispensável para compreender o seu funcionamento para uma gestão e exploração sustentadas, bem como para a sua proteção.

Existem três metodologias importantes para analisar o grau de carsificação: Caracterização da rede hidrográfica, análise de hidrogramas de nascentes e análise de quimiogramas de nascente. A caracterização de redes hidrográficas consiste na análise das densidades das redes. Uma rede hidrográfica muito densa ocorre quando a água não se consegue infiltrar em quantidade devido à impermeabilização das camadas superficiais, o que leva a escorrência superficial. Isto não ocorre em situações de elevada carsificação, pois esta permite que a precipitação tenha facilidade em infiltrar-se devido à elevada permeabilidade das camadas superficiais o que gera redes hidrográficas de baixa densidade.

Os processos que ocorrem num aquífero cársico são observáveis no caudal da sua nascente, através de variações deste no tempo. Isto é mensurável nos gráficos que comparam os caudais das nascentes com o tempo, também conhecidos como hidrogramas de nascentes (Figura 2-2).

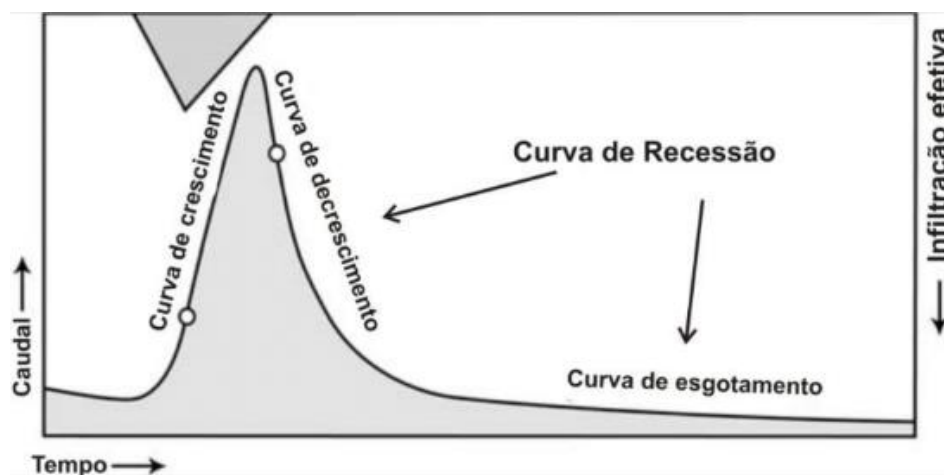


Figura 2-2 - Forma esquemática de um hidrograma de nascente, adaptado de Kovács et al., (2005, in Calçada, 2016).

Este gráfico demonstra como, teoricamente, um evento de precipitação afeta o caudal de uma nascente. O caudal da nascente aumenta aos poucos sendo que o pico máximo de caudal ocorre quando a precipitação termina. O caudal volta a diminuir até estabilizar, voltando ao caudal normal da nascente. A teoria por detrás destes hidrogramas é simples, no entanto os hidrogramas de nascentes não são simples de ler como é possível observar na Figura 2-3.

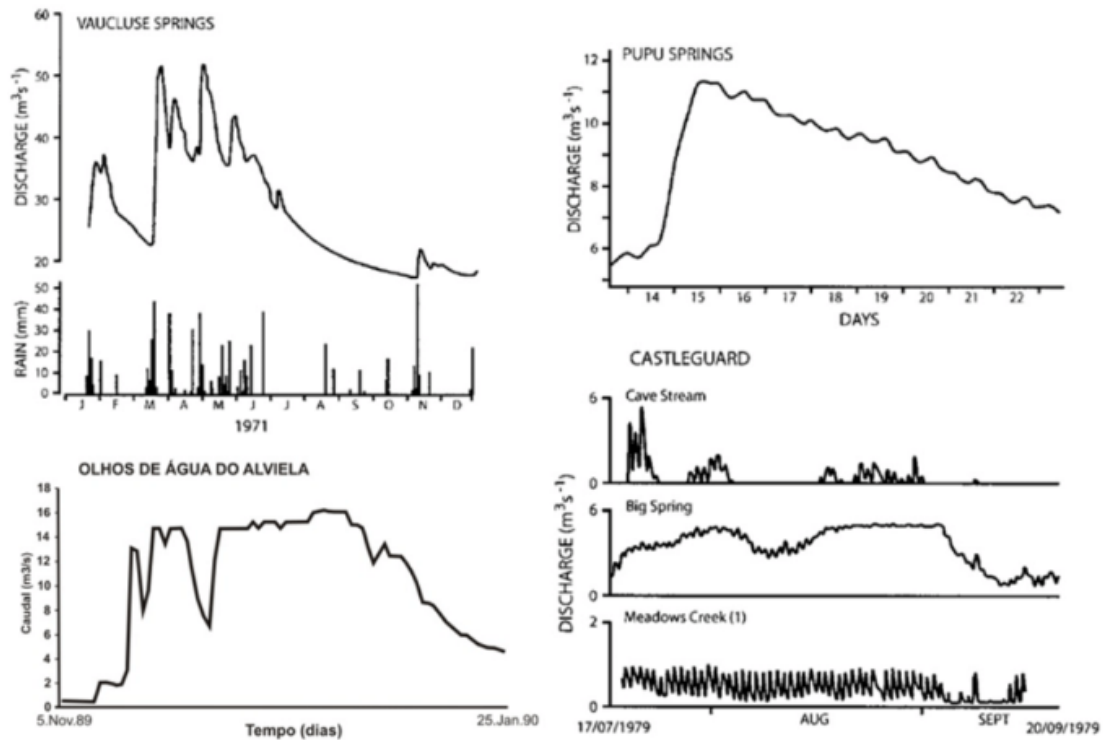


Figura 2-3 - Hidrogramas de nascentes cársticas (Durozoy e Paloc, 1973; Williams, 1977; Smart, 1983; Crispim, 1995, in Calçada, 2016).

Os hidrogramas de nascentes cárstica traduzem os diferentes regimes de circulação da água no seu interior, em função da velocidade de descarga e volumes drenados. Dependendo do grau de carsificação, podem ser identificados três regimes de escoamento (Milanović, 1976): circulação em grandes galerias, que se esvaziam muito rapidamente e que se traduzem por elevado caudal drenado; circulação em fissuras desenvolvidas por carsificação e com boas conexões que se esvaziam mais lentamente do que as galerias e que drenam caudais medianos; escoamento definido pela porosidade da matriz rochosa e fissuras pouco conectadas, onde o escoamento é lento e o caudal drenado pequeno. Todos estes regimes são perceptíveis nas curvas de regressão como é possível observar na Figura 2-4 (Taylor e Greene, 2008). O gradiente do caudal da nascente em função do tempo permite estimar o “coeficiente de regressão” da nascente. Quanto maior o gradiente, maior a descarga, que está associada à permeabilidade do maciço e desenvolvimento de carsificação.

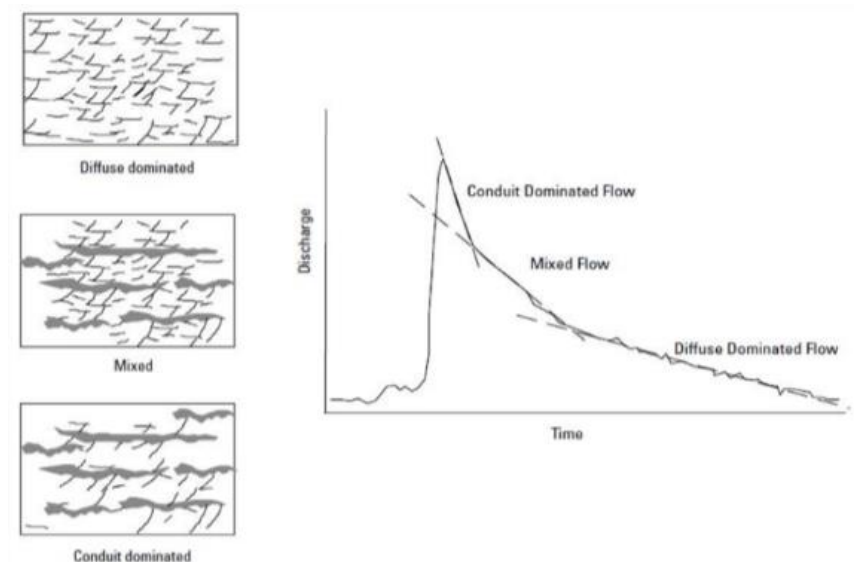


Figura 2-4 - Hidrograma de nascente cárstica onde se observam diferentes regimes de escoamento (Taylor e Greene, 2008, in Calçada, 2016).

Os hidrogramas apresentam a variação de caudal ao longo do tempo, no entanto estas variações de caudais são muitas vezes acompanhadas de variações de concentrações químicas e na qualidade da água. Medir, analisar e avaliar estas alterações ao longo do tempo dá uma ideia da velocidade da recarga, ou seja, o tempo que a água de precipitação leva a chegar ao aquífero e o tempo que está em contacto com a rocha, facilitando a sua dissolução. Em locais muito fraturados é esperado que o tempo seja curto a muito curto e que, rapidamente após um evento de precipitação, seja visível nestes quimiogramas. Pelo contrário, em zonas pouco carsificadas, a água mantém-se em contacto com a rocha mais tempo e isso reflete-se na composição química da água. Por outro lado, há que ter em consideração a possível mistura de águas de diferentes episódios de recarga. É possível observar na Figura 2-5 isso mesmo, os picos de precipitação e como estes afetam a concentração de magnésio na água. No primeiro pico de precipitação, ocorrido entre fevereiro e março, é possível observar que rapidamente a concentração de magnésio diminui devido à diluição por entrada rápida de água de precipitação. No entanto nem sempre isso ocorre, como é possível observar no segundo pico de precipitação, entre julho e agosto. Isto é devido à intensidade da precipitação, quando esta é pouco intensa facilmente se infiltra, mas caso esta seja muito intensa o solo rapidamente se atinge a saturação diminuindo a infiltração da mesma e formando escoamento superficial.

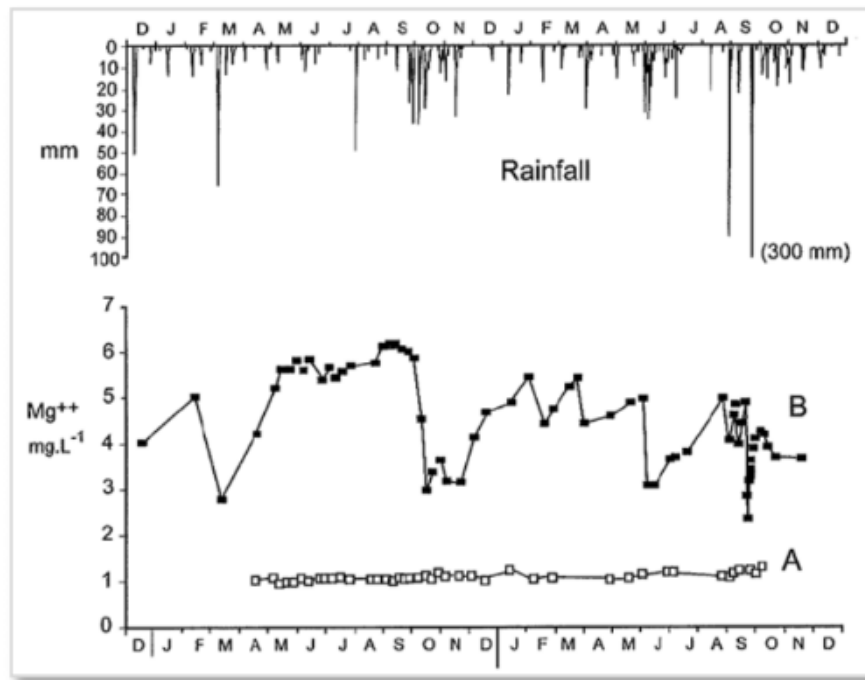


Figura 2-5 - Pluviosidade e variação de concentração de magnésio (Hunkeler e Mudry, 2007, in Calçada, 2016).

### 2.3. Metodologias de avaliação de parâmetros hidráulicos

A metodologia mais utilizada para obtenção de parâmetros hidráulicos de aquíferos são os ensaios de bombeamento. Estes ensaios consistem na extração de água com o auxílio de equipamento de extração e na observação da variação do nível de água na captação, ou em captações/piezômetros próximos, sendo então estes ensaios interpretados.

Em meios cárscicos estes ensaios apresentam, segundo Kresic (2007), valores que quando comparados com os métodos de Theis (1935) e Cooper e Jacob (1946) são diferentes dos comportamentos ideais de um sistema aquífero confinado, dificultando então a estimativa da transmissividade e do coeficiente de armazenamento. Esta diferença de valores deve-se à natural porosidade dupla dos aquíferos cárscicos, onde os primeiros valores observados no ensaio são os valores do rebaixamento que ocorre após o escoamento da porosidade secundária (fraturas, condutas e galerias), existindo um tempo de transição antes do rebaixamento provocado pela porosidade primária (matriz) ser visível (Figura 2-6).

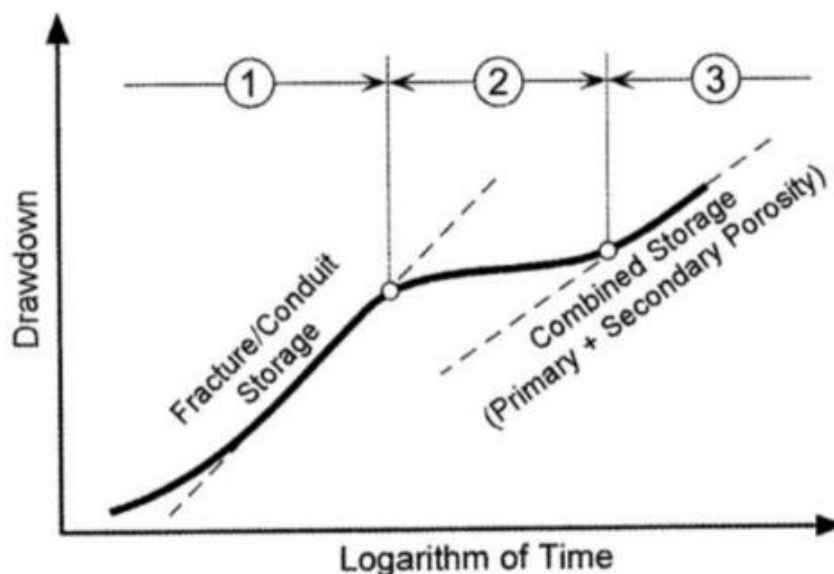


Figura 2-6 - Resposta teórica da curva tempo-rebaixamento ao efeito da porosidade dupla de aquíferos cársticos (Kresic, 2007, in Calçada, 2016).

## 2.4. Recarga e infiltração em sistemas aquíferos cársticos

De modo a compreender melhor o sistema aquífero da Cesareda é necessário observar valores obtidos para outros sistemas aquíferos de modo a compreender melhor os valores que serão obtidos ao longo desta tese para isso foi feito um estudo bibliográfico para outros sistemas de Portugal e do mundo.

O sistema aquífero de Estremoz-Cano, que se situa nos distritos de Évora e Portalegre é um sistema aquífero com uma área de 202 km<sup>2</sup>. Tem transmissividade de 2847 m<sup>2</sup>/dia que é 5,48 vezes maior que a transmissividade do sistema aquífero de Cesareda; a produtividade é de 7 L/s, metade do valor de produtividade de Cesareda; recarga de 191,09 mm/ano (Midões e Costa, 2010).

O sistema aquífero de Moura-Ficalho, localizado no distrito de Beja é um sistema aquífero com 177 km<sup>2</sup> de área onde apenas 77 km<sup>2</sup> são de formações carbonatadas. Este sistema aquífero apresenta permeabilidade com valores elevados à superfície e que vai sendo reduzida com a profundidade. Este sistema possui recarga de 152,54 mm/ano (Costa, 1991).

Almeida (1985) calculou a percentagem de infiltração para vários aquíferos cársticos do Algarve e obteve valores entre 62% para S. Barnabé e Paderne, e 68% para Santa Margarida, o que aponta para taxas de infiltração muito elevadas. No entanto, Almeida (1985), teve em consideração a semi-impermeabilização dos terrenos por “terra rossa” e o carácter torrencial de grande parte da região do Algarve, estimando assim uma infiltração média de 40%.

A grande variação de capacidades de infiltração em regiões cársticas é suportada pelos valores variados, que alguns sistemas cársticos mediterrâneos demonstram:

- Sul de Espanha – 46% - Bosch (1975), in Almeida (1985);
- Sul de França (Saugras) – 50 +/-5% - Chemin *et al.* (1974), in Almeida (1985);
- Dyr del Kef (Tunísia) – 70,5% - Schoeller (1948), in Almeida (1985);
- Chennata (Tunísia) – 42% - Tixeront & Berkloff (1948), in Almeida (1985);
- Bent Saïdame (Tunísia) – 23% - Tixeront & Berkloff (1948), in Almeida (1985);
- Zaghouan (Tunísia) – 36% - Tixeront & Berkloff (1948), in Almeida (1985);

- Arbailles, Baixos Pirinéus – 43% a 70% - Napias (1963), *in* Drogue (1971), *in* Almeida (1985);
- Anticlinal de Saintonge – 21,5% - Lafosse (1964), *in* Drogue (1971), *in* Almeida (1985);
- Parnasso (Grécia) – 45,2% - Burdon (1965), *in* Almeida (1985);
- SE de Espanha – 60% a 70% - Navarro e Samper, *in* Drogue (1971), *in* Almeida (1985);
- Jugoslávia – 35% a 70% - Vilimonovic (1965), *in* Almeida (1985);
- Causses – 50% a 53% - Drogue (1971), *in* Almeida (1985);

### 3. Caracterização da Área de Estudo

#### 3.1. Enquadramento Geográfico

A área em estudo (Figura 3-1) localiza-se nos distritos de Leiria e Lisboa, pertencendo aos concelhos de Bombarral, Lourinhã, Óbidos e Peniche e às freguesias de Reguengo Grande, União das Freguesias São Bartolomeu dos Galegos e Moledo, Atouguia da Baleia, Serra d' El-Rei, Olho Marinho e Pó.

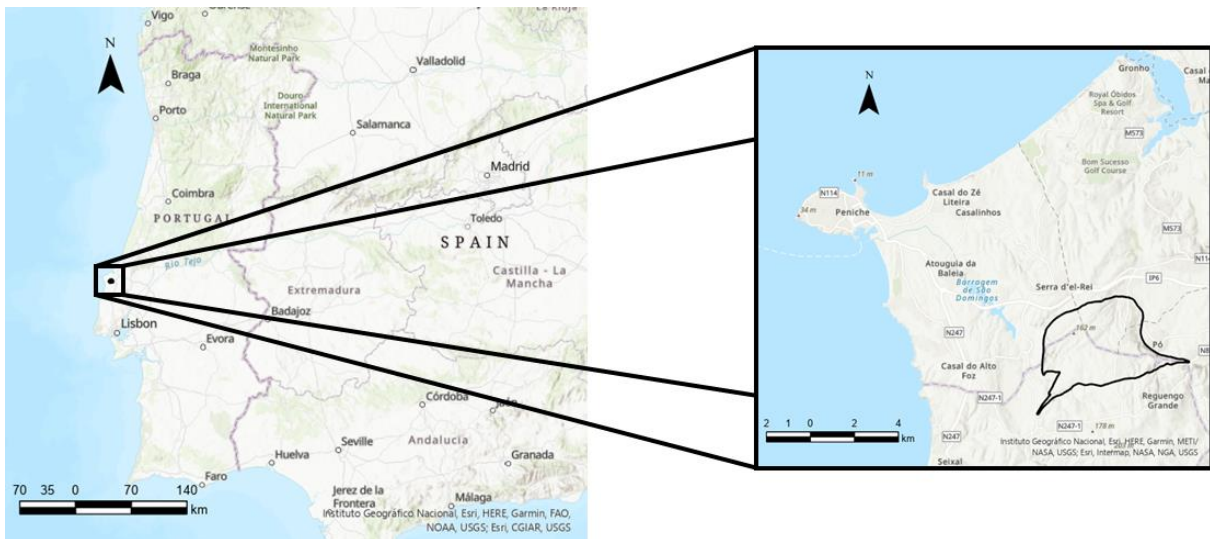


Figura 3-1 - Enquadramento geográfico da área em estudo, gerado em software ArcGIS Pro.

#### 3.2. Enquadramento Geológico

A área em estudo encontra-se dividida em quatro folhas da Carta Geológica de Portugal na escala de 1:50000, como se apresenta na Figura 3-2. Sendo estas: 26-C Peniche (Oertel *et al.*, 1960) (canto superior esquerdo), 26-D Caldas da Rainha (Zbyszewski e Matos, 1959) (canto superior direito), 30-A Lourinhã (Manuppella e Rey, 1996) (canto inferior esquerdo) e 30-B Bombarral (Zbyszewski *et al.* 1965) (canto inferior direito).

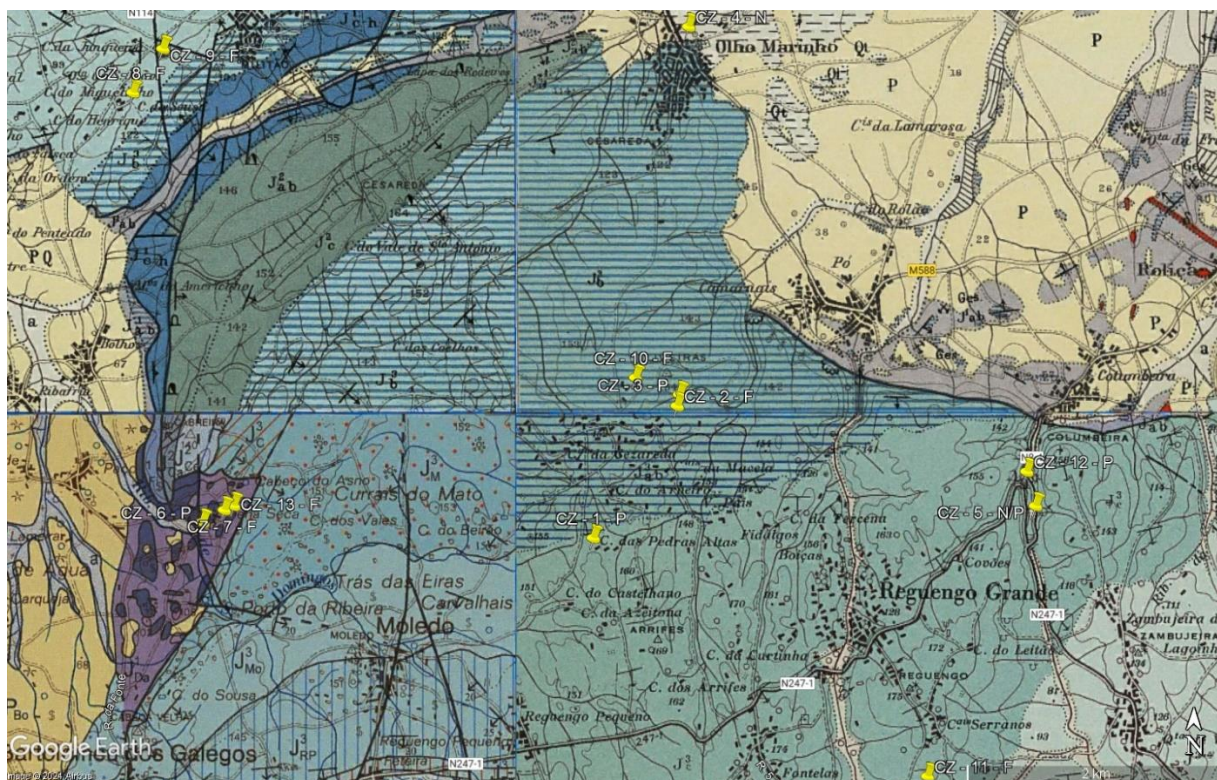


Figura 3-2 – Enquadramento geológico do sistema aquífero de Cesaredas, sobre folhas da Carta Geológica de Portugal na escala de 1:50000; a amarelo a localização de pontos de amostragem de água subterrânea no âmbito desta dissertação.

As formações geológicas aflorante na zona de estudo possuem idades que variam entre o Jurássico Inferior e o Quaternário e que a seguir se descrevem:

### Jurássico Inferior

#### Hetangiano

Na área em estudo o Hetangiano é descrito na notícia explicativa da folha 30-A Lourinhã da Carta geológica de Portugal, à escala de 1:50000 (Manuppella *et. al*, 1996) como composto pelas formações:

**J<sup>1</sup><sub>Da</sub> - Margas de Dagorda (Complexo pelítico-carbonatado-evaporítico)** - formação essencialmente constituída por argilas gipsíferas e salíferas, profundamente brechificadas, de cores violáceas, “borra de vinho” e esverdeadas;

**J<sup>1</sup><sub>Pl</sub> – Dolomitos em Plaquetas** – formação constituída por níveis dolomíticos de espessura centimétrica a decimétrica, com lamelibrânquios e gasterópodes eurihalinos, a sua espessura está entre 7 m e 25 m.

### Jurássico Médio

#### Bajociano e Batoniano

Na área em estudo as formações de idade bajociana e batoniana são descritas em três das quatro folhas; apenas a folha 30-B Bombarral não descreve estas formações dentro da área em estudo:

**J<sup>2</sup><sub>AB</sub> (J<sup>2</sup><sub>Ca</sub>) - Bajociano e Batoniano (Calcários de Cabreira)** – Aflora no limite do mapa, a oeste de Olho Marinho e é uma das formações mais importantes que ocupa uma grande parte do planalto de Cesareda.

Segundo (França *et. al*, 1960 e Zbyszewski e Moitinho, 1959) esta formação encontra-se representada (1) pelo Bajociano Inferior a Médio, composto por calcários compactos ou semicristalinos, cinzentos-amarelos com fósseis, com espessura de 10 a 20 m; (2) pelo Bajociano Superior que apresenta espessura na ordem de 330 m e se encontra representado por calcários sublitográficos esbranquiçados com fraturas conchoidais e lentilhas de calcário pseudo-oolítico, calcários siliciosos com radiolas de equinídeos e calcários margosos cinzentos sem fósseis; (3) o Batoniano está representado por 100 m de calcários cinzentos, por vezes semicristalinos e calcários oolíticos, calcários micríticos azulados e calcário compactos cinzentos-escuros.

Segundo a notícia explicativa da folha 30-A Lourinhã (Manuppella *et. al*, 1999) classifica e descreve a formação “Calcários de Cabreira” como representante do Bajociano e no Natoniano na área da carta. O Bajociano (equivalente ao Bajociano Inferior a Médio e Superior), apresenta espessura na ordem dos 650 m e encontra-se representado por calcários micríticos beges e acastanhados, calcários calciclásticos e pelóidicosossilíferos e calcários micríticos com amonoides.

### ***Caloviano***

Como na formação anterior, na área em estudo as formações de idade caloviana são descritas em três das quatro folhas da Carta Geológica de Portugal, apenas a folha 30-B Bombarral não descreve estas formações dentro da área em estudo.

**J<sup>2</sup><sub>C</sub> (J<sup>2</sup><sub>Ca</sub>) - Caloviano (Calcários de Cesareda)** - aflora no Planalto das Cesaredas a sul do anticlinal tifónico de Serra de El-Rei, a oeste de Olho Marinho (França *et. al*, 1960 e Zbyszewski e Moitinho, 1959). Esta formação encontra-se representada por: (1) calcários compactos com nódulos siliciosos, em parte oolíticos, do Caloviano superior, com espessuras na ordem dos 75 m; (2) calcários margosos, mais ou menos compactos do Caloviano médio com espessuras na ordem dos 110 m; (3) calcários margosos com fósseis, passando a compactos na base do Caloviano inferior com espessuras na ordem dos 40 m.

Manuppella *et. al* (1999) propõem a designação de “Calcários de Cesareda” para as formações do Caloviano Inferior a Médio (com espessura da ordem de 150 m) representados por alternâncias de argilas carbonatadas e de calcários bioclásticos com elementos de quartzo e feldspato com matriz microsparítica.

### **Jurássico Superior**

#### ***Oxfordiano Inferior a Médio/Lusitaniano Inferior a Médio:***

**J<sup>3</sup><sub>b</sub> - Camadas de Montejunto** - a formação “Camadas de Montejunto” aflora no flanco Norte e Sul do anticlinal tifónico de Serra de El-Rei (França *et. al*, 1960; Zbyszewski e Moitinho, 1959), com espessuras na ordem dos 600 m (Manuppella *et. al*, 1999). No flanco Norte encontra-se representada por calcários oolíticos esbranquiçados, brechas compactas formadas por calhaus de calcários margosos esbranquiçados, cinzentos e amarelos e por calcários cinzentos-claros com bancos oolíticos; no flanco Sul esta formação é representada, das camadas mais recentes para as mais antigas, por calcários compactos, calcários margosos, calcário compacto com nerineas siliciosas, margas cinzentas, calcários margosos cinzentos, margas com *Cyprina minor*, bancadas calcárias com pequenos gastrópodes, alternâncias de calcários margosos cinzentos, margas e de calcários cinzentos escuros com zona

brechóides, margas esbranquiçadas e margas vermelhas com calhaus escuros, calcários oolíticos cinzentos ou esbranquiçados com numerosas nerineas e calcários acinzentados com ostras e ouriços.

**J<sup>3c</sup> - Camadas de Cabaços** - esta formação encontra-se representada por alternâncias de arenitos argilosos mal rolados e calcários intraclásticos oolíticos, conglomerado com matriz calcária e nódulos de argila e micas com espessuras na ordem de 165 m (Manuppella *et. al.*, 1999).

**J<sup>3ab</sup> - Camadas de Cabaços e Montejunto – Oxfordiano** - encontra-se representada por calcários finos amarelos a cinzentos, calcários margosos, calcários oolíticos, calcários gravelosos, calcários brechóides, calcários recifais, conglomerados e margas cinzentas com espessura total na ordem dos 1200 m (Zbyszewski *et al.*, 1965).

### **Lusitaniano Superior**

Na área em estudo as formações de idade “lusitaniana superior” são descritas apenas nas folhas 26-C Peniche e 30-B Bombarral.

**J<sup>3c</sup> - Camadas de Abadia** – formação composta por Grés micáceos amarelos-esverdeados, Margo-calcários com grandes oólitos, argilas, margas e grés com raros leitões calcários, com espessuras na ordem dos 10 m. (França *et al.*, 1960; Zbyszewski *et. al.*, 1965).

### **Quaternário**

Na área em estudo as formações de idade “Quaternária” são descritas apenas na Folha 26-D Caldas da Rainha, na região do Olho Marinho.

**Q<sub>t</sub> - Tufos pós-wurmianos de Olho Marinho, de Rio Maior, etc.** - extensos afloramentos de tufos calcários que contêm moluscos terrestres e de água doce, fragmentos de carvão e cerâmicas eneolíticas, em grande parte cobertos por areias de transporte torrencial, por vezes com calhaus rolados (Zbyszewski e Moitinho, 1959).

## **3.3. Enquadramento Hidrogeológico**

Como descrito no capítulo anterior, o sistema aquífero de Cesareda desenvolve-se nas formações carbonatadas “Camadas de Cabaços e Montejunto (Jurássico Superior) e Calcários do Jurássico Médio (Almeida *et al.*, 2000; Figura 3-3).

Este sistema aquífero tem como a sua principal área de recarga o planalto de Cesareda, que consiste numa superfície aplanada bem conservada, onde existe um número significativo de cavidades subterrâneas e depressões cársicas. Este sistema tem também como principal área de descarga a região de Olho Marinho, no entanto, não existe qualquer informação sobre o caudal desta nascente (Almeida *et al.*, 2000).

Segundo Seifert (1963), *in* Manuppella *et al.* (1999) as formações do Jurássico formam um sistema aquífero cársico com recarga no planalto, que apresenta numerosas cavidades, e cuja circulação deverá alimentar as exurgências e captações dos aquíferos adjacentes, como os tufos calcários

quaternários de Olho Marinho, os depósitos detríticos de Bolhos, mas também as nascentes termais do Vimeiro, após um percurso mais longo e profundo.

A presença do vale tifónimo de Caldas da Rainha (Zbyszewski e Moitinho, 1959; Manuppella *et. al*, 1991), com as suas elevadas espessuras de sal gema é um dos responsáveis pelo diapirismo da região e tendo em conta a sua proximidade à região em estudo poderá afetar o quimismo da água da região.

São conhecidas algumas captações nesta região, para abastecimento ou captações artesianas, que apesar de estarem localizadas fora do sistema, apontam para circulação em rochas carbonatadas, que são muito compatíveis com as condições químicas da água deste sistema (Almeida *et al.*, 2000).

Segundo Almeida *et al.* (2000) são retirados 0,7 hm<sup>3</sup>/ano deste sistema, para consumo, e menos de 1 hm<sup>3</sup>/ano para agricultura. Estes autores estimaram um valor de recarga de aproximadamente 5 hm<sup>3</sup>/ano para o sistema, tendo em conta uma pluviosidade de 700 mm e uma área de recarga de cerca de 17 km<sup>2</sup>. Por fim calcularam um valor de produtividade máxima de 25 L/s, um coeficiente de armazenamento de 2x10<sup>-5</sup> e uma transmissividade máxima de 520 m<sup>2</sup>/dia para todo o sistema.

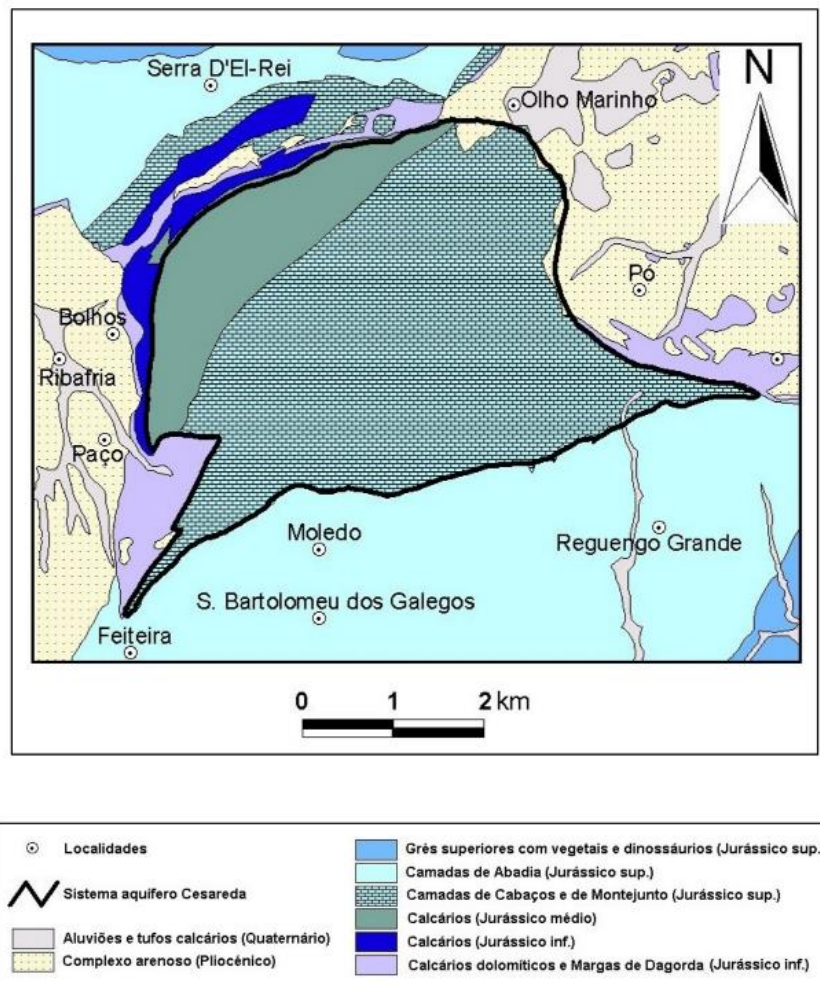


Figura 3-3 – Delimitação do sistema aquífero de Cesaredas (Almeida *et al.*, 2000).

Os Planos de Gestão de Região Hidrográfica (PGRH) – 2º Ciclo (2016-2021) (APA, 2014) indicaram um bom estado quantitativo para o sistema utilizando duas estações de quantidade e

consideraram uma extração de 1,19 hm<sup>2</sup>/ano. Segundo os PGRH – 3º Ciclo (2022-2026) (APA, 2022), este aquífero é confinado com uma fácies Bicarbonatada calco-magnesiana, uma porosidade inferior a 15% e uma precipitação média anual de 677 mm/ano.

## **4. Metodologia**

### **4.1. Metodologia geral**

Tendo como principal objetivo avaliar os recursos hídricos subterrâneos no Sistema Aquífero cársico da Cesareda e a resposta do sistema a alterações climáticas, nomeadamente a situações de tempestade e de longos períodos de seca, é então necessário criar um plano de tarefas e uma metodologia de trabalho que permitam alcançar esse objetivo.

A recolha informação bibliográfica é a base de um bom trabalho científico, então a pesquisa de informação sobre metodologias de cálculo da recarga em aquíferos cársicos e comparação dos valores obtidos em cada uma dessas metodologias é crucial, assim como a caracterização do sistema aquífero de Cesareda.

A inventariação de pontos de água e seleção de locais para monitorização de caudais, níveis de água e composição química, assim como um trabalho de campo para reconhecimento da área do sistema aquífero, são bases importantes para o trabalho de campo que abordou a totalidade de um ano hidrológico de duração.

### **4.2. Amostragem e análise de Água Subterrânea**

Após uma fase de pesquisa bibliográfica e a seleção de possíveis locais para colheitas, realizaram-se campanhas de campo para melhor restringir quais os locais de interesse a estudar.

Foram então escolhidos 13 pontos de água: pontos de água no interior do sistema aquífero para definição das características hidroquímicas e hidrodinâmicas do sistema; pontos de água nos bordos do sistema, para identificação e avaliação de descargas; pontos de água nas formações envolventes do sistema, para constrangimento deste e distinção da composição química das águas subterrâneas. As localizações destes pontos de água estão representadas na Figura 4-1.

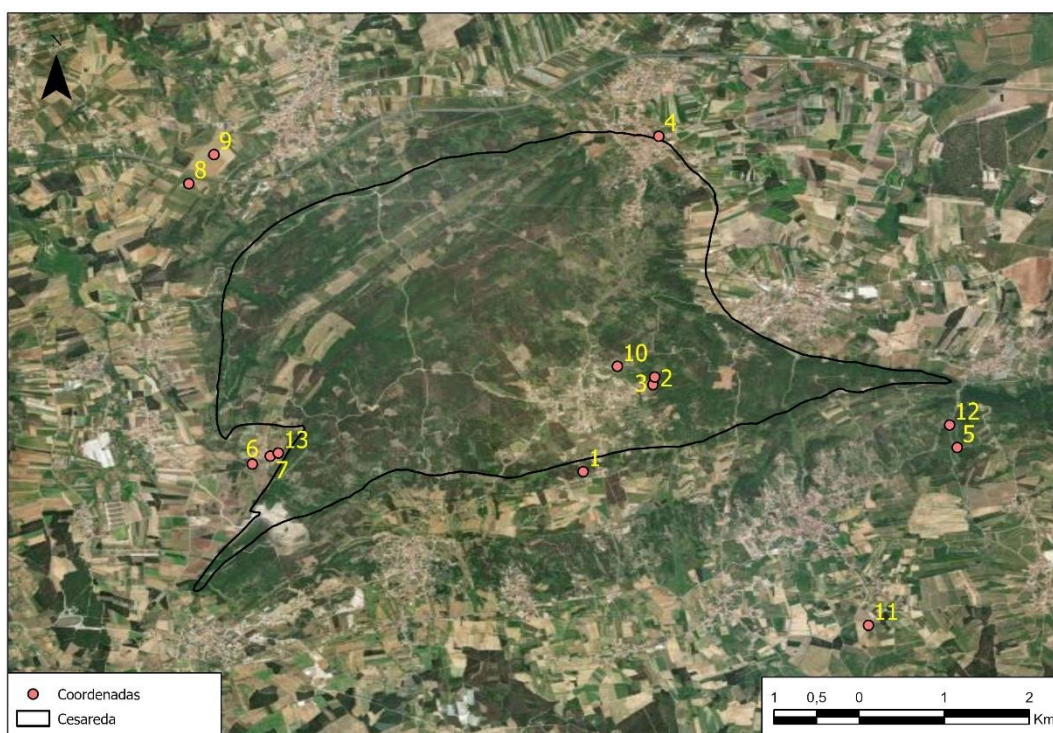


Figura 4-1 – Enquadramento das localizações dos furos, poços e nascentes analisados. Gerado em software ArcGIS Pro.

O sistema aquífero é representado pelos pontos de água 2, 3, 4 e 10. O ponto 3 é um poço que foi apenas amostrado, por possuir grande diâmetro e estar afetado por mistura com água de precipitação. Os pontos 2 e 10 são furos de captação de água, com bomba instalada a 100 m e 180 m, respetivamente, utilizados para medir a profundidade do nível piezométrico. O ponto 4 é a nascente Olho Marinho, considerada como o principal ponto de descarga do sistema aquífero.

Os pontos de água amostrados no limite do sistema são o 1, 5, 6, 7, 12 e 13. O ponto 6 foi desconsiderado devido a tratar-se de um poço que demonstrava alguma contaminação. Os pontos afastados foram considerados para observar amostras colhidas fora do sistema. Os pontos considerados nesta subdivisão foram os pontos 8, 9 e 11.

Foi feita uma amostragem de água em todos os pontos apresentados na Figura 4 1, para determinação dos parâmetros campo: temperatura, condutividade elétrica e pH. Nas amostras 2, 4, 8, 10, 11, 12 e 13, foi feita uma segunda amostragem para realização de análises químicas de elementos maiores no Laboratório de Análises Químicas do Instituto Superior Técnico.

Os dados químicos foram projetados num Diagrama de Piper para se avaliar as fácies hidrográficas das águas.

### 4.3. Tratamento de dados de precipitação

Foram obtidos dados de precipitação e temperatura do ar no Planalto de Cesareda entre outubro de 2022 e dezembro de 2023, cedidos pela Associação dos “Amigos das Cesaredas”. Estes dados foram de seguida tratados de maneira a facilitar a produção de gráficos mensais e diários. Foram também

retirados dados climáticos disponibilizados pelo Portal do Clima para os anos 1971-2000, para a zona centro oeste.

Os dados de temperatura do ar e precipitação serviram de base ao cálculo do balanço hídrico mensal pelo método de Thornthwaite.

## 4.4. Métodos de Recarga e Infiltração

### 4.4.1. Método de balanço hídrico mensal de Thornthwaite

O método de balanço hídrico mensal desenvolvido por Thornthwaite (1948) consiste no cálculo da evapotranspiração potencial (EVP) e da evapotranspiração real (EVR), considerando a precipitação média mensal, a temperatura média mensal, número máximo diário de horas de sol e a capacidade de campo dos solos (Figura 4-2). Para calcular a EVP são determinados diversos parâmetros, nomeadamente o índice calórico anual ( $I$ , Eq. 4.1), obtido através da soma aritmética dos índices calóricos mensais ( $i$ , Eq.4.2), calculado em função da temperatura através das seguintes equações:

$$I = \sum i \quad \text{Eq. 4. 2}$$

$$i = (0,2T(^{\circ}C))^{1,51} \quad \text{Eq. 4. 3}$$

Procede-se à determinação de um parâmetro  $a$ , de acordo com a seguinte equação (Eq. 4.3):

$$a = 67,7 * 10^{-8} . I^3 - 77,1 * 10^{-6} . I^2 + 0,0179 . I + 0,492 \quad \text{Eq. 4. 4}$$

São adquiridos valores do número máximo diário de horas de sol ( $n$ ), que aliados ao número de dias de cada mês do ano ( $d$ ) que permitem determinar o fator corretivo ( $f$ ) aplicado ao ETP, através da seguinte equação (Eq. 4.4):

$$f = \frac{\left(\frac{n}{12} * d\right)}{30} \quad \text{Eq. 4. 5}$$

Estes parâmetros foram posteriormente necessários para o cálculo da evapotranspiração potencial corrigida (ETP), de acordo com a seguinte equação (Eq. 4.5):

$$ETP = 16 * \left(10 * \frac{T(^{\circ}C)}{I}\right)^a * f \quad \text{Eq. 4. 6}$$

Através do balanço hídrico mensal foi possível determinar a ETR (Figura 4-2), assim como valores de *déficit* mensal (DH) e *superavit* mensal (SH).

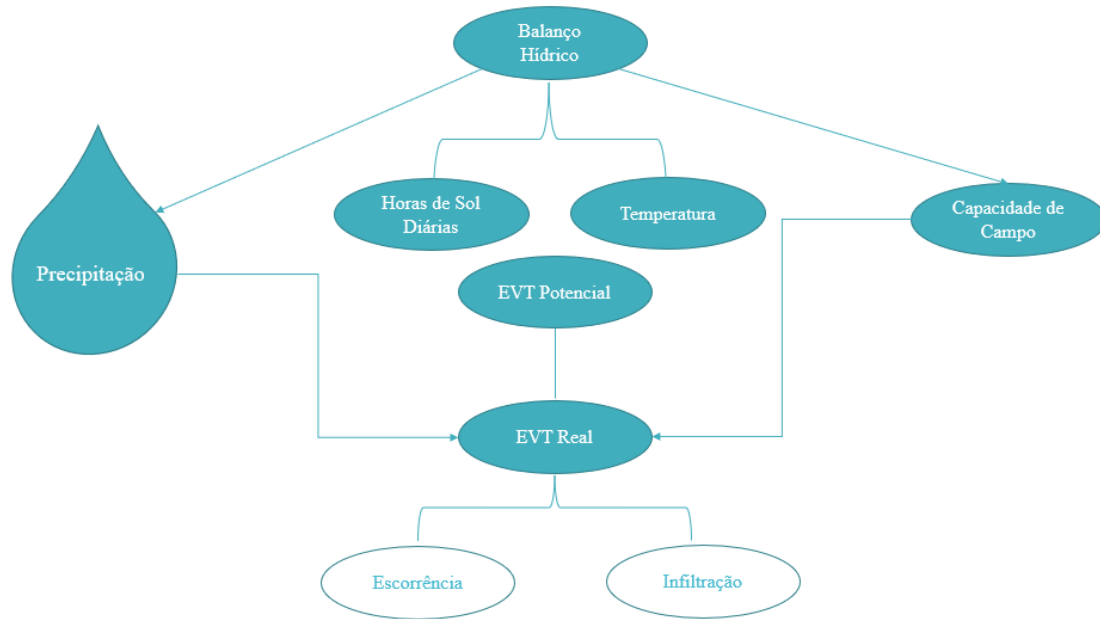


Figura 4-2 - Diagrama de método de balanço hídrico mensal.

#### 4.4.2. Método de Índice de Potencial de Infiltração (IPI)

O índice de potencial de infiltração trata-se de um método desenvolvido por Teixeira *et al.* (2010), para determinar zonas de maior potencial de circulação de águas subterrâneas, fazendo uso da hidrogeomorfologia como ferramenta. De forma a determinar estas áreas, são estimados fatores condicionantes, sendo alguns destes, declive do terreno, ocupação do solo, geologia local, densidade da rede hidrográfica e epicarso (APA e ISEP, 2017).

É feita uma avaliação dos parâmetros no terreno em estudo, sendo realizada uma consulta de estudos complementares de modo a obter um peso relativo de cada um dos condicionantes calculado através do método AHP (*Analytical Hierarchy Process*). Por fim os fatores são cruzados em ferramentas SIG. Posteriormente os fatores são divididos em quatro categorias: hidrogeomorfológicas, hidroclimáticas, geográficas e geológicas (Teixeira *et al.*, 2010), por fim são criados mapas de base sobre cada uma destas categorias em formato *raster*, originando áreas de maior potencial de infiltração.

As células dos ficheiros *raster* receberão um valor que dependerá da soma de diferentes fatores de ponderação, que variam entre 0 e 100, estes valores serão superiores ou inferiores dependendo da soma dos valores para cada local. Para delimitar o terreno foram utilizados os dados dos sistemas aquíferos de Portugal disponibilizados pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

Neste trabalho foram apenas utilizados cinco dos seis parâmetros utilizados pelo ISEP (APA e ISEP, 2017), tendo sido os pesos relativos de cada parâmetro adaptados (Tabela 4.1) para somarem a totalidade (100%). Estes pesos apresentam-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Comparação de pesos relativos ISEP (APA & ISEP, 2017) e pesos utilizados.

	(APA & ISEP, 2017) (%)	Valores Utilizados (%)
Litologia	32	35
Declive	26	29
Ocupação de Solo	12	13
Densidade de Lineamentos Tectónicos	9	-
Densidade da Rede Hidrográfica	5	5
Epicarso	16	18

Tabela 4.2- Pesos relativos dos parâmetros utilizados no método de IPI (adaptado de APA e ISEP, 2017).

Mapa	Peso Relativo
Litologia	35%
Declive	29%
Epicarso	18%
Ocupação de Solo	13%
Densidade de RH	5%

O parâmetro “Litologia” foi avaliado utilizando a tabela do Manual da REN (CCDR-LVT, 2015) para o método de índice de suscetibilidade. Os dados foram retirados do Atlas do Ambiente digital, disponibilizado pelo Instituto do Ambiente (atualmente APA). De maneira a tornar possível a soma ponderada das diferentes variáveis/mapas, o terreno foi delimitado utilizando a ferramenta *clip* para a zona do sistema aquífero e de seguida as células foram reclassificadas com auxílio da ferramenta *reclassify* segundo a Tabela 4.3. Este parâmetro é o mais importante, tendo por essa razão o maior peso relativo (35%). Os valores de cada classe são dependentes da porosidade e carsificação da geologia em questão, sendo os maiores valores dos materiais porosos e os menos de geologias mais impermeáveis.

Tabela 4.3 - Valores utilizados para o Parâmetro "Litologia" (adaptados de CCDR-LVT, 2015).

Classe de Litologia	Valor
Complexo Arenoso (p)	80
Aluviões (a)	80
Camada de Cabaços e Montejunto (J3)	70
Calcários do Jurásico Médio (J2)	50

O parâmetro “Declive” foi calculado através de dados de topografia de Portugal Continental, da base de dados do Environmental Systems Research Institute (ESRI), ao qual foi utilizada a ferramenta *fill* que corrige quaisquer erros de falta de informação. De seguida, com auxílio da ferramenta *slope*, que calcula a inclinação em percentagem de dados topográficos, foi construído o mapa de declives, reclassificado de acordo com a Tabela 4.4. Este parâmetro apresenta um peso de 29% sendo o segundo parâmetro com mais relevância. Os maiores valores estão atribuídos a menores declives pois estes permitem que a água se acumule e infiltre com o tempo, os maiores declives facilitam a escorrência superficial não facilitando a infiltração.

Tabela 4.4- Valores utilizados para o Parâmetro "Declive" (CCDR-LVT, 2015).

Classe de Declive (%)	Valor
<2	100
2-6	90
6-12	50
12-18	30
>18	10

O parâmetro "Epicarso" foi utilizado assim como apresentado pela CCDR-LVT (2015). De forma simplificada este parâmetro é classificado apenas como "muito desenvolvido" (E1), "pouco desenvolvido" (E2) ou "não existente" (E3) (Tabela 4.5). Para o complexo arenoso (p) e aluviões (a) foi dado o valor de não existente, para os Calcários do Jurássico Médio (J2) foi dado o valor de "pouco desenvolvido" e para a Camada de Cabaços e Montejunto (J3) foi dado o valor de "muito desenvolvido". Isto segue por base a concentração de grutas na zona em estudo se dar na Camada de Cabaços e Montejunto e existir a presença de algumas grutas nos Calcários do Jurássico Superior (Reboleira e Mateus, 2022). Este parâmetro tem como peso relativo 18%.

Tabela 4.5- Valores utilizados para o Parâmetro "Epicarso" (CCDR-LVT, 2015).

Classe de Epicarso	Valor
E1 - Sumidouros, dolinas, afloramentos muito fraturados.	100
E2 - Zonas intermediárias no alinhamento de dolinas,	30
E3 - Ausência	0

O parâmetro "Ocupação de Solo" foi adquirido através de dados disponibilizados pela Direção Geral do Território para o ano de 2023. Foi apenas necessário limitar à área de estudo e reclassificar para os valores apresentados na Tabela 4.6, estes valores foram adaptados do Índice de Suscetibilidade à contaminação de Ribeiro (2005). Este parâmetro tem um peso relativo de 13%.

Tabela 4.6 - Valores utilizados para o Parâmetro "Ocupação de Solo" (adaptada de Ribeiro,2005).

Classe de Ocupação de Solo	Valor
Massas de Água Superficiais	100
Zonas Húmidas	80
Matos	60
Florestas	
Culturas de Verão/Primavera	
Zonas Agrícolas e Culturas de Inverno/Outono	40
Superfícies sem ou com pouca vegetação	
Terrenos Artificializados	0

O parâmetro "Densidade de Rede Hidrográfica" foi calculado através de dados da "Rede hidrográfica GeoCodificada" disponibilizados pela Agência Portuguesa do Ambiente e com o auxílio da ferramenta *line density*. Os valores utilizados para cada classe foram adaptados do ISEP (APA e ISEP, 2017) e estão apresentados na Tabela 4.7. Este é o parâmetro menos relevante tendo apenas 5% de peso relativo. Os valores mais elevados correspondem aos locais com menor densidade de linhas de

água, isto deve-se a nestes locais a água não ter tendência de escoamento superficial, mantendo-se no local e infiltrando.

Tabela 4.7- Valores utilizados para o Parâmetro "Densidade da Rede Hidrográfica" (CCDR-LVT, 2015).

Classe da Densidade de Rede Hidrográfica	Valor
0 - 3,0	100
3,0 - 6,0	80
6,0 - 9,0	40
> 9,0	20

#### 4.4.3. Índice de Recarga Efetiva ( $I_{REF}$ )

O Método de Índice de Recarga Efetiva assim como o método IPI é um método de sobreposição de mapas que considera a média de três parâmetros, com pesos diferentes e que são valorizados entre 1 e 10, através da Equação 4.6. As classes de parâmetros utilizadas são a do índice DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) adaptados para o Índice de Recarga Efetiva (CCDR-LVT, 2015).

$$I_{REF} = \frac{(Ip+D+3ZV)}{5} \quad Eq. 4. 6$$

Os três parâmetros utilizados para calcular o índice de recarga efetiva são: Recarga Potencial do Sistema (com peso de 20%), Declive (com peso de 20%) e material da Zona Vadosa (com peso de 60%). O Índice de Recarga Efetiva varia entre 1 e 9,8 sendo 9,8 o de máxima infiltração.

O parâmetro "Recarga Potencial" ( $I_p$ ) considera a quantidade de água que pode entrar no sistema, sendo o aumento do Valor da classe proporcional ao aumento da Recarga em mm/ano. Este parâmetro foi avaliado segundo a Tabela 4.8.

Tabela 4.8- Valores utilizados para o Parâmetro "Recarga Potencial" (CCDR-LVT, 2015).

Recarga Potencial (mm/ano)	Valor
<51	1
51 - 102	3
102 - 178	6
178 - 254	8
>254	9

Assim como mencionado no método IPI, quanto maior o declive mais difícil se torna a infiltração da água no solo. O parâmetro "Declive da Superfície Topográfica" (D) é valorizado utilizando a Tabela 4.9.

Tabela 4.9- Valores utilizados para o Parâmetro "Decliva da Superfície Topográfica" (CCDR-LVT, 2015).

Classe de Declive (%)	Valor
<2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
>18	1

Por fim, o parâmetro mais importante "Litologia e estrutura da Zona Vadosa" (ZV) considera a litologia, tendo em consideração a permeabilidade de cada formação, propondo uma gama de valores para cada classe, de maneira a que possa ser adaptado às condições locais. Os valores utilizados na valorização deste parâmetro estão representados na Tabela 4.10.

Com auxílio da ferramenta *Raster Calculator* é calculado o mapa do Índice de Recarga Efetiva através da Equação 4.6.

Tabela 4.10 - Valores utilizados nas classes do parâmetro "Litologia e estrutura da Zona Vadosa" (CCDR-LVT, 2015).

Litologia da Zona Vadosa	Índice	Valor
Terraços e aluviões arenosas	8 - 10	10
Calcários carsificados do Jurássico Superior: Camada de Montejunto	6 - 8	8
Calcários e calcários dolomíticos e Formação de Candeeiros do Jurássico médio	8 - 10	8

#### 4.4.4. Índice de Vulnerabilidade EPIK (F)

Segundo a Portaria n.º 336/2019, do Diário da República para a Reserva Ecológica Nacional (REN), o método do índice de vulnerabilidade EPIK é utilizado para averiguar a vulnerabilidade de sistema aquíferos cársicos. Este método foi desenvolvido por Doerfliger e Zwahlen (1997) e considera a geologia, a geomorfologia e as características hidrogeológicas do sistema. É calculado através da soma ponderada dos mapas das variáveis, através da Equação 4.7.

$$F = 3E + P + 3I + 2K \quad \text{Eq. 4. 7}$$

São considerados 4 parâmetros: epicarso (E), cobertura de proteção (P), condições de infiltração (I) e grau de desenvolvimento da rede cársica (K). Para se valorizarem estes parâmetros foram utilizadas as tabelas disponibilizadas em CCDR-LVT (2015). O índice assim calculado será avaliado de acordo com as classes apresentadas na Tabela 4.11,

Tabela 4.11- Avaliação de vulnerabilidade de aquíferos cárscicos utilizando o Índice EPIK (adaptada de CCDR-LVT, 2015).

Índice EPIK (F)	Vulnerabilidade
<19	Muito Alta
19 - 25	Alta
>25	Moderada a Baixa

O parâmetro “Epicarso” (E) considera a geomorfologia cárscica do sistema, sendo o aumento do Valor proporcional ao aumento da carsificação, que facilita a infiltração e contaminação do sistema. Este parâmetro foi avaliado segundo a classificação apresentada na Tabela 4.12.

Tabela 4.12- Valores utilizados para o Parâmetro “Epicarso” (adaptada de CCDR-LVT, 2015).

Classe de Epicarso	Valor
E1 - Sumidouros, dolinas, afloramentos muito fraturados.	1
E2 - Zonas intermediárias no alinhamento de dolinas,	3
E3 - Ausência	4

O parâmetro “Cobertura de Proteção” (P) considera a geomorfologia cárscica do sistema, sendo o aumento do Valor proporcional ao aumento da espessura do solo, que facilita a atenuação de contaminantes. Este parâmetro foi avaliado segundo a classificação apresentada na Tabela 4.13.

Tabela 4.13- Valores utilizados para o Parâmetro “Cobertura de Proteção” (adaptada de CCDR-LVT, 2015).

Cobertura de Proteção	Espessura do solo acima do aquífero	Valor
P1	0-20 cm	1
P2	20-100 cm	2
P3	1-8 m	3
P4	>8 m	4

O parâmetro “Condições de Infiltração” (I) considera a geomorfologia cárscica do sistema, sendo o aumento do Valor proporcional ao aumento do declive e presença de vegetação. Este parâmetro foi avaliado segundo a classificação proposta na Tabela 4.14.

Tabela 4.14- Valores utilizados para o Parâmetro “Condições de Infiltração” (adaptada de CCDR-LVT, 2015).

Condições de Infiltração	Tipo	Valor
I1	Cursos de água de caráter perene ou temporário que alimentam sumidouros e dolinas	1
I2	Áreas em bacias hidrográficas com inclinação >10 % em áreas cultivadas e >25 % em prados e pastagens	2
I3	Áreas em bacias hidrográficas com inclinação <10 % em áreas cultivadas e <25 % em prados e pastagens	3
I4	Restante área da bacia hidrográfica	4

O parâmetro “Grau de Desenvolvimento da Rede Cársica” (K) considera a geomorfologia cársica do sistema, sendo o aumento do Valor proporcional ao desenvolvimento mesmo se este não sendo totalmente visível. Este parâmetro foi avaliado segundo a classificação apresentada na Tabela 4.15.

Tabela 4.15- Valores utilizados para o Parâmetro "Grau de Desenvolvimento da Rede Cársica" (adaptada de CCDR-LVT, 2015).

Rede Cársica	Grau de Desenvolvimento	Valor
K1	Moderado a muito desenvolvido	1
K2	Fraco	2
K3	Aquífero sem carsificação	3

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Variáveis Climáticas

Com os dados obtidos foram produzidos os gráficos de temperatura e de precipitação do ano hidrológico de 2022/2023, dos 3 últimos meses do ano de 2023 e da média dos anos 1971-2000. Os dados para Cesareda dos anos hidrológicos de 2022/2023 e dos últimos meses de 2023 encontram-se (a azul e laranja) na Figura 5-1 e na Figura 5-2 estando estes comparados com a médias dos anos hidrológicos entre 1971-2000 (a cinzento).

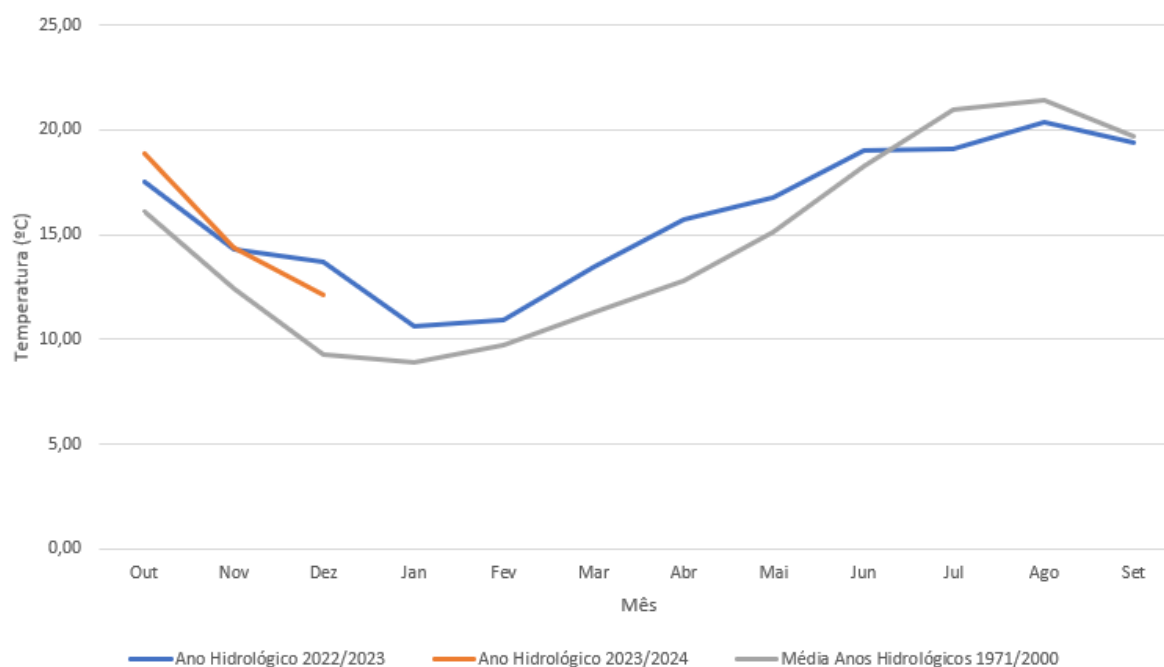


Figura 5-1 - Temperatura média mensal (°C) para Cesareda nos anos hidrológicos de 22/23, 23/24 e de Portugal continental dos anos 1971-2000.

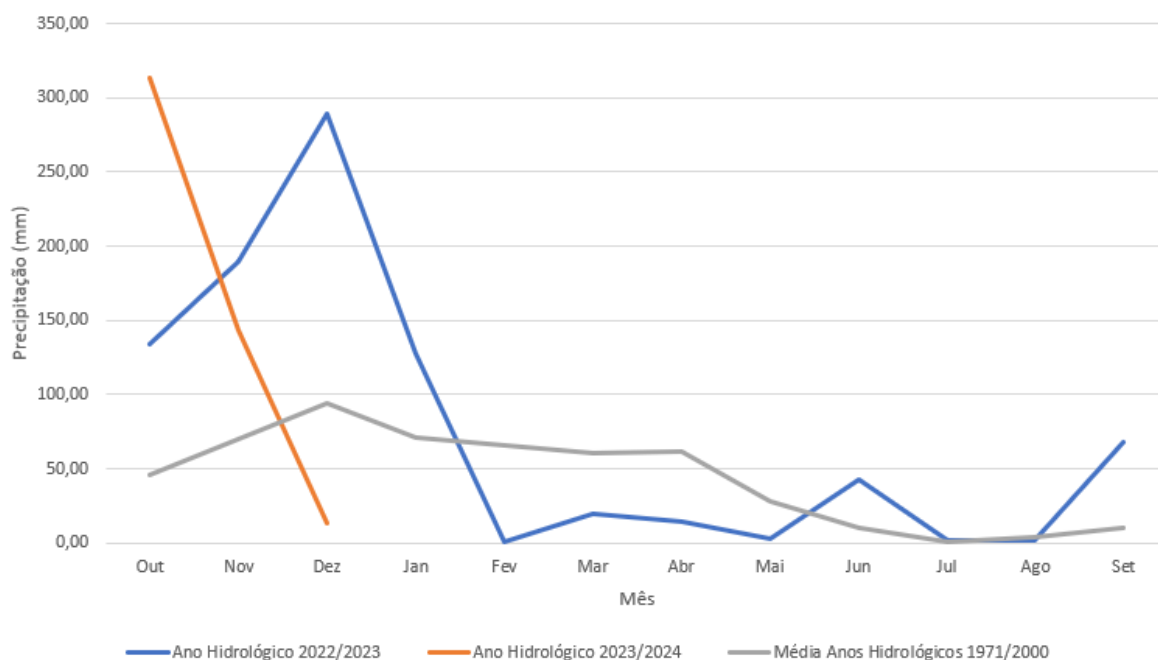


Figura 5-2 - Precipitação total mensal para Cesareda nos anos hidrológicos de 22/23, 23/24 e de Portugal continental dos anos 1971-2000.

Quando se compara a temperatura e precipitação de Cesareda de outubro de 2022 a 2 de dezembro de 2023 e com os dados de Portugal Continental durante trinta anos (1971-2000), observa-se que a região de Cesareda durante a execução das campanhas demonstrou maiores temperaturas no inverno e menores temperaturas no verão do que Portugal Continental durante 1971-2000, assim como demonstrou também demonstrou um aumento da precipitação total.

Foram calculados os valores de evapotranspiração utilizando o método de Thornthwaite para os anos hidrológicos de 22/23 e 23/24 (apenas 3 primeiros meses) e para os valores médios de 1971-2000 que se resumem na Figura 5-3, Figura 5-4 e Figura 5-5.

As capacidades de campo dos solos utilizadas para o balanço hídrico, foram definidas com o valor de 150 mm, adaptado de Thornthwaite & Mather (1957), tendo em consideração a composição dos solos da região (argilosos). Os restantes valores utilizados e obtidos pelo método de Thornthwaite encontram-se na Figura A.0-2, Figura A.0-3 e Figura A.0-4.

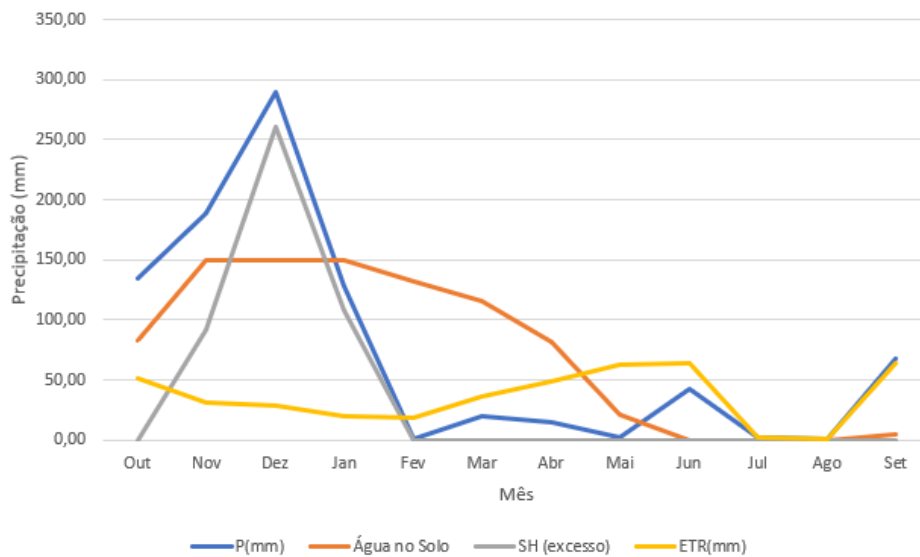


Figura 5-3- Valores de Precipitação, Água no solo, Superavit e Evapotranspiração Real do ano hidrológico de 22/23 em Cesareda utilizando o método de Thornthwaite.

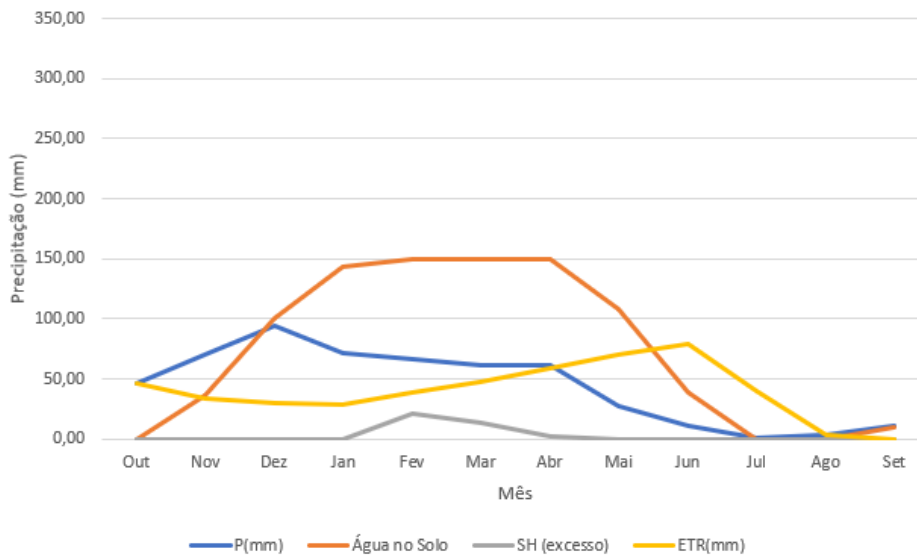


Figura 5-4- Valores de Precipitação, Água no solo, Superavit e Evapotranspiração Real da média dos anos 1971-2000 em Portugal Continental utilizando o método de Thornthwaite.

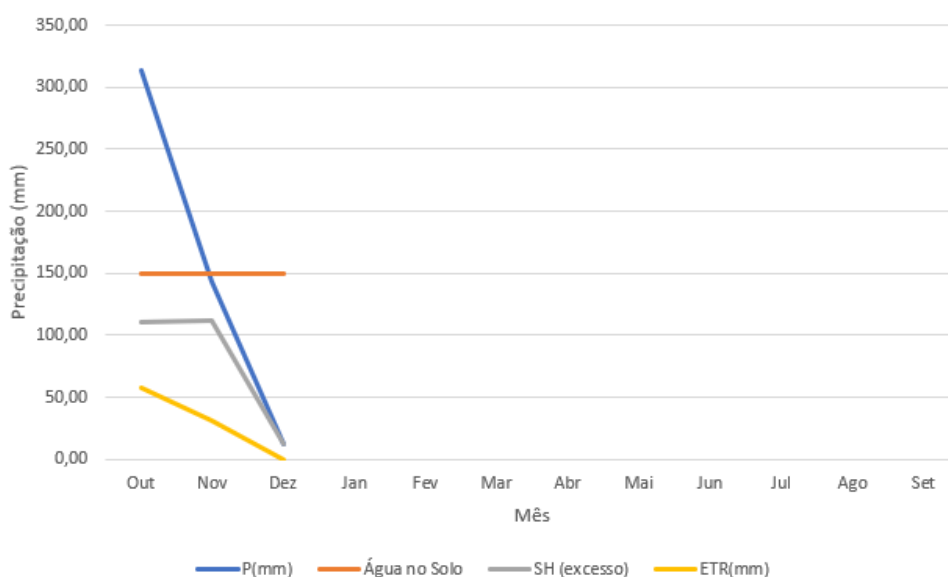


Figura 5-5- Valores de Precipitação, Água no solo, Superavit e Evapotranspiração Real do ano hidrológico de 23/24 em Cesareda utilizando o método de Thornthwaite.

A linha de precipitação do ano hidrológico 22/23 segue a mesma tendência da média dos valores de 1971-2000, onde se apresenta um pico de precipitação no mês de dezembro, seguida de uma diminuição abrupta. Ao contrário do esperado no ano de 2023 deu-se uma queda muito brusca da precipitação em fevereiro, tendo ficado em valores muito baixos de precipitação durante todo o ano, tendo apenas uma nova subida da precipitação no fim de setembro.

A temperatura em todos os anos hidrológicos tem seguido a mesma tendência, verificando-se uma descida de temperatura de outubro até janeiro, seguida de uma subida gradual da mesma até agosto e conseqüente nova descida.

O volume de precipitação durante o ano hidrológico de 2022/2023 foi de 893,6 mm; durante todo o ano de 2023 (até dia 2 de dezembro) choveu 750,3 mm; de outubro de 2022 até a 02 de dezembro de 2023 choveu 1363,5 mm.

## 5.2. Composição físico-química das águas

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados das medições dos parâmetros de campo nas águas subterrâneas selecionadas. Foram observadas durante as campanhas de campo dois eventos opostos, um de precipitação a cima da média e de elevada intensidade pouco tempo antes da 1ª campanha e uma época de seca durante a 2ª e a 3ª campanha. Apesar da 3ª campanha ter sido realizada 15 dias após um episódio de precipitação não se observou água na nascente, isto levou à necessidade de uma 4ª campanha após episódios de precipitação considerável entre 16/10/2023 e 05/11/2023, que apenas demonstraram presença de água no sistema no fim do mês de novembro.

As águas apresentam temperatura entre 15,2 e 21,2 °C, com o valor máximo na água CZ-8 (1ª campanha); o pH está sempre acima de 6, com o valor máximo registado no poço CZ-3, de 7,34. A mineralização das águas é muito variada, refletida pelos valores de condutividade elétrica que

variam entre 142,6 uS/cm (possivelmente com mistura de água da chuva) e 1521 uS/cm no poço CZ-6 (1ª campanha).

Tabela 5.1 - Resultados dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas medidos no campo

	pH	t (°C)	Condutividade (µS)
CZ - 1 - P	7,27	15,2	466
CZ - 2 - F	6,46	15,9	1048
	6,54	15,6	1001
CZ - 3 - P	7,34	12,8	142,6
CZ - 4 - N	6,56	20,2	1119
	6,54	19,8	1001
CZ - 5 - N	6,65	15,9	590
CZ - 6 - P	6,94	18	1521
CZ - 7 - F	7,15	18,1	605,2
CZ - 8 - F	6,67	21,2	1125
	6,13	17,8	1143
CZ - 9 - F	6,05	17,7	1211
CZ - 10 - F	6,13	17,4	933,4
CZ - 11 - F	7,06	17,7	970,6
CZ - 12 - P	6,78	16,8	17,9
CZ - 13 - F	6,22	20,2	998,9

Após a realização dos trabalhos de campo as amostras foram encaminhadas para laboratórios especializados de maneira a serem obtidos os resultados pretendidos (Tabela 5.2).

Tabela 5.2- Tabela resumo das análises químicas.

	CZ - 2 - F	CZ - 4 - N	CZ - 8 - F	CZ - 10 - F	CZ - 11 - F	CZ - 12 - P	CZ - 13 - F
pH	6,79	7,12	7,05	6,85	7,24	7,14	7,04
CE (uS/cm)	-	-	1010	843	873	717	893
HCO <sub>3</sub> (mg/L)	585	444	420,9	512,4	337,94	533,14	533,14
SiO <sub>2</sub> (mg/L)	10	9,1	19	8,4	11	9	11
Cl (mg/L)	33	127	96	35	78	43	52
SO <sub>4</sub> (mg/L)	42	49	23	29	145	17	28
Ca (mg/L)	188	133	143	168	116	123	169
Mg (mg/L)	13	20	28	9,7	30	14	19
K (mg/L)	0,96	2,7	2	1,4	23,6	3,9	2,2
Na (mg/L)	23	85	77	27	58	32	37
Fe (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,06	< 0,01	0,13	0,018	< 0,01

A projeção das análises químicas das águas num Diagrama de Piper permite caracterizar a fácies hidroquímica, fundamentalmente como bicarbonata cálcica, embora algumas águas mostrem enriquecimento em cloreto (CZ-8, CZ-4) e sulfato CZ-11 (Figura 5.6). Estas últimas amostras também mostram enriquecimento em Na e ligeiro em Mg.

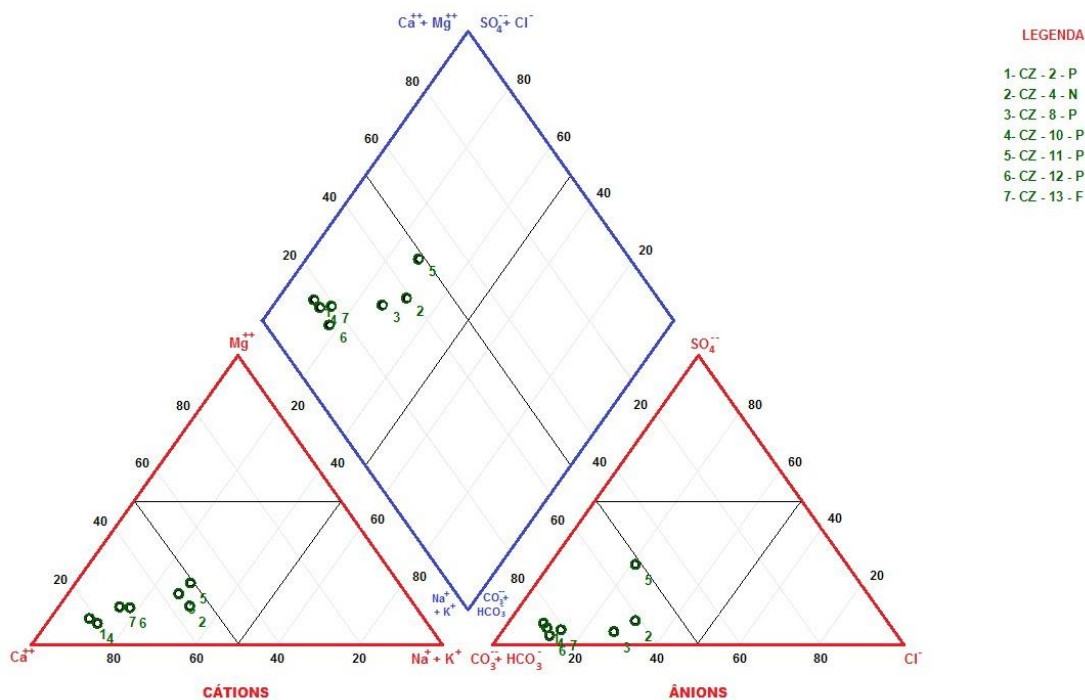


Figura 5-6 Representação das águas amostradas num Diagrama de Piper e % de concentração de iões dissolvidos nas amostras. Gerado em software QualiGraf.

Como mencionado anteriormente no capítulo 4.2 foram escolhidos 13 pontos, 4 no interior do sistema e 9 nos limites do sistema.

Foram avaliadas amostras recolhidas em 3 dos 4 pontos localizados no interior dentro do sistema (CZ – 2 – F, CZ – 4 – N e CZ – 10 – F). Os valores obtidos apresentam-se próximos entre si. O ponto 4 (CZ – 4 – N) demonstra maior concentração de cloreto e de sódio que os restantes, isto poderá estar relacionado com o diapiro que permite que a água aflore na nascente do Olho Marinho, devido a ser uma barreira semi-impermeável a impermeável. O contacto da água com o diapiro durante a sua ascensão levará ao aumento destes parâmetros químicos quando comparado com os normais do sistema.

Dos restantes 9 pontos foram colhidas 4 amostras. As amostras dos pontos 12 e 13 (CZ – 12 – P e CZ – 13 – F) apresentam valores muito próximos um do outro e com os localizados dentro do sistema. Isto pode demonstrar uma circulação de água no sistema para sistemas próximos, como mencionado por Seifert (1963), *in* Manuppella *et. Al* (1999). Existe alguma semelhança entre o ponto 8 (CZ – 8 – F) e o ponto 4, isto pode ser explicado por um contacto que ambos tenham com o diapiro. O ponto 11 (CZ – 11 – F) apresenta-se único quando comparado com os restantes, demonstrando uma concentração de ferro, potássio e sulfatos uma ordem de grandeza superior aos restantes, isto pode estar associado a contaminações ligadas à atividade agrícola ou ser água de um sistema totalmente diferente.

## 5.3. Avaliação de Recursos

### 5.3.1. Índice de Potencial de Infiltração (IPI)

Este método foi calculado segundo o modelo representado na Figura 5-7 e descrito no Capítulo 2.1.3 de seguida reclassificados, para cada parâmetro necessário.

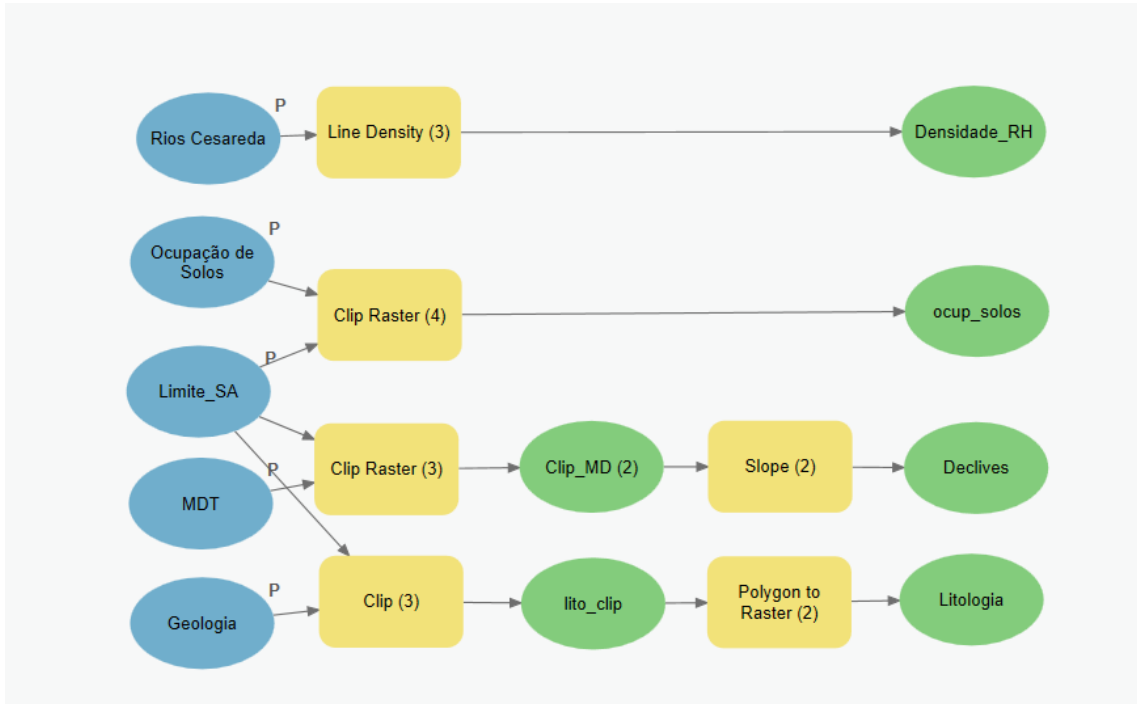


Figura 5-7- Modelo representativo do método de obtenção dos mapas de parâmetros.

Primeiro foi criado o mapa da densidade da rede hidrográfica (Figura A.0-5) onde se observa que 100% da área em estudo encontra-se dentro da classe “0,0-3,0 km/km<sup>2</sup>”. Foram dados valores a cada uma das classes segundo a Tabela 4.7, tendo sido obtido o mapa da Figura A.0-6.

Atribuíram-se valores para as classes do mapa de Ocupação de Solos (Figura A.0-7) segundo a Tabela 4.6, tendo sido obtida a Figura A.0-8, que mostra uma grande quantidade de áreas de mato, floresta e/ou culturas de verão/primavera, com 80% de toda a região; seguida de culturas de inverno/outono e superfícies sem ou com pouca vegetação ocupando 18%; por fim áreas artificializadas ocupando 2% da região em estudo.

O declive da região (Figura A.0-9) após a sua reclassificação segundo a Tabela 4.4, representa-se pela Figura A.0-10, que mostra um domínio da classe “2-6%”, com 50% da região; seguida pela classe “< 2%” com 26% e “6-12%”, com 19%. As restantes classes que se demonstram vestigiais são “12-18%” com 3% e “> 18%” com 2%.

A região está representada litologicamente por formações carbonatadas, mais especificamente pela formação das Camadas de Cabaços e de Montejunto (J3) que ocupam 79% da região, seguidas pelos Calcários do Jurássico Médio (J2), 9% da região, e por fim as aluviões (a) e o complexo arenoso (P), que representam os restantes 2% da região. Isto observa-se na Figura A.0-11, que com a sua

reclassificação utilizando a **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, resultou a Figura A.0-12.

O Epicarso do sistema considerou-se ligado à litologia do local, tendo sido consideradas as formações Camadas de Cabaços e Montejunto como E1 (79%), a formação dos calcários do Jurássico Médio como E2 (9%) e as aluviões e complexo arenoso como E3 (2%). A Figura A.0-13 representa a divisão das várias classes de carsificação e a Figura A.0-14 o resultado da reclassificação com auxílio à Tabela 4.5.

Todos os cinco parâmetros foram então sobrepostos tendo em consideração o peso ponderado de cada um (Tabela 4.2) e foi obtido um mapa do Potencial de Infiltração da região (Figura 5-8). Tendo sido o valor mínimo obtido 34%, localizado nos locais ocupados pelas formações dos calcários do Jurássico Médio, e o máximo 58% que se encontra nos locais das Camadas de Cabaços e Montejunto. Em média a região tem 53% de Potencial de Infiltração, significando uma infiltração média de 473,9 mm para o ano hidrológico de 2022/2023. A Tabela 5.3, apresenta um resumo das infiltrações da região ao longo dos trabalhos de campo e a Figura A.0-15 uma visualização das mesmas.



Figura 5-8- Índice de Potencial de Infiltração do Sistema Aquífero da Cesareda.

Tabela 5.3 - Tabela resumo de precipitações e infiltrações da região (Através do IPI).

	Ano Hidrológico 2022/2023	Outubro de 2022 a 2/Dez de 2023
Precipitação Total (mm)	893,6	1363,5
Infiltração Mínima (mm)	302,9	462,2
Infiltração Média (mm)	473,6	722,7
Infiltração Máxima (mm)	520,1	793,6

### 5.3.2. Índice de recarga efetiva (IREF)

O declive da região (Figura A.0-9) após a sua reclassificação para este método (Tabela 4.9) representa-se pela Figura A.0-16, que mostra um domínio da classe “2-6%” ocupando 50% da região, seguida pela classe “< 2%” com 26% e “6-12%” com 19%. As restantes classes menos representadas são “12-18%” com 3% e “> 18%” com 2%.

Este índice considera a recarga potencial ou precipitação total como um parâmetro. Existem, no entanto, três precipitações totais que poderiam ser utilizadas: Foram escolhidos estes dados para ser possível relaciona-se com o caudal que se observava na nascente Olho Marinho. A do ano de 2023 que representaria o meio e fim de um ano hidrológico e o início do seguinte e a utilização da precipitação total desde o início do estudo (outubro de 2022) a 2 de dezembro de 2023, que representaria a maior quantidade de tempo e dados, no entanto, estaríamos a avaliar duas alturas de chuva que iriam influenciar os resultados.

Segundo a Tabela 4.8, todas estas recargas potenciais estariam na mesma classe “>254mm”, isto pois foi calculado no capítulo 5.1 que a precipitação para o ano hidrológico 2022/2023 foi de 893,6 mm o que significa que 100% da região independentemente da escolha se encontraria nessa classe (Figura A.0-17).

A parâmetro “zona vadosa” depende da litologia local (Figura A.0-11) e quando utilizada a Tabela 4.10, observa-se na Figura A.0-18 uma união das formações “Camadas de Cabaços e Montejunto” e “Calcários do Jurássico Médio” que ocupam 98% da região, sendo os restantes 2% para as aluviões e complexo arenoso.

O mapa de recarga efetiva (Figura 5-9) mostra máximo de 9,8 no complexo arenoso, e valor médio de 8,25 na restante área do sistema.

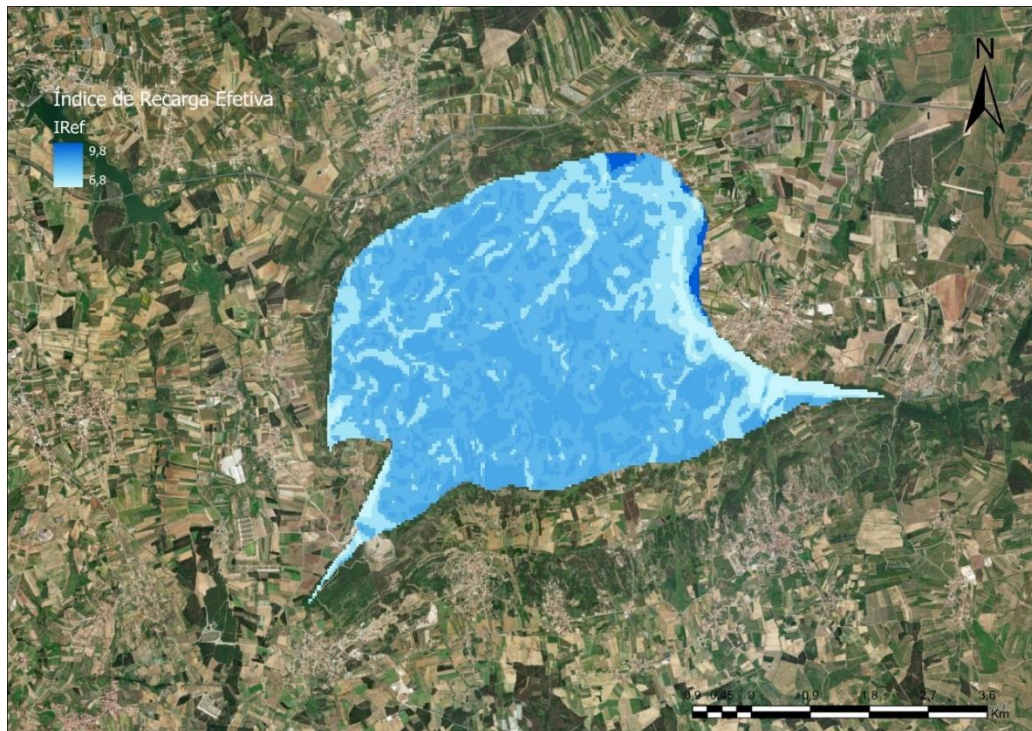


Figura 5-9- Índice de Recarga Efetiva do Sistema Aquífero da Cesareda.

### 5.3.3. Índice de vulnerabilidade EPIK

Como anteriormente descrito o parâmetro “Epicarso” do sistema teve apenas em consideração a litologia local (Figura A.0-11) e foi, então, utilizada a Tabela 4.12, para criar o mapa representado na Figura A.0-19. O parâmetro “Grau de Desenvolvimento da Rede Cársica” (Figura A.0-22) segue a mesma logística onde também está associado à litologia local. As ocupações da região pelas várias classes mantêm-se as apresentadas anteriormente para a litologia.

O parâmetro de cobertura de solo foi avaliado segundo Duarte (2022) que representou a espessura do solo na região das Cesaredas (Figura 5-10), tendo em consideração estes dados e quase o total domínio de espessuras entre 0 e 100 cm, foi considerado a utilização de um valor único (Classe “20-100 cm”) para toda a região com auxílio da Tabela 4.13 (Figura A.0-20).

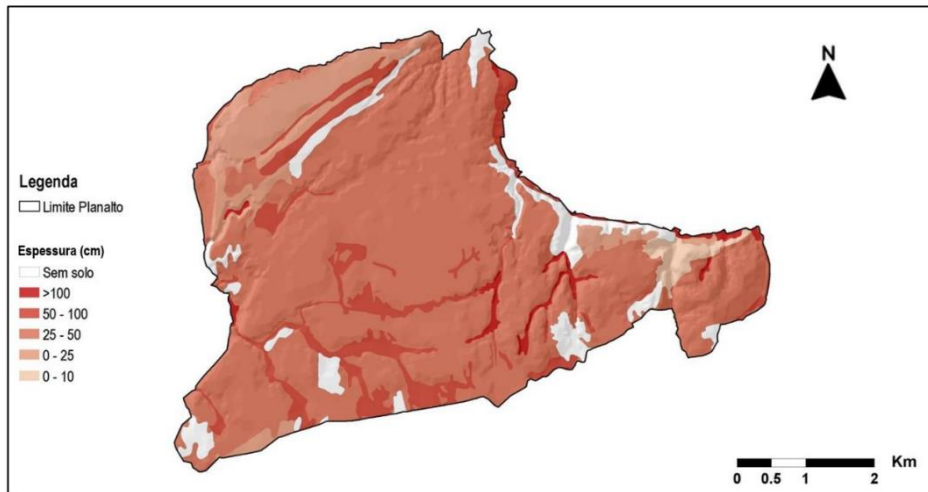


Figura 5-10 - Espessura de Solos na região do planalto das Cesaredas (retirado de Duarte, 2022).

O parâmetro condições de infiltração também demonstrou algumas dificuldades na sua representação, mas tendo em consideração a Tabela 4.14 e o facto da região ter 95% de declives inferiores a 12%, utilizaram-se dois valores, um para as zonas artificializadas (Classe I4) que ocupam 2,2% da região e um para a classe “I3” que ocupa os restantes 97,8% da região (Figura A.0-21).

Após o cálculo do método de EPIK foi obtido a Figura 5-11, que mostra que 98% da região se encontra com vulnerabilidade muito alta e os restantes 2% com vulnerabilidade alta.

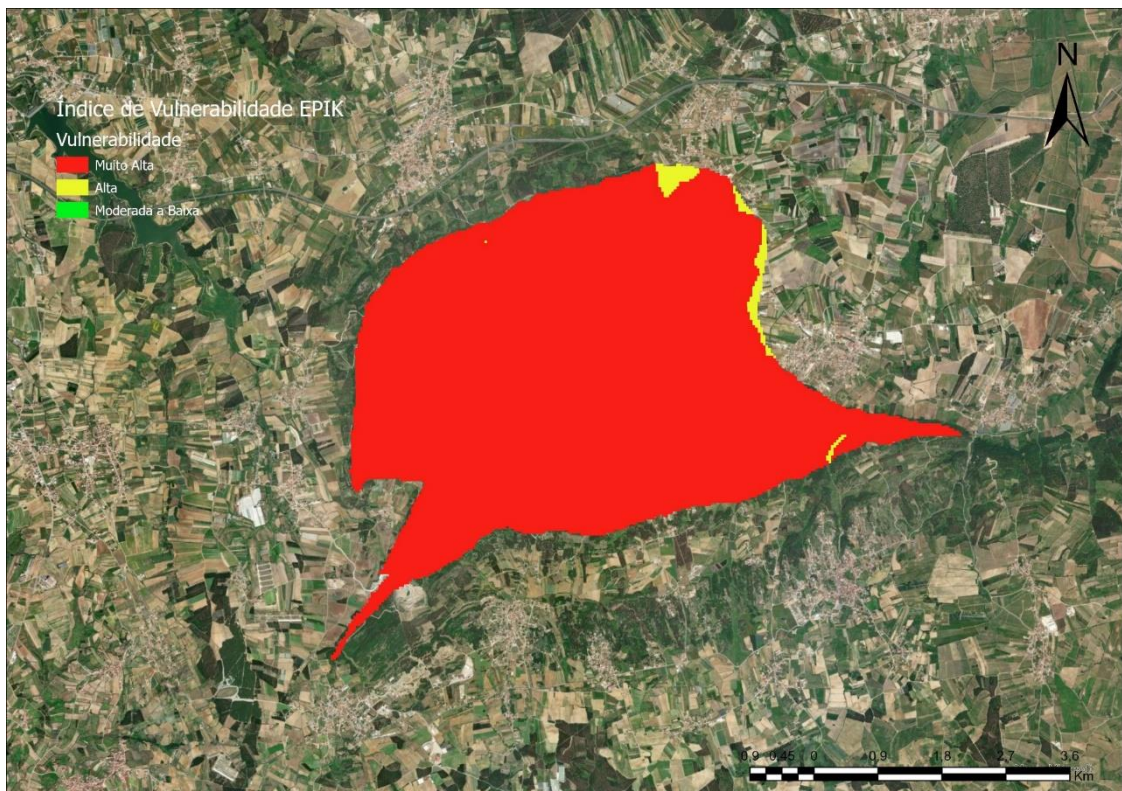


Figura 5-11 - Vulnerabilidade do Sistema Aquífero da Cesareda.

## 6. Conclusão

Durante as campanhas de campo dois extremos meteorológicos foram observados, uma época de tempestade pouco tempo antes da 1ª campanha e uma enorme falta de água especialmente notável durante a 2ª e a 3ª campanha, mesmo tendo sido realizada a 3ª campanha 15 dias após um episódio de precipitação, o que pode indicar que apesar de tudo a carsificação do sistema não está ainda bem desenvolvida.

E mesmo tendo existido episódios de precipitação considerável entre 16/10/2023 e 05/11/2023 como se observa na Figura A.0 1, só começou a haver sinais de água na nascente do Olho Marinho (Ponto 4), perto do fim do mês de novembro, tendo sido feito mais uma campanha englobando furos que anteriormente se encontravam secos assim como a nascente.

É notável o efeito do diapiro de Caldas da Rainha nas águas localizadas a profundidades superiores a 100 m, assim como na nascente do Olho Marinho, onde se observa enriquecimento em sódio, cloreto e sulfato. A drenagem da água do sistema aquífero Cesareda para as formações adjacentes, na zona em contacto com o diapiro das Caldas da Rainha, contacta com as formações evaporíticas, mais impermeáveis e que facilitam a subida e emergência das águas em contacto com as formações salinas, permitindo a dissolução de halite (NaCl) e gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )

A taxa de infiltração estimada para o sistema aquífero de Cesareda varia entre 33,9% e 58,2% (Figura 5-8). O parâmetro “litologia” tem uma importância muito significativa na definição do Potencial de Infiltração, isto deve-se não só ao grande peso dado ao parâmetro no método, como também ao facto do parâmetro Epicarso estar associado à litologia.

Cerca de 98,5% da área do sistema aquífero apresenta muito alta vulnerabilidade (à poluição e consequentemente maior infiltração) e 1,5% alta vulnerabilidade. Segundo a Portaria n.º 336/2019, do Diário da República para a Reserva Ecológica Nacional (REN), a totalidade desta região deveria estar integrada na figura de Proteção e Recarga de Aquíferos.

Observa-se uma mudança nos episódios climáticos da região, ocorrendo precipitação de maior intensidade em intervalos de tempo menores. Isso faz com que muita água caia rapidamente, dificultando a sua absorção no solo devido ao ponto de saturação ser atingido. Além disso, os outonos, invernos e primaveras estão mais quentes, o que complica ainda mais a recarga do sistema de água.

As informações coletadas pela população mostram que, até agora, poços com cerca de 180 metros de profundidade não estão sem água. Contudo, durante a terceira campanha, poços de aproximadamente 100 metros estavam secos.

Quando comparados com o sistema aquífero de Cesareda, o sistema aquífero de Estremoz-Cano, apresenta transmissividade 5,48 vezes maior que a transmissividade do sistema aquífero de Cesareda, com valores de 2847  $\text{m}^2/\text{dia}$ ; a produtividade é metade do valor de produtividade de Cesareda com valores de 7 L/s; A recarga do sistema aquífero de Estremoz-Cano, apresenta valores de 191,09 mm/ano (Midões e Costa, 2010) que é inferior ao valor apresentado em Almeida *et al.* (2000) para Cesareda com 294 mm/ano. O sistema aquífero de Moura-Ficalho possui recarga de 152,54 mm/ano (Costa, 1991), que se encontra abaixo do valor obtido por Almeida *et al.* (2000) e obtido por APA e ISEP (2017) para Cesareda, que são 294 mm/ano e 225,2 mm/ano respetivamente.

Apesar de tudo este sistema apresenta pouca representatividade de pontos de colheita, estando estes muito localizados dentro da povoação dos Casais das Cesaredas e na nascente Olho Marinho, o que dificulta o estudo do sistema em si. Mas tendo em consideração a alta vulnerabilidade deste sistema,

é necessário um estudo mais aprofundado do impacto ambiental e da recarga neste sistema e ser criado um plano não só de sustentabilidade hídrica mas também um plano de prevenção ambiental para prevenção da contaminação do sistema.

## 7. Bibliografia

- Abrunhosa, M. J. (1988) – Síntese Hidrogeológica da Bacia Hidrográfica do Rio Ave (Portugal). Barcelona, 22º Curso Internacional de Hidrologia Subterrânea.
- Aller, L.; Bennet, T.; Lehr, J.H. & Petty, R.J. (1987) - "DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings", U.S. EPA Report 600/2 - 85/018.
- Almeida, C.A.C. (1985) – *Hidrogeologia do Algarve Central*. Dissertação de Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Almeida, C. (1992) - Aspectos da exploração e protecção dos Recursos hídricos em regiões calcárias. *Indústria da Água* (6), 51-52.
- Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Jesus, M.R. & Gomes, A.J. (2000) - *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Centro de Geologia e Instituto da Água, 661 pp.
- APA (2014) – *Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste (RH5) – 2º Ciclo*. <https://apambiente.pt/agua/planos-de-gestao-de-regiao-hidrografica-2o-ciclo>
- APA e ISEP (2017) - Desenvolvimento de métodos específicos para a avaliação da recarga das massas de águas subterrâneas, para melhorar a avaliação do estado quantitativo. Apresentação pública do Relatório para a Agência Portuguesa do Ambiente, IP. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP.
- APA (2022) – *Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste (RH5A) – 3º Ciclo*. <https://apambiente.pt/agua/planos-de-gestao-de-regiao-hidrografica-3o-ciclo>
- Calçada, I. (2016) – *Metodologias Utilizadas no Estudo do Escoamento em Aquíferos Cársicos e o Caso Prático da Captação do Olho de Mira (Maciço Calcário Estremenho)*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 174 pp.
- CCDR-LVT (2015) – *Guia Metodológico para a Delimitação da Reserva Ecológica Nacional – Região de Lisboa e Vale do Tejo*. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo. Lisboa, julho de 2015, 204 pp.
- Costa, A. M. (1991) - Sistemas aquíferos da região de Moura. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, t 77, Lisboa, 133-146.
- Cooper, H. H., & Jacob, C. E. (1946) - A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Am. Geophys. Union Trans.*, 27, 526-534.
- Crispim, J. A.; Rézio, H.; Almeida, C. & Sena, J. (2013) - Exploração do Algar do Monte da Queijeira. <http://spe.pt/espeleologia/prospeccao-e-cadastro/351-exploracao-do-algar-do-monte-da-queijeira>.
- Doerfliger & Zwahlen (1997) - EPIK - «A new method for outlining of protection areas in karstic environment», in Gunnay G, Jonshon AI (eds.) - International Symposium and Field seminar on karst waters and environmental impacts, Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, 117-123.

- Duarte, B. (2022) – *Análise da Paisagem, aplicada ao Planalto das Cesaredas*, Dissertação de Mestrado, Escola Superior Agrária do Politécnico de Coimbra, 178 pp.
- Ford, D. C. & Williams, P. W. (1989) - *Karst Geomorphology and Hydrology*. London: Unwin Hyman.
- França J. C.; Zbyszewski G. & Moitinho de Almeida F. (1960) – Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000. Folha 26-C – Peniche. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa;
- Goldscheider, N. & Drew, D. (2007) - *Methods in Karst Hydrogeology*. International Contributions to Hydrogeology 26, International Association of Hydrogeologists, Taylor & Francis, London, 264 pp.
- Kirkham, R. R.; Gee, G. W. & Jones, T. L (1984) - Weighing lysimeters for long-term water balance investigations at remote sites. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.48, n.5, 1203-1205. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800050051x>
- Kresic, N. (2007) - Hydraulic methods. In N. Goldscheider & D. Drew (Eds.), *Methods in Karst Hydrogeology*. London: Taylor&Francis/Balkema, 65-92
- LNEC (2011) - Modelação da recarga dos Sistemas aquíferos da Região Hidrográfica do Centro. Relatório Final., Rel.208/2011– NAS, 132 pp.
- Manupella, G.; Rey, J.; Ramalho M. M.; Leinfelder R. & Baptista R. (1996) - *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000. Folha 30-A – Lourinhã*. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- Manuppella, G.; Antunes M. T.; Pais J.; Ramalho M. M. & Rey J. (1999) – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000. Folha 30-A – Lourinhã*. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- Mendonça, J. L. (2013) - As águas subterrâneas e o abastecimento de água a Lisboa no século XX. 9º Seminário sobre Águas Subterrâneas. Campus da Caparica: APRH & FCT-UNL, 114-117.
- Midões, C. P. & Costa, A. M. (2010) – Sistema Aquífero Estremoz-Cano. Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Unidade de Águas Subterrâneas, 9 pp.
- Milanović, P. T. (1976) - Water regime in deep karst — Case study of the Ombla Spring drainage area. In V. Yevjevich (Ed.), *Karst hydrology and water resources*, Proceedings of the U.S. - Yugoslavian Symposium, Dubrovnik. Littleton, Colo.: Water Resources Publication, 165-191.
- Oertel, G.; Freire de Andrade, C.; Zbyszewski, G. & da Veiga Ferreira, O. (1960) - Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000. Folha 26-C – Peniche. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa;
- Oliveira, M. M.; Costa, A.M. & Frances, A. (2004) - Estimativa da recarga de águas subterrâneas a partir da análise de hidrogramas de escoamento superficial na área abrangida pela Folha 6 da Carta Geológica de Portugal à escala 1:200.000.
- Oliveira, M. M. (2006) - *Recarga de Águas Subterrâneas: métodos de avaliação*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor. Universidade de Lisboa, Lisboa, 440 pp.
- Paradela, P. & Zbyszewski, G. (1971) - Hidrogeologia geral do centro e sul de Portugal. Artigo apresentado ao I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica, Lisboa.

- Peixinho de Cristo, F. (1988) - Análise dos sistemas de abastecimento público de águas nos distritos de Aveiro, Coimbra e Leiria. Lisboa: *Min. Plan. Admin. Territ.* (Dir. Geral Rec. Naturais / Dir. Serv.Hidrologia / Div. Geohidrologia).
- Portaria n.º 336/2019, de 26 de setembro - Diário da República n.º 185/2019, Série I de 2019-09-26, Ambiente e Transição Energética, 17 – 62.
- Ramos, L.; Nuncio, T.; Borralho, M. E.; Pais, J. R. & Vlachos, E. (1988) - Os recursos hídricos no sul de Portugal. (Vol. II). Lisboa: Ministério do Planeamento e da Administração do Território.
- Reboleira, A. S. & Mateus, O. (2022) - Geologia, Grutas e Fauna Subterrânea do Planalto das Cesaredas, Portugal. 11pp. doi: <http://dx.doi.org/10.34624/captar.v11i0.27451>.
- Ribeiro, L. (2005) - Um novo índice de vulnerabilidade específico de aquíferos à contaminação: Formulação e Aplicações, in Atas do 7.º SILUSBA, APRH, Évora, 15 pp.
- Silva, M. O. (1984) - *Hidrogeologia do Algarve Oriental*. Dissertação para a Obtenção do Grau de Doutor em Geologia. Departamento de Geologia da FCUL. 260 pp.
- Teixeira, J.; Chaminé, H.I.; Espinha Marques, J.; Gomes, A.; Carvalho, J.M.; Pérez Alberti, A. & Rocha, F. (2010) - Integrated approach of hydrogeomorphology and GIS mapping to the evaluation of ground water resources: an example from the hydromineral system of Caldas da Cavaca, NW Portugal. In Paliwal, B. S., ed., *Global Groundwater Resources and Management*, Selected Papers from the 33rd International Geological Congress, General Symposium: Hydrogeology. Oslo (Norway) Scientific Publishers (India), Jodhpur, 227-249.
- Taylor, C. J. & Greene, E. A. (2008) - Hydrogeologic Characterization and Methods Used in the Investigation of Karst Hydrology. In D. Rosenberry & J. LaBaugh (Eds.), *Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 4 – D2, 75-107
- Theis, C. V. (1935) - The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Transactions American Geophysical Union*, 16, 519-524.
- Thornthwaite, C. W. (1948) - An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- Thornthwaite, C. W. & Mather, J. R. (1957) - Instructions and tables for computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance. In “Climatology X:3”, Orexal, Institute of Technology, Canterton, New Jersey
- Vilaverde, A. (2016) – *Metodologias para a delimitação de áreas preferenciais de recarga em aquíferos fraturados*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade do Minho, 164 pp.
- Zbyszewski, G.; Camarate França, J.; Veiga Ferreira, O. & Manuppella, G. (1965) - *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000. Folha 30-B – Bombarral*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa;

Zbyszewski G.; da Veiga Ferreira O.; Manuppella G. & Torre de Assunção C. (1965) – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000. Folha 30-B – Bombarral*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa;

Zbyszewski. G. & de Matos, R. (1959) - *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000. Folha 26-D – Caldas da Rainha*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Zbyszewski. G. & Moitinho de Almeida F. (1959) – *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000. Folha 26-D – Caldas da Rainha*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

# Anexos

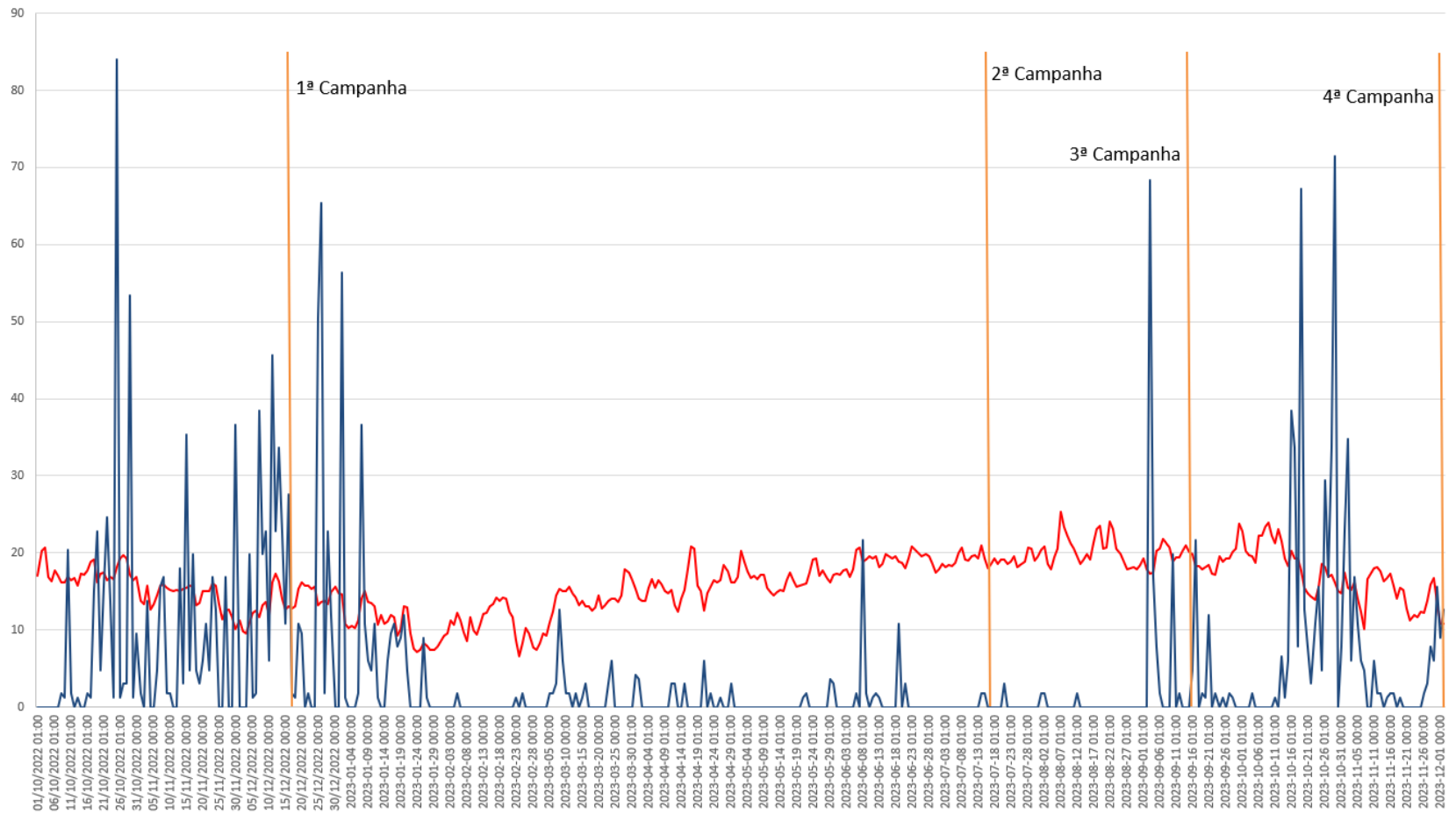


Figura A.0-1- Gráfico de precipitação diária (azul) em mm/h e temperatura diária (a vermelho) em °C no ano hidrológico 2022/2023. Estação dos Amigos das Cesaredas em Cesareda.

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	1971-2000
P(mm)	46	70,3	93,8	71,6	66,4	61,1	61,4	28,1	10,6	0,8	3,5	10,6	
T(°C)	16,1	12,4	9,3	8,9	9,7	11,3	12,8	15,1	18,3	21	21,4	19,7	
I mensal	5,85	3,94	2,55	2,39	2,72	3,43	4,13	5,31	7,09	8,73	8,98	7,93	63,05
nº máx diário de horas de sol (N)	9,53	10,60	11,94	13,33	14,52	15,10	14,79	13,73	12,40	11,03	9,80	9,18	
Dias	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	2	
K	25,440	23,499	31,873	33,325	38,760	37,750	39,481	36,651	31,000	29,444	24,500	0,102	
E	2,11	1,43	0,93	0,88	1,00	1,25	1,50	1,92	2,55	3,13	3,22	2,85	22,77
ETP(mm)	53,69	33,66	29,80	29,19	38,57	47,12	59,29	70,33	79,12	92,17	78,87	0,29	612,10
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	1971-2000
	NR	RR	RR	RR	Exc	Exc	Exc	CR	CR	NR	NR	RR	
P(mm)	46,00	70,30	93,80	71,60	66,40	61,10	61,40	28,10	10,60	0,80	3,50	10,60	524,2
ETP(mm)	53,69	33,66	29,80	29,19	38,57	47,12	59,29	70,33	79,12	92,17	78,87	0,29	612,10
Água no Solo	0	37	101	143	150	150	150	108	39	0	0	10	
SH (excesso)	0,000	0,000	0,000	0,000	20,886	13,984	2,113	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	36,98
DH (a menos)	7,691	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	52,125	75,374	0,000	135,19
ETR(mm)	46,00	33,66	29,80	29,19	38,57	47,12	59,29	70,33	79,12	40,05	3,50	0,29	476,91

Restituição de Reservas	
Excedentes	
Consumo de Reservas	
Necessidade de Rega	
a	1,484

Figura A.0-2 - Método de Thornthwaite para a média dos anos 1971-2000.

	Out	Nov	Dez	2022
P(mm)	134,40	189,20	289,60	
T(°C)	17,50	14,30	13,70	
I mensal	6,63	4,89	4,58	69,99
nº máx diário de horas de sol (N)	11,03	9,80	9,18	
Dias	31	30	31	
K	29,444	24,5	24,5055	
E	1,74	1,26	1,18	4,18
ETP(mm)	51,33	30,92	28,88	111,14
	Out	Nov	Dez	2022
	RR	Exc	Exc	
P(mm)	134,40	189,20	289,60	613,20
ETP(mm)	51,33	30,92	28,88	111,14
Água no Solo	83	150	150	
SH (excesso)	0,000	91,345	260,719	352,06
DH (a menos)	0,00	0,00	0,00	0,00
ETR(mm)	51,33	30,92	28,88	111,14

Restituição de Reservas	
Excedentes	
Consumo de Reservas	
Necessidade de Rega	

a	1,599
---	-------

Figura A.0-3- Método de Thornthwaite para o ano de 2022.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	2023
P(mm)	128	0,8	20	14,8	2,5	42,9	1,8	1,5	68,1	313,7	143,3	12,9	
T(°C)	10,629	10,910714	13,4935	15,7133	16,7613	19,0233	19,1	20,39355	19,4067	18,8806	14,37	12,15	
I mensal	3,12	3,25	4,48	5,64	6,21	7,52	7,57	8,35	7,75	7,44	4,92	3,82	70,07
nº máx diário de horas de sol (N)	9,53	10,60	11,94	13,33	14,52	15,10	14,79	13,73	12,40	11,03	9,80	9,18	
Dias	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	2	
K	25,440	23,499	31,873	33,325	38,760	37,750	39,481	36,651	31,000	29,444	24,500	0,102	
E	0,78	0,82	1,15	1,46	1,62	1,98	2,00	2,22	2,05	1,96	1,27	0,97	18,27
ETP(mm)	19,89	19,16	36,51	48,71	62,82	74,93	78,87	81,32	63,53	57,74	31,04	0,10	574,63
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	2023
	Exc	CR	CR	CR	CR	NR	NR	NR	RR	Exc	Exc	Exc	
P(mm)	128,00	0,80	20,00	14,80	2,50	42,90	1,80	1,50	68,10	313,70	143,30	12,90	750,3
ETP(mm)	19,89	19,16	36,51	48,71	62,82	74,93	78,87	81,32	63,53	57,74	31,04	0,10	574,63
Água no Solo	150	132	115	81	21	0	0	0	5	150	150	150	
SH (excesso)	108,110	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	110,526	112,261	12,801	343,70
DH (a menos)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,136	77,074	79,818	0,000	0,000	0,000	0,000	168,03
ETR(mm)	19,89	19,16	36,51	48,71	62,82	63,80	1,80	1,50	63,53	57,74	31,04	0,10	406,60

Restituição de Reservas	
Excedentes	
Consumo de Reservas	
Necessidade de Rega	

a	1,601
---	-------

Figura A.0-4- Método de Thornthwaite para o ano de 2023.



Figura A.0-5 - Densidade da Rede Hidrográfica do Sistema Aquífero da Cesareda.

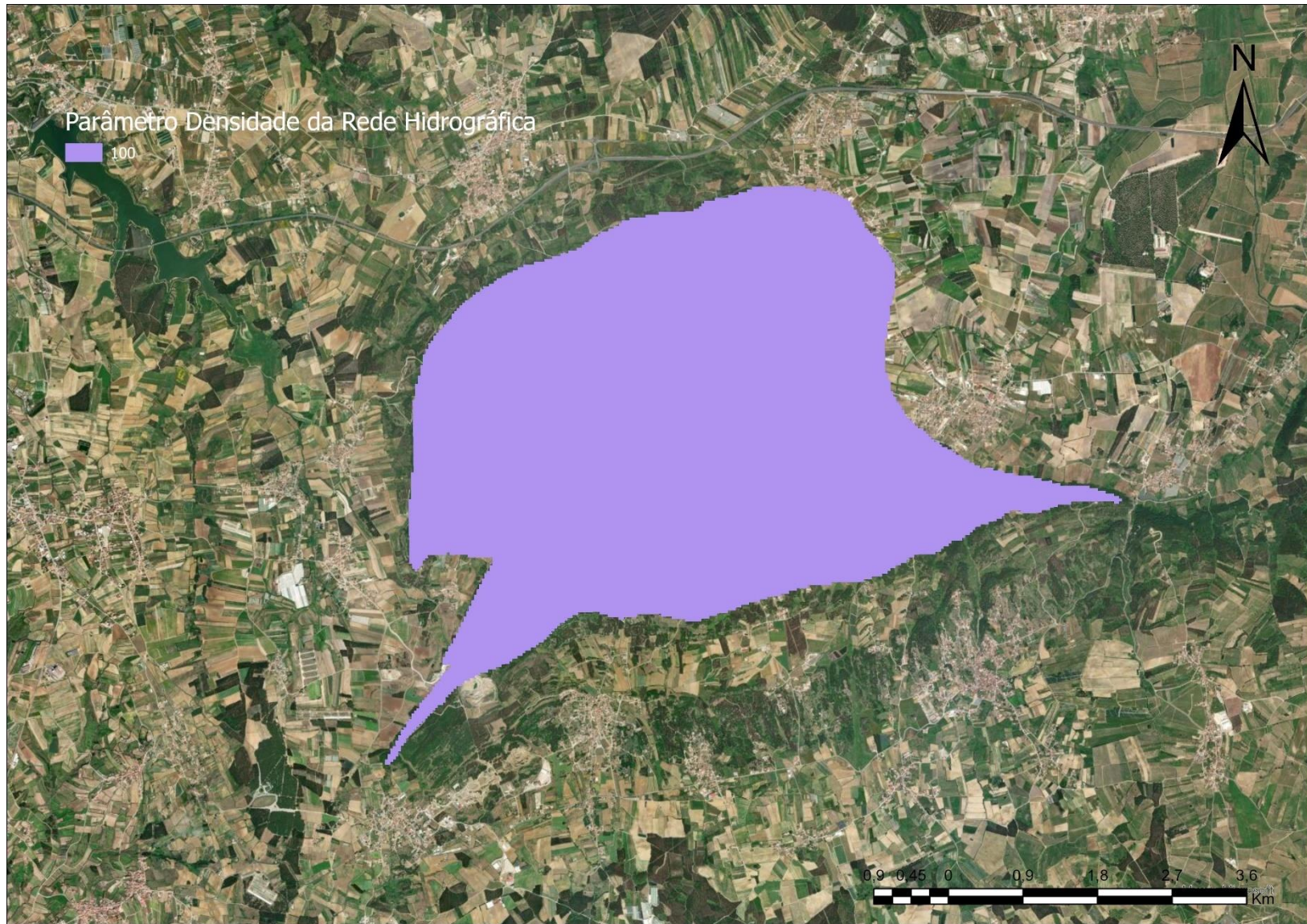


Figura A.0-6 - Parâmetro Densidade da Rede Hidrográfica do Sistema Aquífero da Cesareda para IPI.

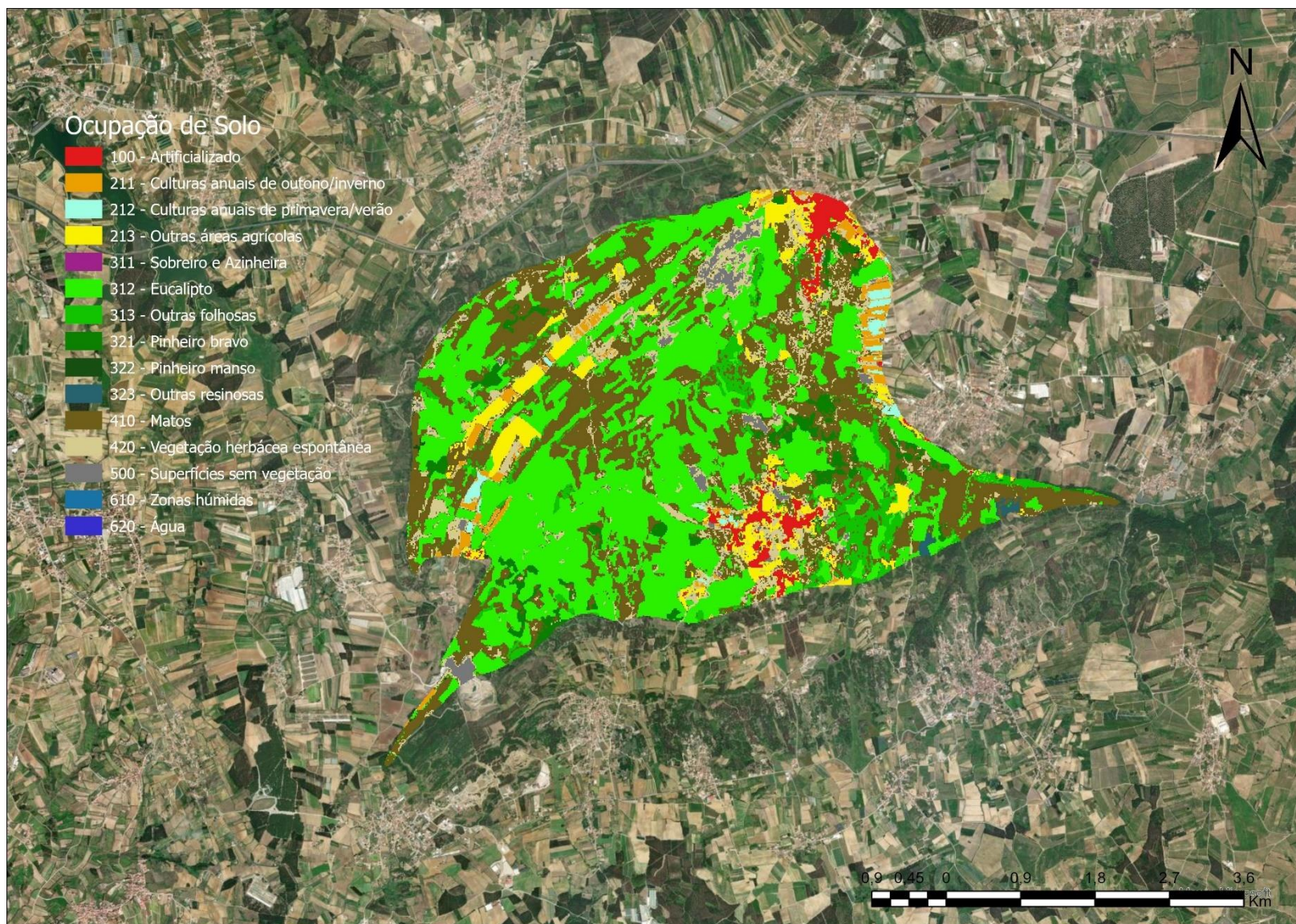


Figura A.0-7 - Ocupação de Solo da Região do Sistema Aquífero da Cesareda.

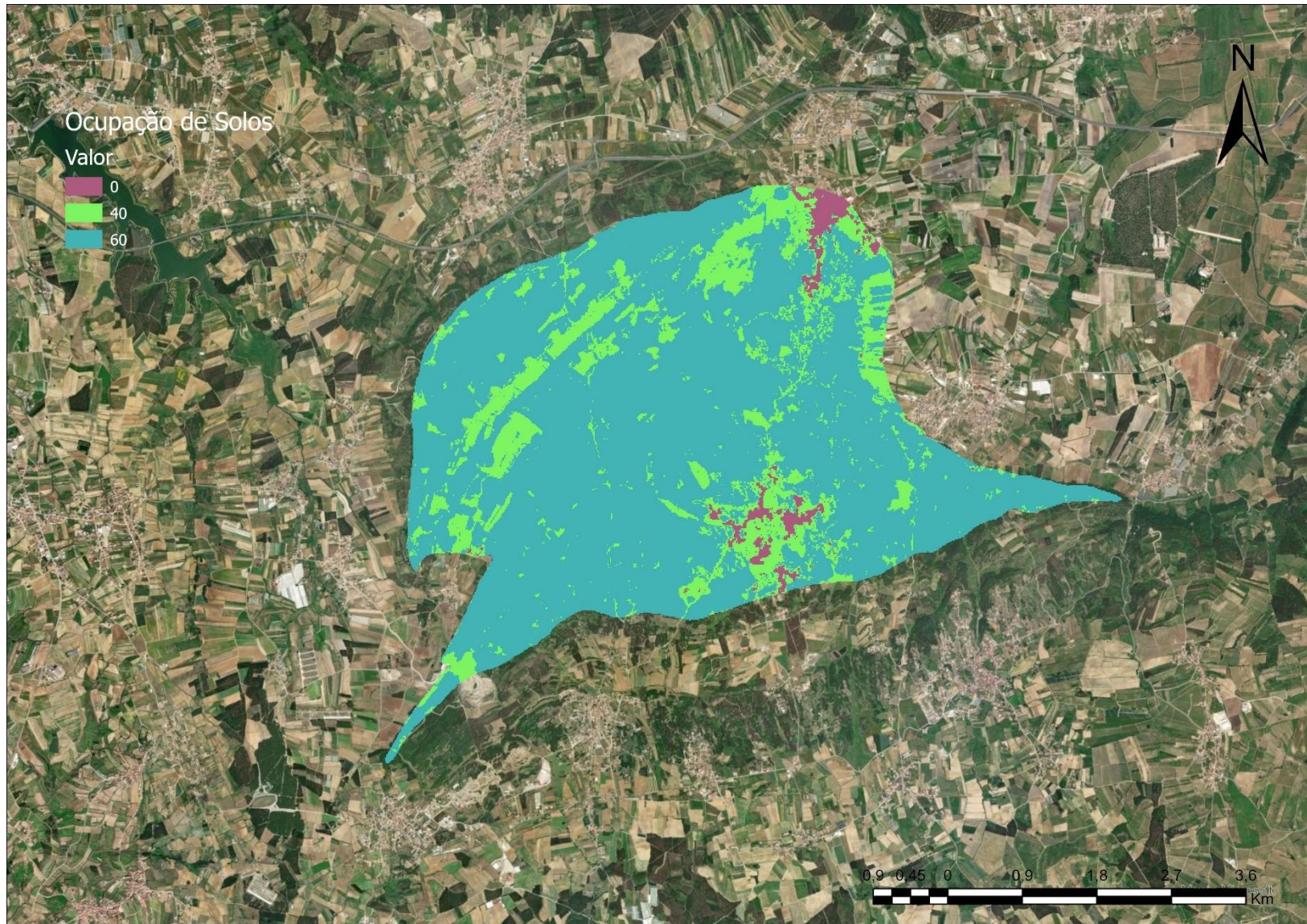


Figura A.0-8 - Parâmetro Ocupação de Solos do Sistema Aquífero da Cesareda para IPI.

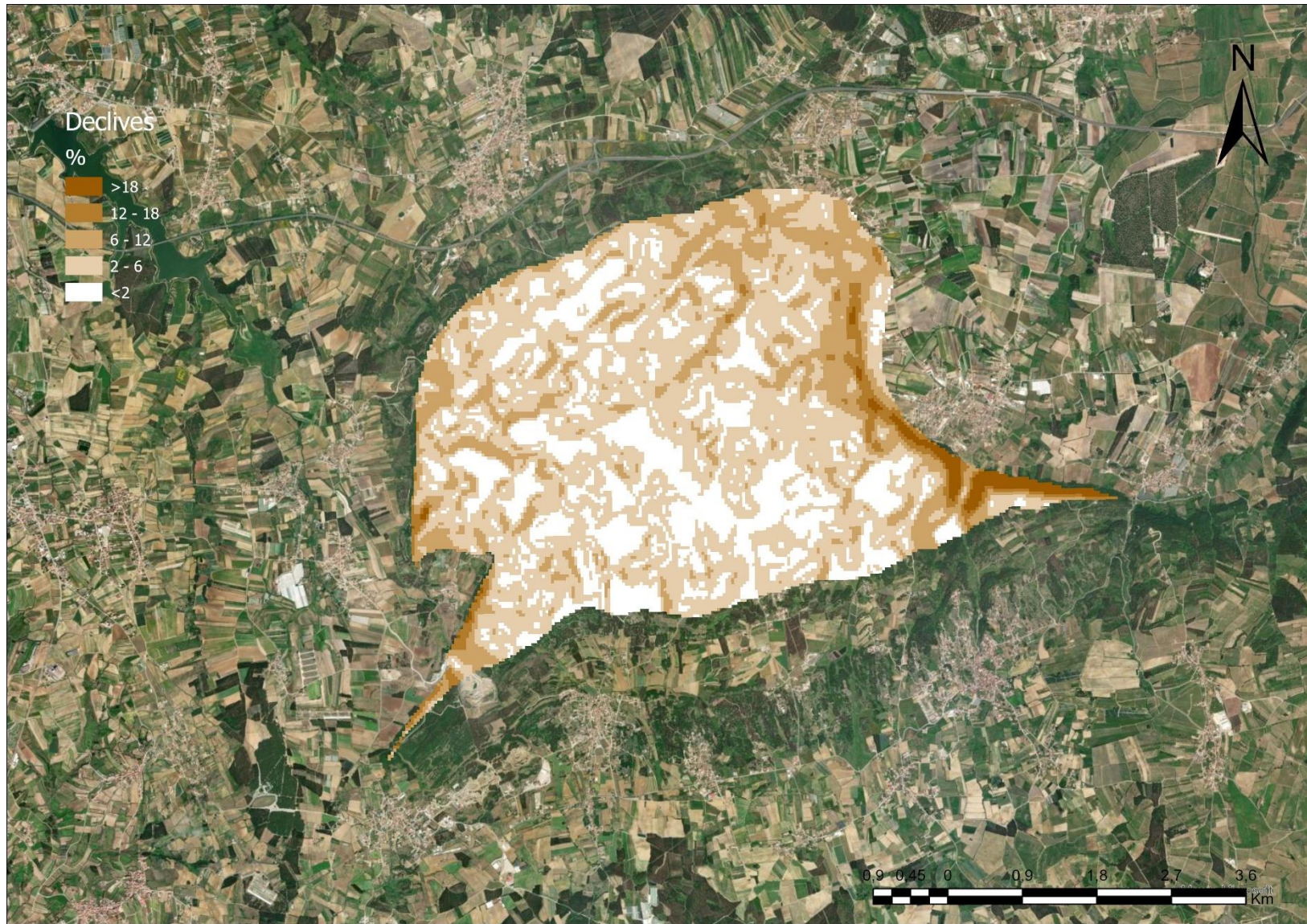


Figura A.0-9 - Declives do Sistema Aquífero da Cesareda.

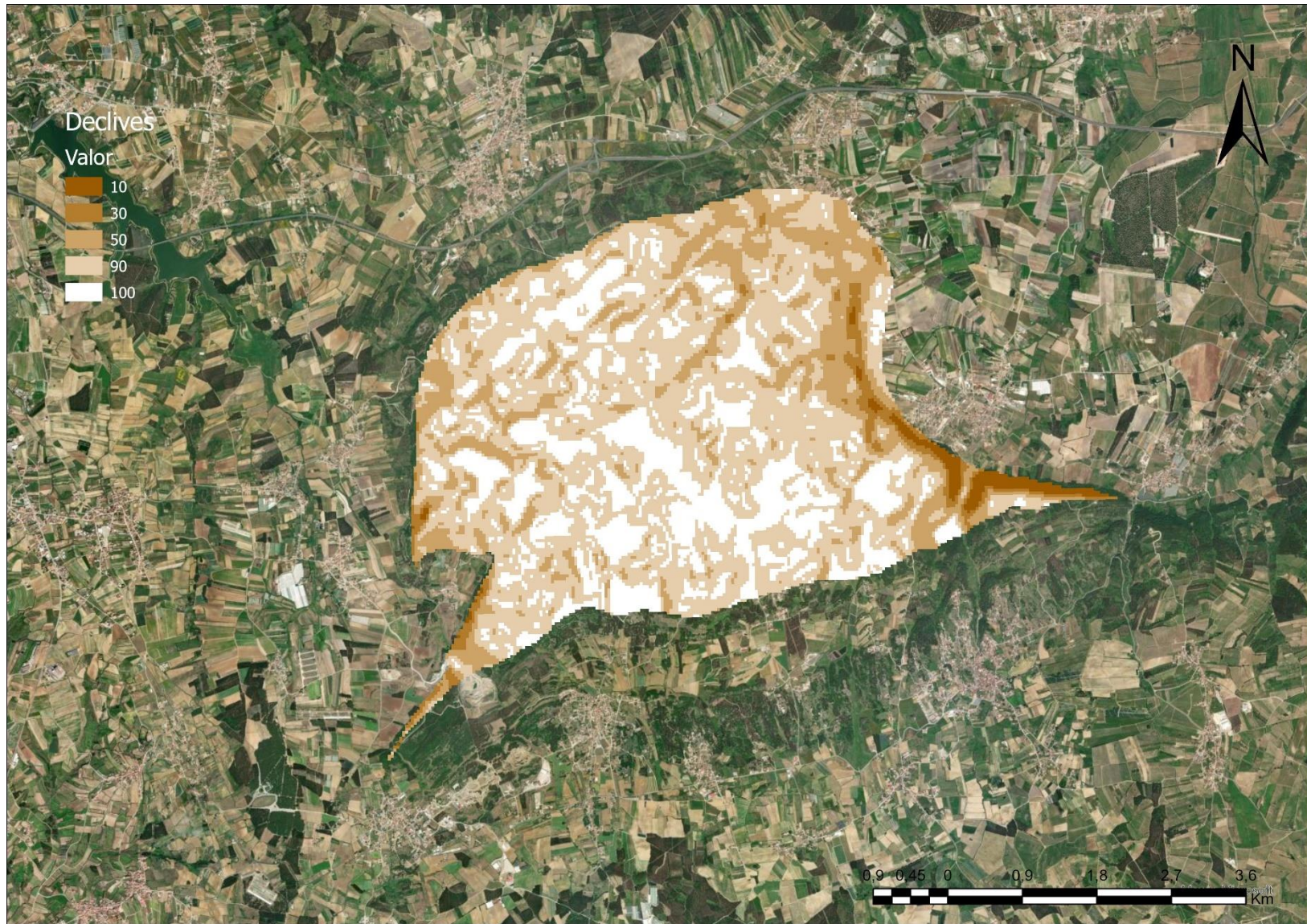


Figura A.0-10 - Parâmetro Declive do Sistema Aquífero da Cesareda para IPI.

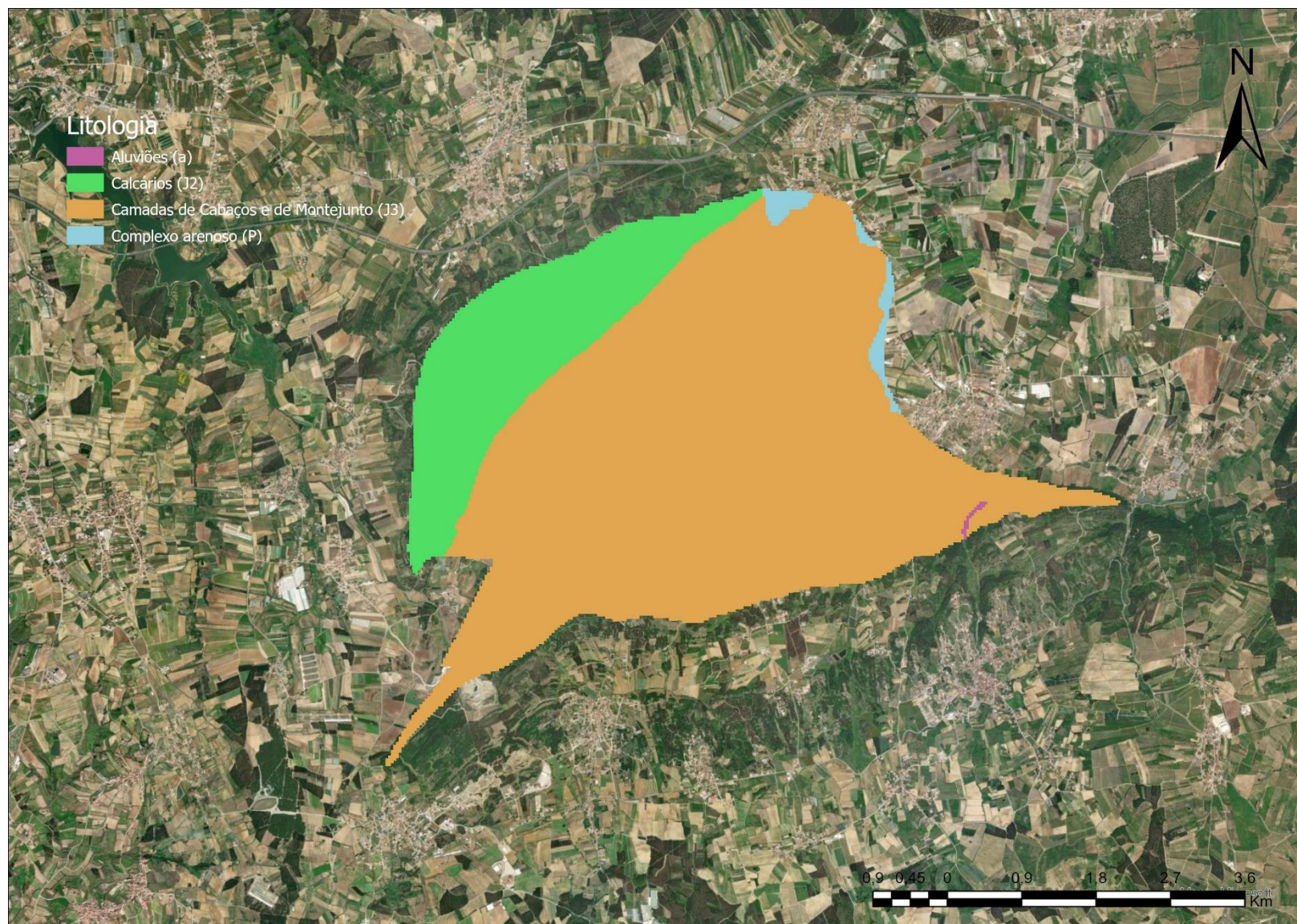


Figura A.0-11 - Litologia do Sistema Aquífero da Cesareda.

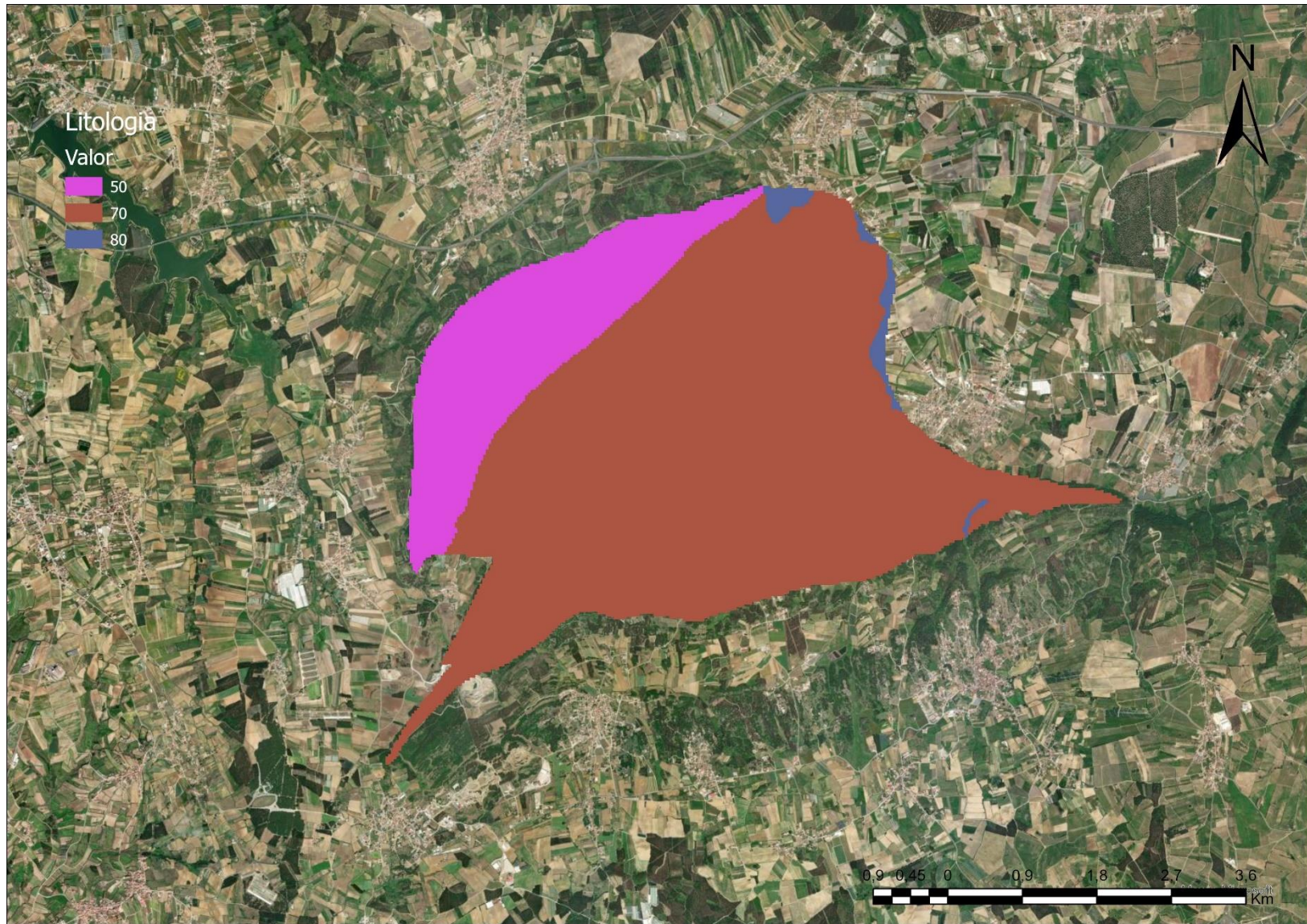


Figura A.0-12 - Parâmetro Litologia do Sistema Aquífero da Cesareda para IPI.

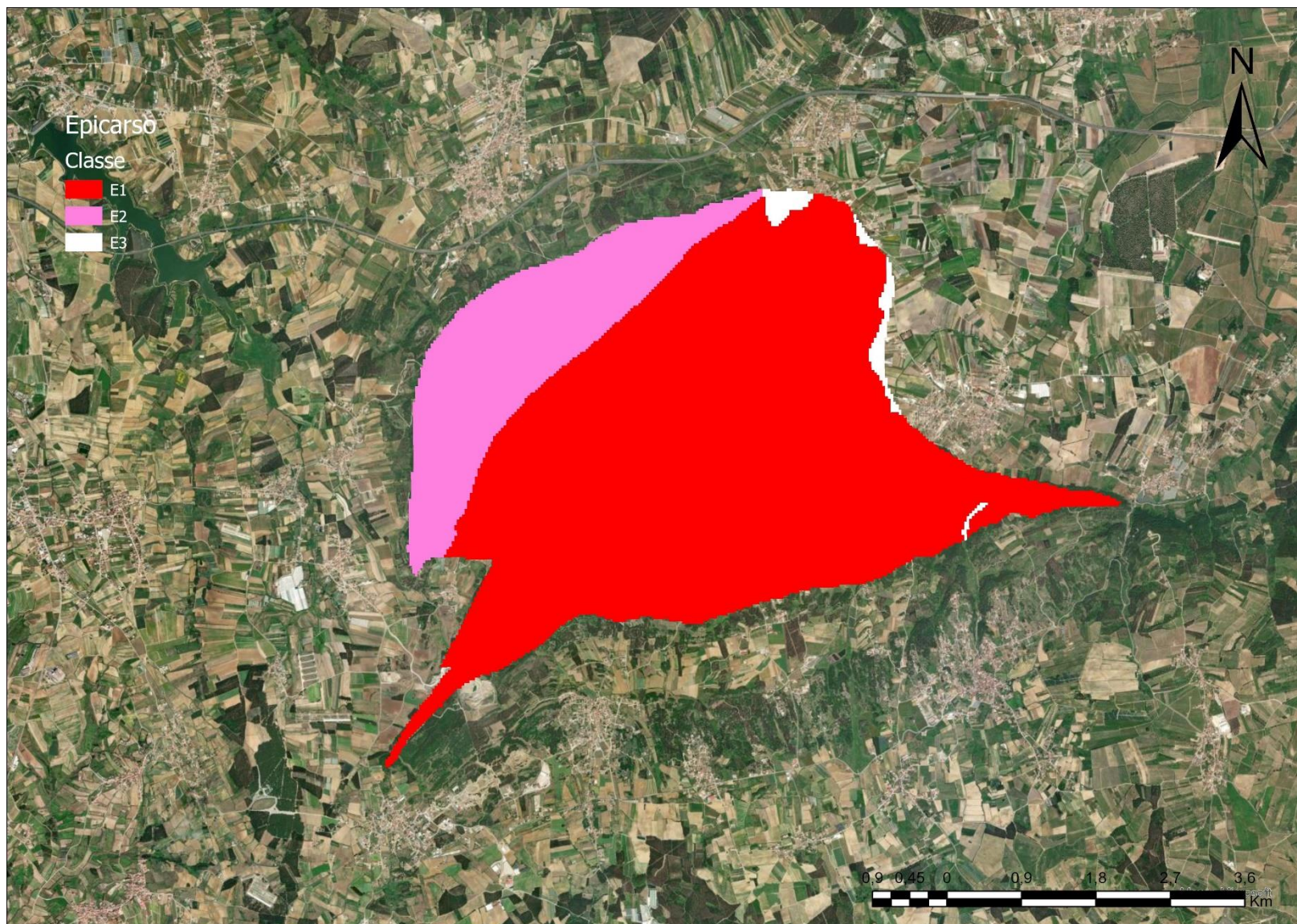


Figura A.0-13 - Epicarso do Sistema Aquífero da Cesareda.

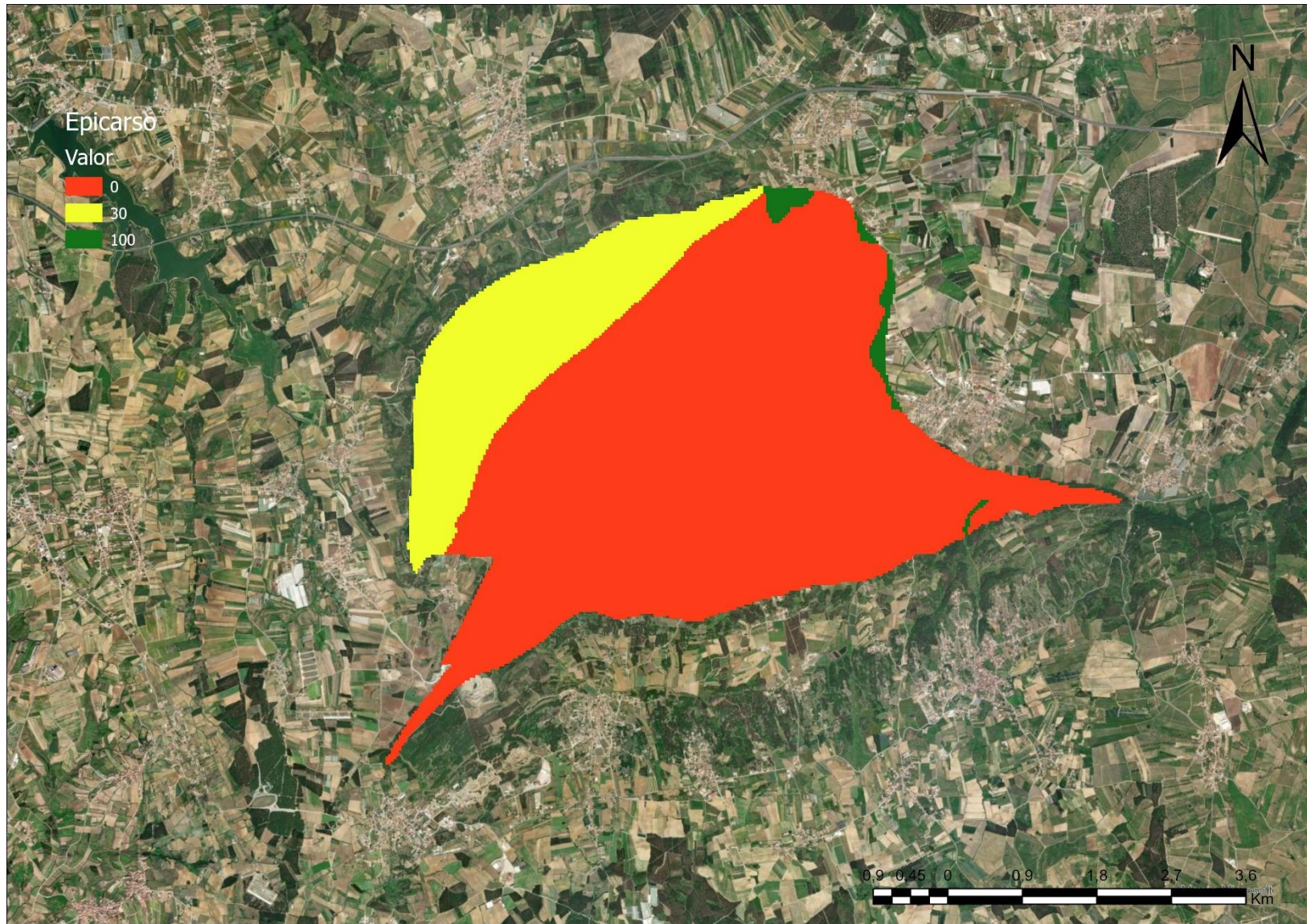


Figura A.0-14 - Parâmetro Epicarso do Sistema Aquífero da Cesareda para IPI.

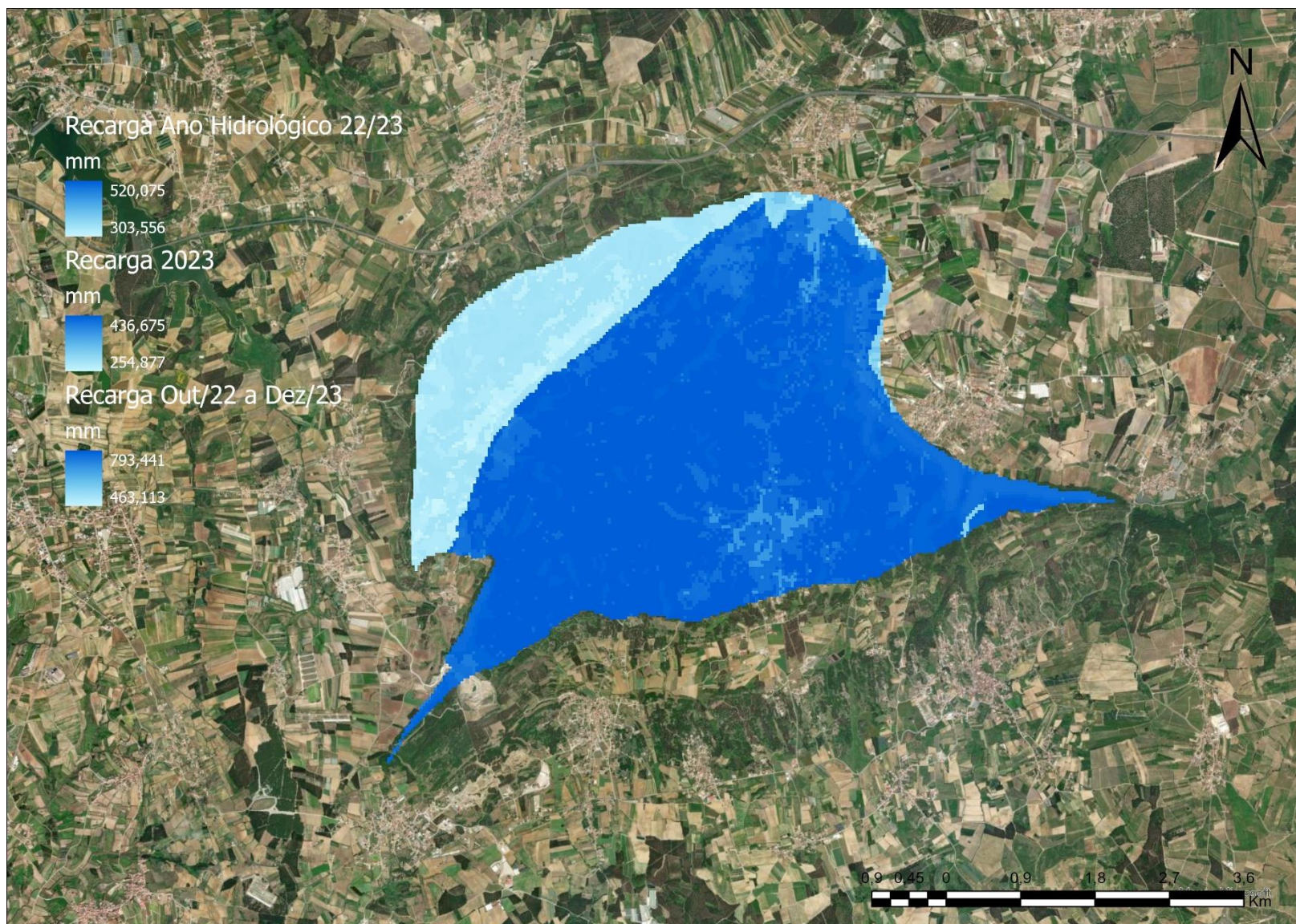


Figura A.0-15 - Recarga do sistema para o ano hidrológico 22/23, para o ano de 2023 e entre Outubro de 22 e Dezembro de 2023.

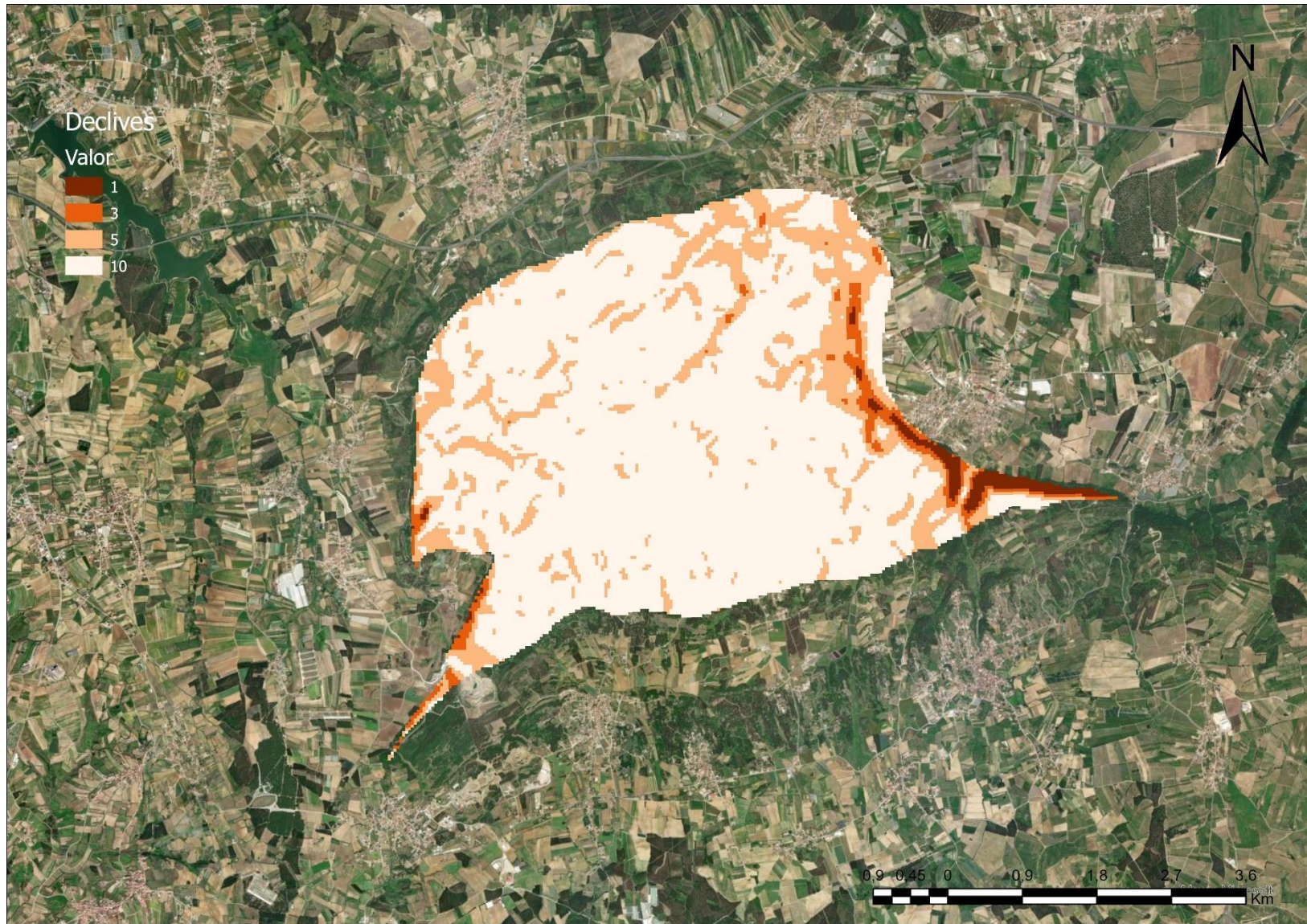


Figura A.0-16 - Parâmetro Declive do Sistema Aquífero da Cesareda para IREF.

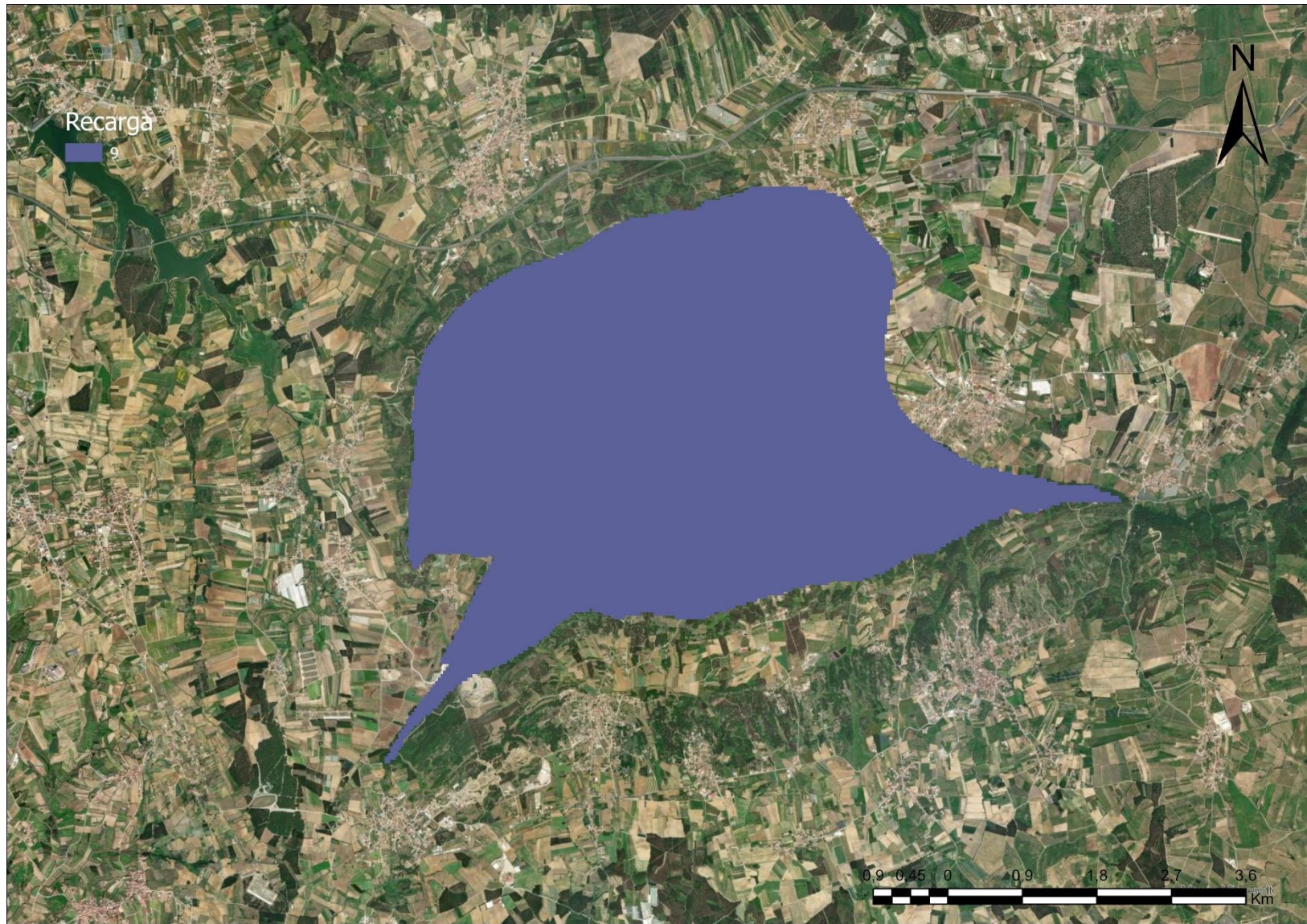


Figura A.0-17 - Parâmetro Recarga Potencial do Sistema Aquífero da Cesareda para IREF.

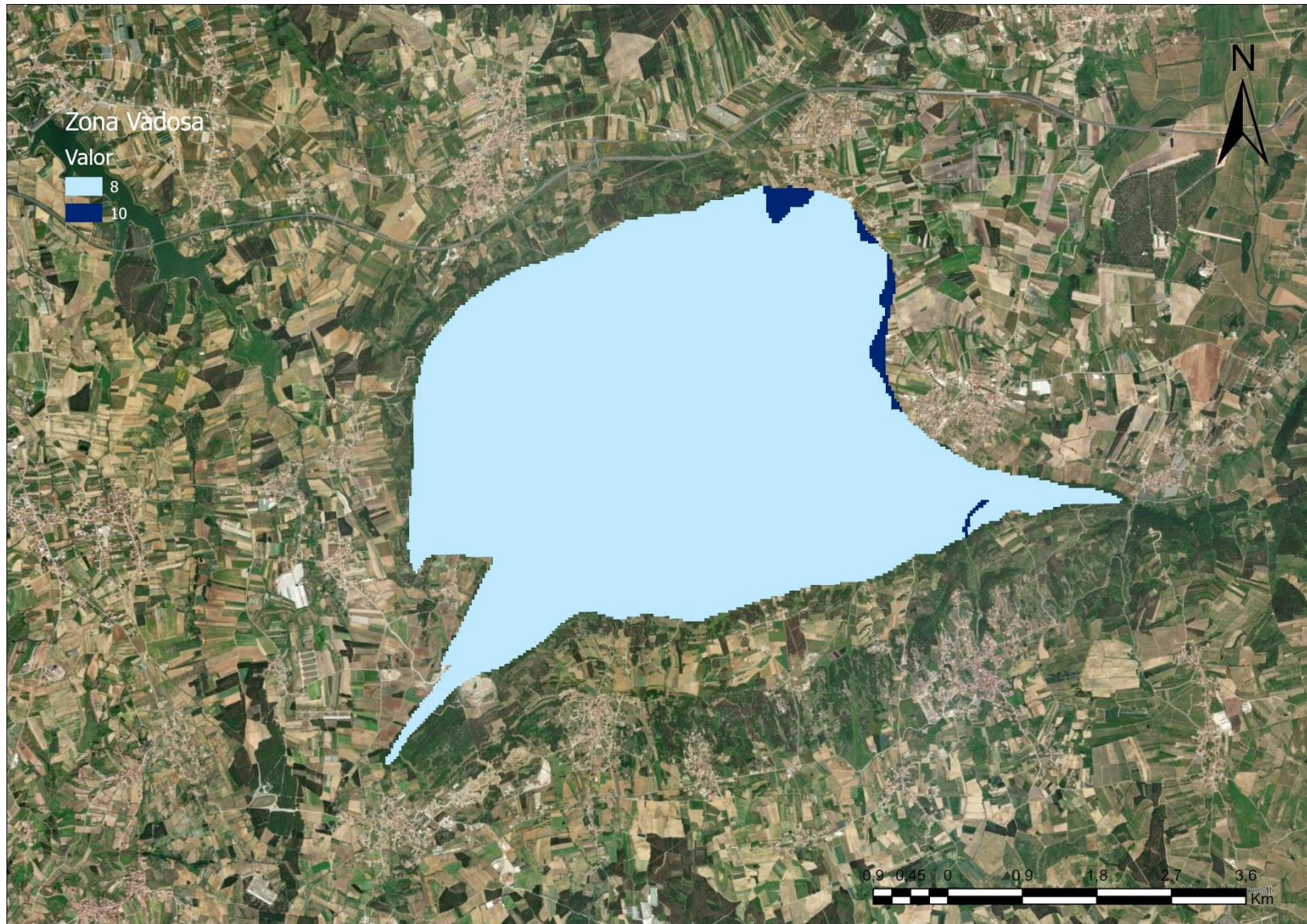


Figura A.0-18 - Parâmetro Zona Vadosa do Sistema Aquífero da Cesareda para IREF.

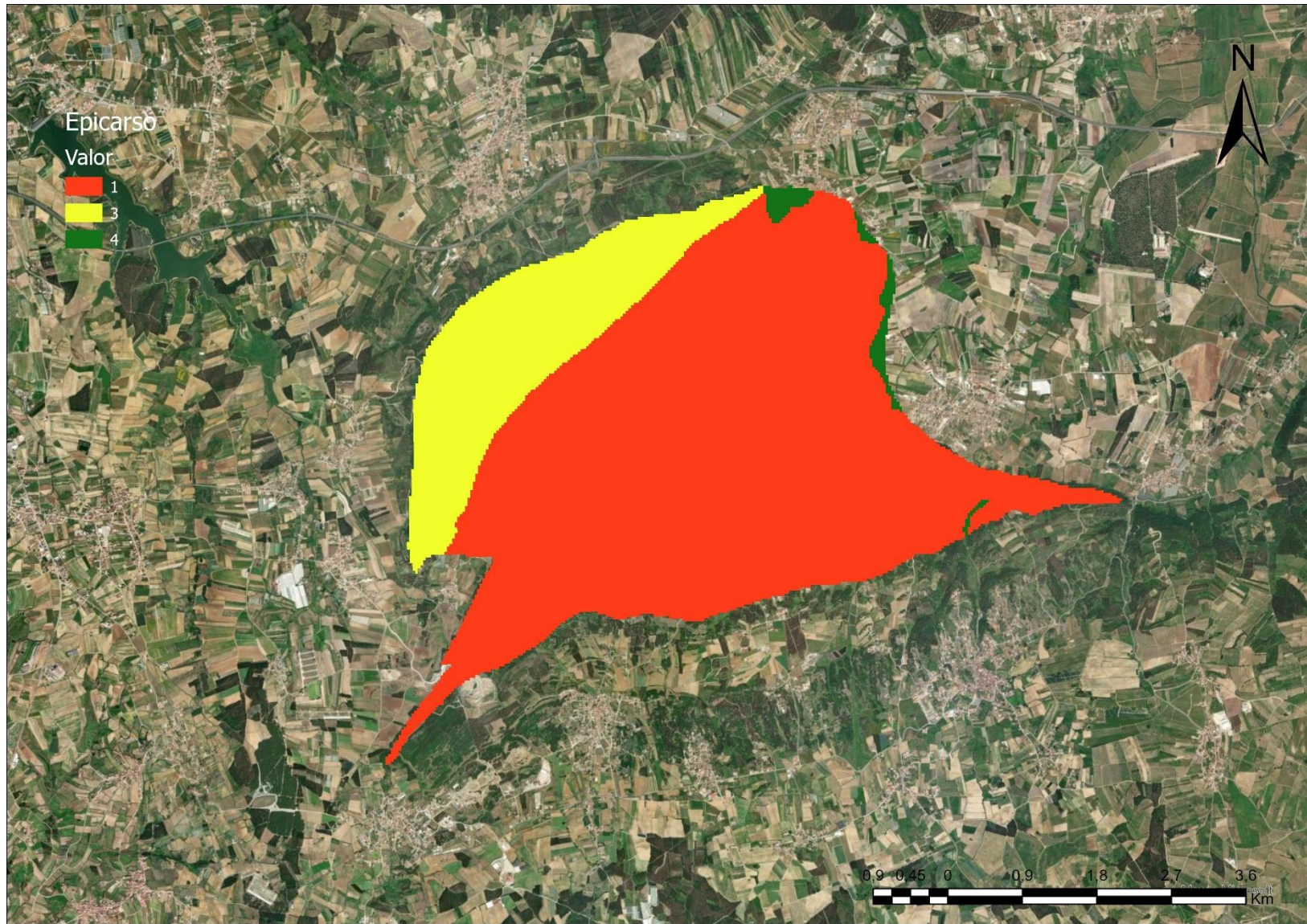


Figura A.0-19 - Parâmetro Epicarso do Sistema Aquífero da Cesareda para EPIK.

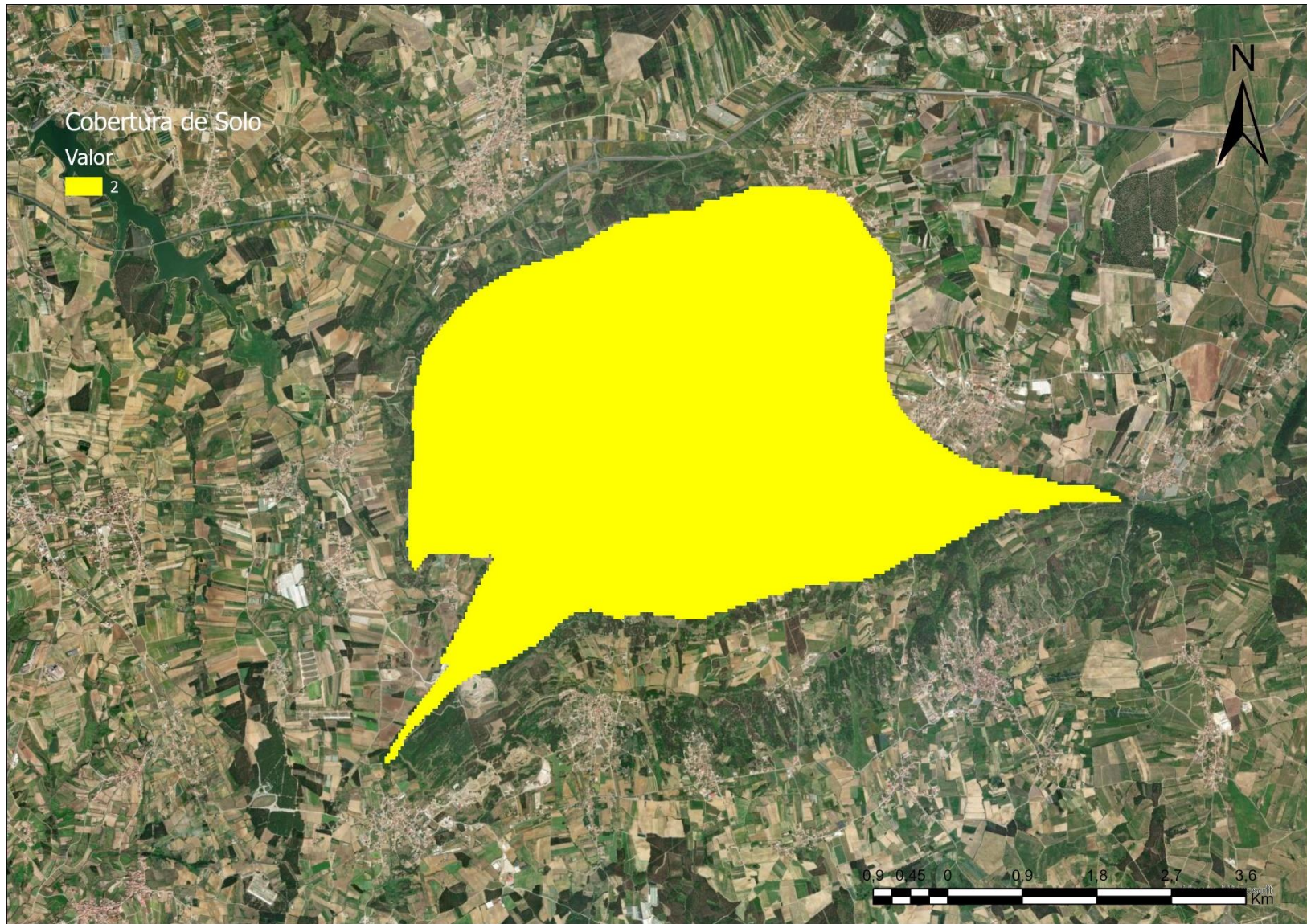


Figura A.0-20 - Parâmetro Cobertura de Solo do Sistema Aquífero da Cesareda para EPIK.

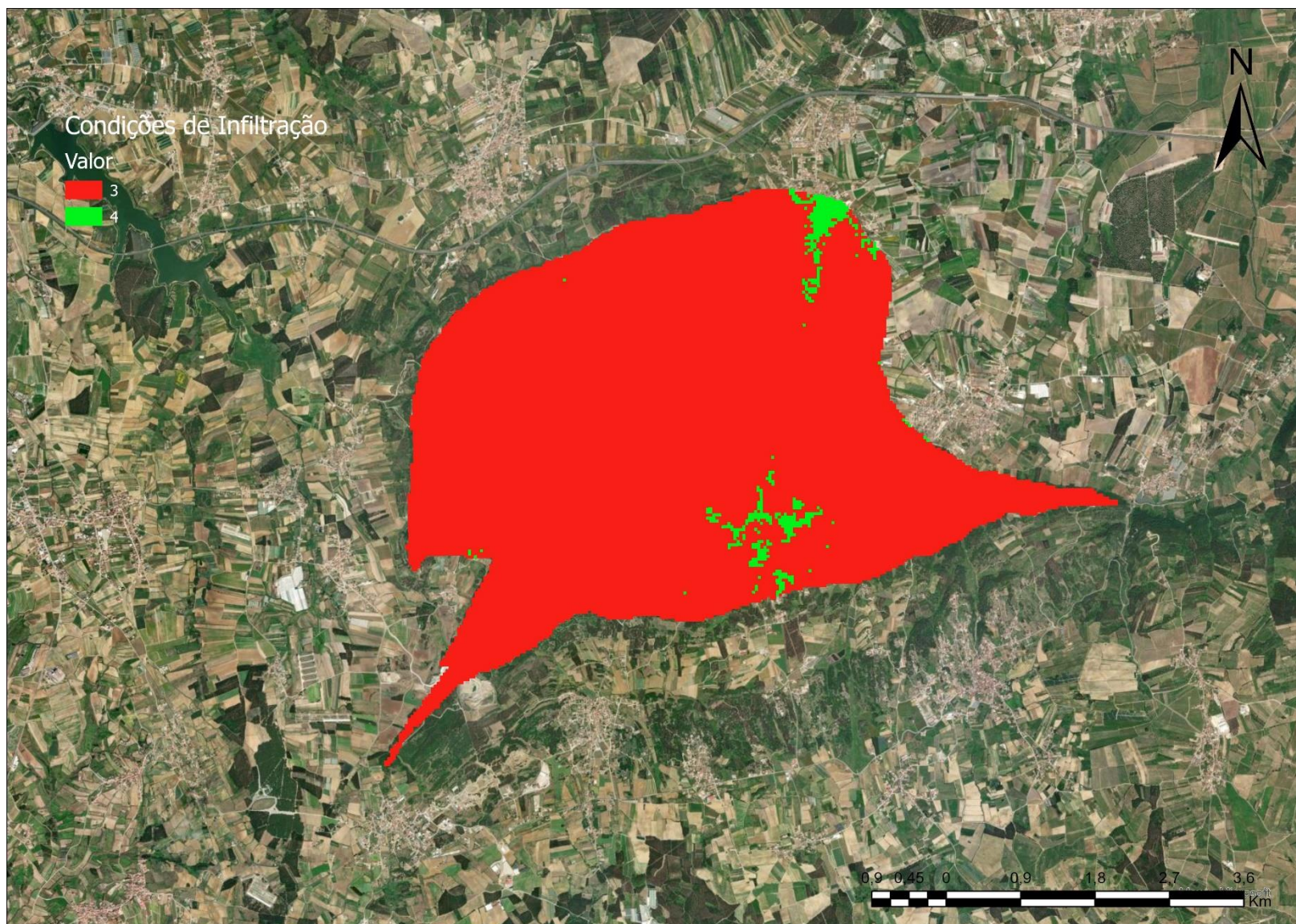


Figura A.0-21 - Parâmetro Condições de Infiltração do Sistema Aquífero da Cesareda para EPIK.

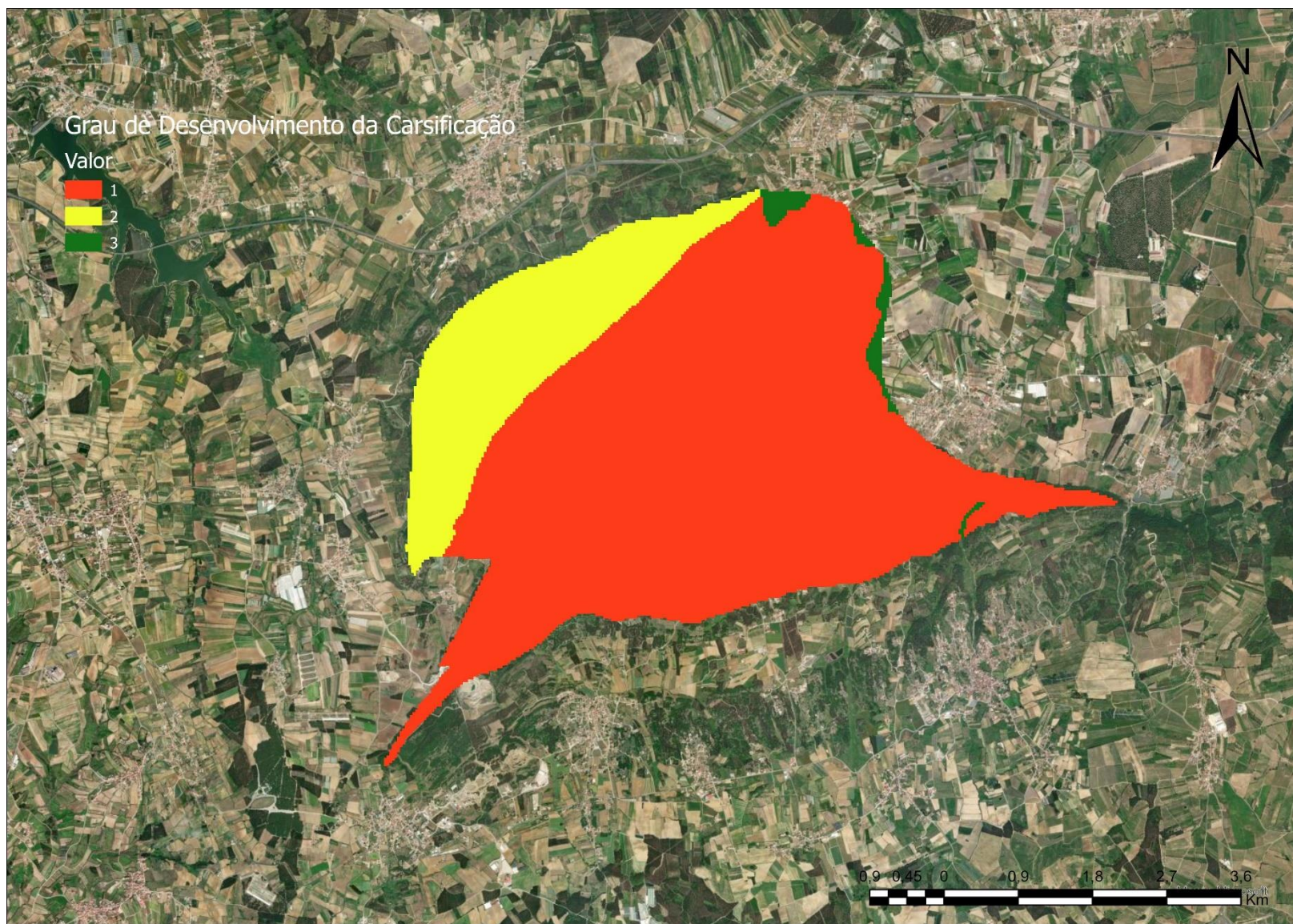


Figura A.0-22 - Parâmetro Grau de Desenvolvimento da Carsificação do Sistema Aquífero da Cesareda para EPIK.