



# **Mapeamento do carbono armazenado nos solos da bacia hidrográfica do rio Sabor, NE Portugal**

**Matheus Bueno Patrício**

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para  
obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental*

Orientado por

**Professora Doutora Felícia Maria da Silva Fonseca**

**Professor Doutor Tomás D'Aquino Freitas Rosa de Figueiredo**

**Professor Doutor Paulo Agenor Alves Bueno**

**Bragança**

**2018**



## **Mapeamento do carbono armazenado nos solos da bacia hidrográfica do rio Sabor, NE Portugal**

**Matheus Bueno Patrício**

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para o efeito da obtenção de Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental por meio do acordo de dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

**Orientado por:**

**Professora Doutora Felícia Maria da Silva Fonseca**

**Professor Doutor Tomás D'Aquino Freitas Rosa de Figueiredo**

**Professor Doutor Paulo Agenor Alves Bueno**

**Bragança**

**2018**

Aos meus principais incentivadores, meus pais.

## Agradecimentos

É fácil perceber que a vida se trata de um longo caminho, pelo qual passamos e nos aventuramos para encontrar um fim. Dentro disto concluo um importante trecho que seria impossível de ter traçado sem a presença de algumas pessoas e Instituições. Dentre essas estão os seres mais importantes para que tudo fosse possível, meus pais, Laudenor e Elaine. Sou o resultado das experiências que vocês me proporcionaram durante minha vida e busco demonstrar que todo o trabalho exercido sobre a minha educação foi, e é, extremamente válido, gostaria de deixar aqui escrito o quanto eu amo vocês e o quão importante vocês são para mim. Agradeço por todo o apoio e incentivo que vocês me deram desde sempre.

Meus avós, João, Marlene, João Bueno e Cida, e meus bisavós, Manoel, Maria Siena, Jorge e Magdalena, que transbordam amor e por quem tenho muito respeito e admiração. Perto ou longe vocês são exemplos a serem seguidos, nem sempre a vida foi fácil com vocês e nem por isso desistiram de viver e percorrer vosso caminho. Vocês são a base, os pilares da construção do meu “eu”, sinto orgulho e prazer por ter os conhecidos, obrigado por esse exemplo de amor!

Meus tios, todos eles (pois neste caso são vários), que sempre serviram com uma mão amiga em momentos nos quais eu precisei. Em especial ao Tio Fábio e Tia Josilaine, que prontamente me acolheram e me ajudaram a passar pelo período inicial da universidade, sou muito grato por isso, parte deste sucesso devo ao apoio de vocês.

Algumas pessoas aparecem neste caminho de forma aleatória e ganham um espaço extremamente importante, meus amigos. Ao Pedro, que está mais para um irmão de outra mãe, pois 18 anos de amizade e companheirismo é muita coisa. A Amanda, uma amizade recente, mas que deve vir de outras vidas devido a intensidade, obrigado por me ouvir nos momentos difíceis e ajudar a dividir as *bads* do cotidiano e da universidade. A Milena, Emy, Dani e Mônica, pelos finais de semana mais divertidos em Iretama. A Débora, pela amizade tão verdadeira pela qual sou muito grato. Ao meu primo, Bruno, que me diverte no dia-a-dia e fico muito feliz em tê-lo por perto pois é

uma pessoa incrível e muito genuína. A Ana Flávia, que a amizade se mantém a mesma, independentemente da distância.

A uma importante amizade construída dentro da universidade, Camila. Obrigado por me suportar e ajudar nos momentos mais complicado, a cumplicidade e companheirismo nestes últimos cinco anos. Aos amigos do intercâmbio, Camila, Guilherme, Polyana, Mikel, Fernanda e Leonardo. Sair da zona de conforto não é nada fácil, vir para outro país é muito além disso, é tudo ainda mais complicado. Vocês são minha família Brigantina, são as risadas durante os cafés, a rodinha na balada, os companheiros de viagem e caminhadas, são fotógrafos, são psicólogos e baixos, vou sentir saudade de vocês.

Aos meus professores da UTFPR e IPB e às instituições em si, em especial à Sônia, Felícia, Tomás e Paulo, professores e orientadores que me ajudaram nos meus primeiros passos dentro do caminho científico, que por muitas vezes confiaram em mim e me deram oportunidades muito importantes.

## RESUMO

As atividades exercidas pela sociedade liberaram grande quantidade de carbono para atmosfera e atualmente começa-se a sentir os impactos causados por esta atitude, para isso busca-se definir ações que tenham como objetivo a remoção da atmosfera de compostos ricos em carbono. Portanto é importante ter conhecimento dos fluxos do carbono e quais são os locais e quais características estes devem ter para favorecer o armazenamento de carbono. Compreendendo a importância da remoção de carbono da atmosfera, o presente trabalho busca estudar o carbono orgânico presente nos solos da bacia do Alto rio Sabor, NE Portugal e as relações que este estabelece com componentes da paisagem. A bacia do alto rio Sabor possui 30 645,6 ha, uma parte deste território compreende uma parcela do Parque Natural de Montesinho e outras freguesias do distrito de Bragança, Portugal. É um local com macroclima continental, com temperaturas variando entre 8,5°C e 12,8 °C. Aleatoriamente definiu-se 25 unidades primárias de amostragem a contar de uma grade de 1000x1000 m no sistema de coordenadas geográficas WGS 1984 UTM 29 N. Dentro das unidades primárias delimitou-se as unidades secundárias, com 200x200 m, posicionadas nos cantos e centro de cada unidade primária. No centro de cada SU, colheram-se amostras de solo nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. Nas mesmas profundidades, colheram-se amostras de solo não perturbadas, de 100 cm<sup>3</sup>, para determinação da densidade aparente. Primeiramente, as amostras de solo foram secas ao ar, crivadas para determinação das frações terra fina e elementos grosseiros e analisadas quanto à concentração de carbono por combustão seca e assim utilizou-se uma equação para determinar a quantidade de carbono orgânico no solo por unidade de área. Testou-se a normalidade dos dados obtidos e realizou-se comparações entre a quantidade de carbono amostrado com características do ambiente, altitude, declive por meio do teste de regressão, e determinou-se a existência de diferenças significativas entre os usos da terra e tipos de solo. Efetuou-se o teste de regressão linear múltipla em diferentes modelos para determinar a interferência das variáveis ambientais de modo simultâneo sobre a quantidade de carbono presente no solo. A partir das equações obtidas no teste de regressão modelou-se a distribuição do carbono para todo o território. A partir dos resultados obtidos por meio das análises laboratoriais conclui-se que o carbono se encontra em maior densidade na região norte da Bacia do Alto rio Sabor, isto advém da interferência das variáveis ambientais, pois nesta área encontra-se os sítios mais altos e com usos que não propiciam a perda do carbono presente no solo, portanto percebe-se que o armazenamento de carbono no solo é amplamente afetado pelas variáveis ambientais. A partir disto observou-se que a altitude influencia significativamente a quantidade de carbono presente no solo. Os resultados obtidos por meio da modelação estatística utilizando a equação linear mostram-se insensíveis ao decaimento de biomassa quando se tem altitudes superiores a 1200 m. Notou-se que áreas de menor declive são onde há a maior concentração de carbono no solo, porém estas áreas não possuem quantidade de carbono significativamente diferente de áreas com declive mais acentuado, essa variável afeta significativamente apenas a camada mais profunda, de 20 a 30 cm, entre as analisadas. Dentre os usos da terra os matos são os que possuem a maior quantidade média de carbono armazenado, sendo que nas três primeiras camadas este mostra-se significativamente superior as áreas agrícolas. As pastagens possuem a tendência de armazenamento do carbono em camadas mais profunda do solo. Ao comparar a quantidade de carbono armazenado em cada camada de profundidade dos diferentes usos observou-se existe diferenças significativa entre as três primeiras camadas, de 0 a 20 cm. Amostrou-se dez diferentes solos, dentre estes o Leptosolos úmbricos de granitos e os de xistos são os que possuem as maiores quantidades média de carbono armazenado, em alguns casos estes

foram superiores significativamente a outros tipos de solo. Os modelos lineares multivariados construídos possuem valores de  $r^2$  superior a 0,419, sendo que o modelo para profundidade total possui um  $r^2$  de 0,529. Portanto as variáveis utilizadas nestes modelos estatísticos são componentes da paisagem e tipos em macro escala e explicam parte da distribuição do carbono armazenado no solo, e para maior exatidão da compressão dessa distribuição existe a necessidade da observação dos componentes da microescala, como microbiota e característica da biomassa. Observa-se também a necessidade de validação e calibração dos resultados obtidos por este método de modelação e para assim aferir com maior precisão a densidade de carbono presente na bacia do Alto rio Sabor. Portanto, percebe-se que existe uma grande influência do uso da terra e da altitude sobre o armazenamento de carbono no solo, pois a distribuição desse é mais dependente destas duas características do que do tipo de solo e declive.

**Palavras-chave:** *Stock* de carbono, Mitigação, Mudanças climáticas.

## ABSTRACT

The activities carried out by the society released large amounts of carbon to the atmosphere and are now beginning to feel the impacts caused by this attitude, for this it is sought to define actions that aim to remove the atmosphere of compounds rich in carbon. Therefore, it is important to be aware of the carbon fluxes and what are the locations and what characteristics they should have to favor carbon storage. Understanding the importance of carbon removal from the atmosphere, the present work seeks to study the organic carbon present in the soils of the Alto Sabor river basin, NE Portugal and the relationships it establishes with landscape components. The Alto Sabor river basin has 30 645.6 ha, a part of this territory comprises a portion of the Natural Park of Montesinho and other parishes of the district of Bragança, Portugal. It is a place with continental macroclimate, with temperatures varying between 8,5°C and 12,8°C. 25 primary sampling units were randomly defined from a 1000x1000 m grid in the WGS 1984 UTM 29 N geographic coordinate system. Within the primary units, the 200x200 m secondary units were delimited in the corners and center of each primary unit. At the center of each SU, soil samples were collected in layers 0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm. At the same depths, undisturbed soil samples of 100 cm<sup>3</sup> were collected for determination of bulk density. Firstly, the soil samples were air-dried, sieved to determine the fine earth fractions and coarse elements and analyzed for carbon concentration by dry combustion, and an equation was used to determine the amount of soil organic carbon per unit of area. The normality of the obtained data was tested and comparisons were made between the amount of carbon sampled with environmental characteristics, altitude, slope by means of the regression test, and it was determined the existence of significant differences between land uses and types of soil. The multiple linear regression test was performed in different models to determine the interference of the environmental variables simultaneously on the amount of carbon present in the soil. From the equations obtained in the regression test the carbon distribution for the whole territory was modeled. From the results obtained through the laboratory analysis it is concluded that carbon is in higher density in the northern region of the Upper Sabor river basin, this is due to the interference of the environmental variables, since in this area are the highest sites and with uses that do not allow the loss of the carbon present in the soil, therefore it is perceived that the carbon storage in the soil is largely affected by the environmental variables. From this it was observed that the altitude significantly influences the amount of carbon present in the soil. The results obtained through the statistical modeling using the linear equation are insensitive to the biomass decay when there are altitudes above 1200 m. It was noted that areas of lower slope are where there is the highest concentration of carbon in the soil, but these areas do not have significantly different amounts of carbon from areas with a steeper slope, this variable only affects the deepest layer, from 20 to 30 cm, among those analyzed. Among the land uses, the woods have the highest average amount of carbon stored, and in the first three layers this area is significantly higher than the agricultural areas. Grasslands tend to store the carbon in layers deeper than the soil. When comparing the amount of carbon stored in each depth layer of the different uses it was observed that there are significant differences between the first three layers, from 0 to 20 cm. Ten different soils were sampled, among them the granite Leptosols of granites and those of schists are the ones with the highest average amounts of stored carbon, in some cases these were significantly higher than other types of soil. The multivariate linear models constructed have values of  $r^2$  higher than 0,419, and the total depth model has a  $r^2$  of

0,529. Therefore, the variables used in these statistical models are components of the landscape and are taken in macro scale and explain part of the distribution of the carbon stored in the soil, and for greater accuracy of the compression of this distribution there is a need to observe the components of the microscale, such as microbiota and characteristic of the biomass. It is also observed the need for validation and calibration of the results obtained by this modeling method and to ascertain with greater precision the carbon density present in the Alto Sabor basin. Therefore, it is noticed that there is a great influence of land use and altitude on the storage of carbon in the soil since the distribution of this one is more dependent on these two characteristics than on the type of soil and slope.

**Key-words:** Carbon stock, Mitigation, Climate change.

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> - Ciclo terrestre do carbono. Fonte: Robert (2006). .....	4
<b>Figura 2</b> - Locais de amostragem de solo, unidades primárias e secundárias, da bacia do alto rio Sabor. ....	15
<b>Figura 3</b> - Quantidade de carbono armazenado ( $t C ha^{-1}$ ) nas diferentes profundidades do solo. ....	21
<b>Figura 4</b> - Frequência relativa e acumulada da quantidade de carbono ( $t C ha^{-1}$ ) para a camada 0- 5 cm de profundidade. ....	23
<b>Figura 5</b> - Quantidade de carbono armazenada ( $t C ha^{-1}$ ) na profundidade 0-5 cm. ....	23
<b>Figura 6</b> - Frequência relativa e acumulada da quantidade de carbono ( $t C ha^{-1}$ ) na profundidade 5-10 cm. ....	24
<b>Figura 7</b> - Quantidade de carbono armazenada ( $t C ha^{-1}$ ) na profundidade 5-10 cm. ....	25
<b>Figura 8</b> - Frequência relativa e acumulada da quantidade de carbono ( $t C ha^{-1}$ ) na profundidade 10-20 cm. ....	26
<b>Figura 9</b> - Quantidade de carbono armazenada ( $t C ha^{-1}$ ) na profundidade 10-20 cm. ....	26
<b>Figura 10</b> - Frequência relativa e acumulada da quantidade de carbono ( $t C ha^{-1}$ ) na profundidade 20-30 cm. ....	27
<b>Figura 11</b> - Quantidade de carbono ( $t C ha^{-1}$ ) na profundidade 20-30 cm. ....	28
<b>Figura 12</b> - Frequência relativa e acumulada da quantidade de carbono total (0-30 cm) armazenada no solo ( $t C ha^{-1}$ ). ....	29
<b>Figura 13</b> - Quantidade de carbono total ( $t C ha^{-1}$ ) armazenada na profundidade 0-30 cm. ....	29
<b>Figura 14</b> - Carta de Altitudes da bacia do Alto Rio Sabor. ....	30
<b>Figura 15</b> - Quantidade média de carbono ( $t C ha^{-1}$ ) para as diferentes profundidades do solo e intervalos de altitude. Para a mesma camada, letras diferentes indicam diferenças significativas entre intervalos de altitude. ....	31
<b>Figura 16</b> - Regressão entre a altitude e a quantidade de carbono no solo para as diferentes profundidades, 0-5 (A), 5-10 (B), 10-20 (C) e 20-30 cm (D). ....	33
<b>Figura 17</b> - Regressão entre a altitude e a quantidade de carbono no solo para camada total (0-30 cm). ....	33
<b>Figura 18</b> - Distribuição do carbono presente na camada 0-30 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base na altitude. ....	34
<b>Figura 19</b> - Distribuição do carbono presente na camada 0-5 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base na altitude. ....	35
<b>Figura 20</b> - Distribuição do carbono presente na camada 5-10 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base na altitude. ....	36
<b>Figura 21</b> - Distribuição do carbono presente na camada 10-20 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base na altitude. ....	36
<b>Figura 22</b> - Distribuição do carbono presente na camada 20-30 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base na altitude. ....	37
<b>Figura 23</b> - Carta de declives (%) da bacia do alto rio Sabor. ....	39
<b>Figura 24</b> - Quantidade média de carbono ( $t C ha^{-1}$ ) para as diferentes profundidades do solo e classes de declive. Para a mesma camada, letras diferentes indicam diferenças significativas entre intervalos de declive. ....	40

<b>Figura 25</b> - Regressão entre o declive e a quantidade de carbono no solo para as diferentes profundidades, 0-5 (A), 5-10 (B), 10-20 (C) e 20-30 cm (D). .....	41
<b>Figura 26</b> - Regressão entre o declive e a quantidade de carbono no solo para 0-30 cm de profundidade .....	42
<b>Figura 27</b> - Distribuição do carbono presente na camada 0-30 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base no declive. ....	43
<b>Figura 28</b> - Distribuição do carbono presente na camada 0-5 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base no declive. ....	44
<b>Figura 29</b> - Distribuição do carbono presente na camada 5-10 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base no declive. ....	44
<b>Figura 30</b> - Distribuição do carbono presente na camada 10-20 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base no declive. ....	45
<b>Figura 31</b> - Distribuição do carbono presente na camada 20-30 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base no declive. ....	45
<b>Figura 32</b> - Carta de Uso e Ocupação do Solo da bacia do Alto Rio Sabor, disponibilizada pela Direção Geral do Território e classificada ao segundo nível (COS, 2007). ....	47
<b>Figura 33</b> - Percentagem de coberto vegetal para os diferentes usos do solo amostrados. ....	50
<b>Figura 34</b> - Dispersão dos dados da quantidade de carbono nas profundidades 0-5 (A), 5- 10 (B), 10-20 (C) e 20-30 cm (D) em relação à percentagem de coberto vegetal determinado na área de estudo por amostragem. ....	51
<b>Figura 35</b> - Dispersão dos dados da quantidade de carbono na profundidade de 0-30 cm em relação à percentagem de coberto vegetal determinado na área de estudo por amostragem. ...	52
<b>Figura 36</b> - Carta de solos da bacia do Alto Rio Sabor. Fonte: Agroconsultores e Coba (1991). .....	53
<b>Figura 37</b> - Quantidade média de carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) para as diversas unidades solo na profundidade 0-30 cm. ....	56
<b>Figura 38</b> - Quantidade média de carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) na profundidade 0-30 cm para as diversas unidades solo. ....	57
<b>Figura 39</b> - Quantidade média de carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) na profundidade 0-5 cm para as diversas unidades solo. ....	58
<b>Figura 40</b> - Quantidade média de carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) na profundidade 5-10 cm para as diversas unidades solo. ....	58
<b>Figura 41</b> - Quantidade média de carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) na profundidade 10-20 cm para as diversas unidades solo. ....	59
<b>Figura 42</b> - Quantidade média de carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) na profundidade 20-30 cm para as diversas unidades solo. ....	59
<b>Figura 43</b> – Mapa de distribuição do carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) na camada 0-30 cm, com base nos resultados da modelação linear multivariada. ....	61
<b>Figura 44</b> - Mapa da distribuição do carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) na camada 0-5 cm, com base nos resultados da modelação linear multivariada. ....	63
<b>Figura 45</b> - Mapa da distribuição do carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) na camada 5-10 cm, com base nos resultados da modelação linear multivariada. ....	64
<b>Figura 46</b> - Mapa da distribuição do carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) na camada 10-20 cm, com base nos resultados da modelação linear multivariada. ....	66
<b>Figura 47</b> - Mapa da distribuição do carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) na camada 20-30 cm, com base nos resultados da modelação linear multivariada. ....	67

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> – Modelos com combinações aplicadas no teste de regressão linear múltipla. ....	17
<b>Tabela 2</b> – Numeração definida para o uso da terra e uso da terra correspondente conforme a Carta de ordenamento do Território 2º nível.....	18
<b>Tabela 3</b> – Numeração definida para os tipos de solo e identificação destes conforme a classificação da FAO-Unesco. ....	19
<b>Tabela 4</b> – Estatística descritiva dos resultados obtidos para o armazenamento de carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) nas diferentes profundidades. ....	22
<b>Tabela 5</b> - Resultados dos testes de regressão, ajustamento de curva, entre a quantidade de carbono no solo nas diferentes profundidades e a altitude.....	32
<b>Tabela 6</b> – Distribuição percentual do carbono no solo para as diferentes profundidades e intervalos de altitude da área de estudo.....	38
<b>Tabela 7</b> - Resultados dos testes de regressão, ajustamento de curva, entre a quantidade de carbono no solo nas diferentes profundidades e o declive do terreno. ....	40
<b>Tabela 8</b> - Estatística descritiva da quantidade de carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) para os diferentes usos da terra nas diferentes profundidades. Para a mesma camada, letras diferentes associadas à média indicam diferenças significativas entre usos da terra. ....	48
<b>Tabela 9</b> - Resultados dos testes de regressão entre a percentagem de coberto vegetal e a quantidade de carbono presente nas diferentes camadas. ....	50
<b>Tabela 10</b> - Estatística descritiva da quantidade de carbono armazenado (t C ha <sup>-1</sup> ) nas profundidades amostradas nas diversas Unidades Solo da área de estudo. Letras diferentes associadas à média indicam diferenças significativas entre unidades solo. ....	54
<b>Tabela 11</b> - Valores de r <sup>2</sup> e significância obtidos com a aplicação dos modelos de regressão linear múltipla aos dados da quantidade de carbono na camada 0-30 cm de profundidade. ....	60
<b>Tabela 12</b> - Valores de r <sup>2</sup> e significância obtidos com a aplicação dos modelos de regressão linear múltipla aos dados da quantidade de carbono na camada 0-5 cm de profundidade. ....	62
<b>Tabela 13</b> - Valores de r <sup>2</sup> e significância obtidos com a aplicação dos modelos de regressão linear múltipla aos dados da quantidade de carbono na camada 5-10 cm de profundidade. ....	63
<b>Tabela 14</b> - Valores de r <sup>2</sup> e significância obtidos com a aplicação dos modelos de regressão linear múltipla aos dados da quantidade de carbono na camada 10-20 cm de profundidade. ....	65
<b>Tabela 15</b> - Valores de r <sup>2</sup> e significância obtidos com a aplicação dos modelos de regressão linear múltipla aos dados da quantidade de carbono na camada 20-30 cm de profundidade. ....	66

## Índice geral

Agradecimentos .....	IV
RESUMO .....	VI
ABSTRACT .....	VIII
Índice de Figuras.....	X
Índice de Tabelas .....	XII
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivo Geral.....	2
1.2 Objetivos Específicos .....	3
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO.....	4
2.1 Ciclo do Carbono.....	4
2.2 Sequestro e armazenamento de carbono pelo solo.....	6
2.3 Sequestro de carbono e as mudanças climáticas.....	8
2.4 Stock de carbono como mitigação para as mudanças climáticas.....	9
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	12
3.1 Caracterização da área de estudo.....	12
3.2 Locais de amostragem e colheitas de campo .....	14
3.3 Quantificação laboratorial .....	15
3.4 Análises estatísticas .....	16
3.4.1 Regressão linear múltipla .....	17
3.4.1.1 Organização das variáveis .....	18
3.5 Modelação.....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	21
4.1 Armazenamento de Carbono no solo.....	21
4.2 Variáveis Ambientais que afetam a quantidade de carbono no solo.....	30
4.2.1 Altitude.....	30
4.2.2 Declive .....	39
4.2.3 Uso da terra .....	46
4.2.4 Solos .....	53
4.3 Modelação linear multivariada .....	60

<b>5. Conclusões .....</b>	<b>68</b>
<b>Referências.....</b>	<b>70</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O carbono encontra-se em toda a natureza, e os seus compostos são constituintes essenciais desta, sendo fundamental em processos como a fotossíntese e a regulação do clima (Martins et al., 2003; Rosa et al., 2003). Um dos compostos do carbono que recebe grande atenção por parte da ciência é o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), devido ao crescente aumento na concentração deste na atmosfera e sua possível interferência no clima global, outro importante composto é o metano ( $\text{CH}_4$ ), que é encontrado em menor concentração, mas possui um potencial para o aquecimento global 3,7 vezes superior ao do dióxido de carbono (Lashof & Ahuja, 1990).

O  $\text{CO}_2$  é responsável por aproximadamente 80% da contribuição para o aquecimento global e a sua concentração na atmosfera alcançou níveis que se estima nunca ter alcançado na história da Terra, 405 ppm (Lashof & Ahuja, 1990; Watson et al., 2001, Dlugokencky & Tans, 2017). Este aumento deve-se ao défice de absorção, ou seja, o que é emitido por meio da queima de combustíveis fósseis e outras atividades antrópicas não é absorvido na totalidade pelo meio terrestre e oceanos, resultando num balanço negativo e o  $\text{CO}_2$  se acumula na atmosfera (Pacheco & Helene, 1990). O carbono é retirado da atmosfera por meio da transferência de  $\text{CO}_2$  para os ecossistemas terrestres através do processo da fotossíntese, e para os oceanos por intermédio da dissolução do referido gás na água e por fotossíntese (Martins et al., 2003).

As maiores reservas de carbono encontram-se nos oceanos, e os solos constituem o principal reservatório nos ecossistemas terrestres, principalmente os solos das regiões frias e temperadas. A interferência do homem, neste gás, se deu de forma massiva nos últimos 200 anos, tendo contribuído para o aumento da sua transferência para a atmosfera por meio das atividades associadas à agricultura (Machado, 2005) e à queima de combustíveis fósseis, produzindo efeitos ao nível do clima global.

De modo a contribuir para a manutenção do equilíbrio do  $\text{CO}_2$  na atmosfera e reduzir os efeitos produzidos nas mudanças climáticas tem havido uma preocupação

política, destacando-se o Protocolo de Kyoto, que estabelece que a União Europeia (UE), como um todo, deve obrigatoriamente reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 8% em relação a 1990. Dentro do acordo de partilha de responsabilidade, Portugal pode aumentar as emissões em 27% em relação a 1990 (Garrana, 2011).

Nota-se a preocupação do estado Português em seguir a linha de redução de emissão de carbono, que vem sendo adotado por outros países, mesmo tendo a possibilidade de aumentá-la. Para alcançar o objetivo de redução de emissão de GEE, Portugal possui um roteiro, designado de “Roteiro Nacional de Baixo Carbono 2050”, que visa compatibilizar a competitividade económica do país com a redução da quantidade de carbono emitida (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012).

A aplicação do Roteiro Nacional de Baixo Carbono pode contribuir para a diversificação das fontes energéticas utilizadas, a redução dos gastos associados aos combustíveis fósseis, o combate às alterações climáticas, realizando um trabalho conjunto com a UE, o aumento de investimentos de recursos financeiros, tecnológicos e científicos e melhorar a qualidade de vida nas cidades. Além da preocupação com a emissão originada pelas atividades humanas, Portugal também se preocupa com a quantidade emitida pelos incêndios florestais. No ano de 2017, arderam 418 087 ha, no período de janeiro a outubro, e estima-se que foram emitidos 9,3 Mt CO<sub>2eq</sub> (Agência Portuguesa do Ambiente, 2017).

As atividades antrópicas têm vindo a libertar grandes quantidades de carbono para a atmosfera e atualmente começa-se a sentir os impactos causados por esta atitude. Neste sentido, busca-se definir ações que tenham como objetivo a remoção da atmosfera de compostos ricos em carbono, pelo que é importante conhecer os fluxos de carbono e quais são os locais e características que estes devem ter para favorecer o armazenamento de carbono.

## **1.1 Objetivo Geral**

Compreendendo a importância da remoção de carbono da atmosfera, o presente trabalho busca estudar o carbono orgânico presente nos solos da bacia do Alto rio

Sabor, NE Portugal, e as relações que este estabelece com componentes da paisagem.

## **1.2 Objetivos Específicos**

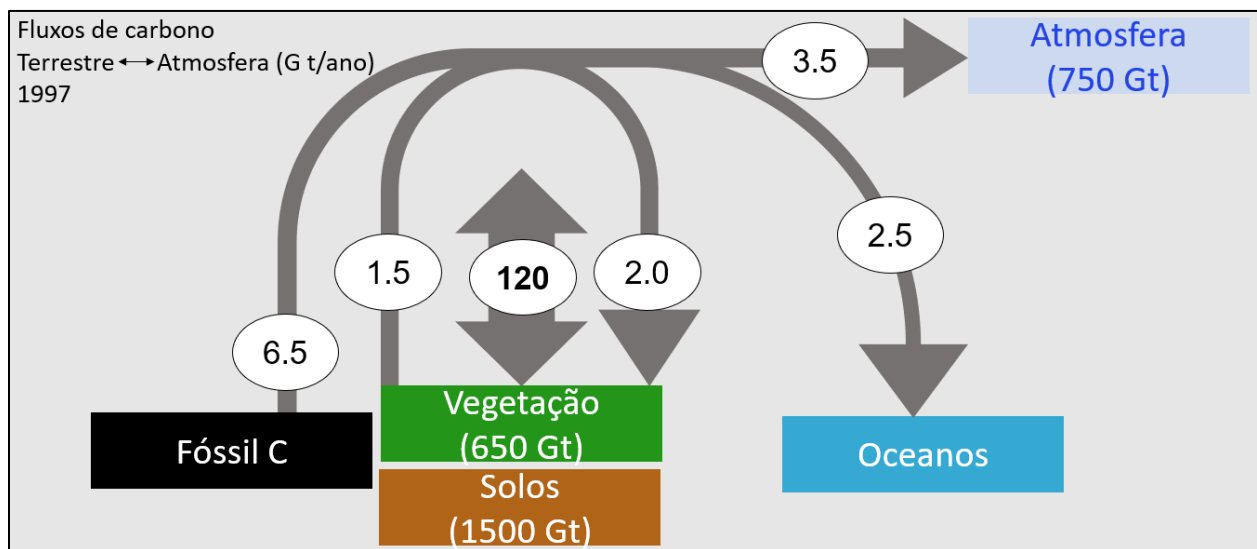
Para realização desta investigação definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- Estabelecer correlações e analisar a significância estatística entre a altitude, declive e percentual de coberto vegetal na quantidade de carbono armazenado nos solos da bacia do alto rio Sabor.
- Comparar a quantidade de carbono armazenada em solos submetidos a diferentes usos.
- Comparar a quantidade de carbono armazenado em diferentes solos.
- Realizar a modelação estatística do carbono presente em toda a área de estudo com base em equações de modelos estatísticos resultantes do teste de regressão.
- Realizar a modelação multivariada para a distribuição do carbono nos solos do território com base na altitude, declive, uso da terra e tipo de solo.

## 2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

### 2.1 Ciclo do Carbono

O ciclo global do carbono é constituído por um sistema de compartimentos, sendo estes o terrestre, o aquático e o atmosférico (Stevenson & Cole, 1999). Os oceanos, a atmosfera e a biosfera terrestre são os três reservatórios de carbono que são capazes de realizar trocas entre si (Figura 1). A transferência ocorre de maneira bastante complexa e, este processo de troca por unidade de tempo é denominado de fluxo de carbono, que ocorre devido a processos físico-bio-geo-químicos (Pacheco & Helene, 1990). Assim, o carbono flui por seus reservatórios e este processo pode acontecer de forma rápida ou lenta, alterações neste ciclo e na velocidade em que este acontece pode causar alterações na Terra, como o aumento da temperatura (Riebeek, 2011).



**Figura 1** - Ciclo terrestre do carbono. Fonte: Robert (2006).

Os principais processos que favorecem a troca entre a biosfera terrestre e a atmosfera são a fotossíntese, absorvendo carbono, e a respiração, o liberando. Dentro do balanço de absorção e liberação de carbono, nos períodos com maior atividade vegetal, como a primavera e o verão, maior quantidade de carbono é absorvida, logo

nos períodos mais frios há uma menor atividade microbiana e vegetal, então existe menor quantidade de carbono a ser liberada (Pacheco & Helene, 1990).

Caso as concentrações de CO<sub>2</sub> não viessem a aumentar e se mantivessem em concentrações normais, o equilíbrio entre os reservatórios iria se manter, onde haveria a troca entre a biosfera terrestre e os oceanos por meio da atmosfera. Porém a atividade humana adicionou uma outra fonte de emissão de CO<sub>2</sub>, pois passou a utilizar o carbono presente nas rochas e sedimentos oceânicos, os conhecidos combustíveis fósseis (Pacheco & Helene, 1990). As interferências das ações humanas no ciclo biogeoquímico do carbono se dão, principalmente, de duas maneiras, através da queima de combustíveis fósseis e das mudanças no coberto vegetal (Watson et al., 2000). O aumento na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera se dá devido ao déficit de absorção, ou seja, o que é emitido por meio da queima de combustíveis fósseis não é absorvido pelos meios terrestre ou oceanos, o balanço passa a ser negativo e o CO<sub>2</sub> se acumula na atmosfera (Watson et al., 2000).

As alterações na concentração de carbono são distintas, mas algumas são o resultado de mudanças de uso da terra. Em latitudes médias e elevadas algumas áreas foram exploradas até à sua exaustão, seguidas de abandono, o que favoreceu o aparecimento de florestas, que apresentam maior capacidade de armazenamento de carbono (Riebeek, 2011).

Os vegetais buscam no meio três elementos: água (H<sub>2</sub>O), luz e gás carbônico (CO<sub>2</sub>). Este último é tido como fator limitante, pois concentrações na atmosfera inferiores a 0,01% faz com que quase não haja fixação por parte das plantas e, valores hipotéticos de 1 a 5% aumentariam o rendimento da fotossíntese. Normalmente, a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera é de 0,03% (Correia, 1986).

A decomposição dos resíduos orgânicos faz com que o carbono seja reciclado, em parte, para a atmosfera na forma de CO<sub>2</sub> e, outros elementos como o nitrogênio, fósforo, enxofre e micronutrientes, fiquem disponíveis no solo para assimilação por parte da vegetação. Este é o processo básico do sequestro de carbono, onde existe a retirada do CO<sub>2</sub> da atmosfera e sua alocação nos reservatórios, tais como a vegetação

e o solo (Resck et al., 2008). Os processos de respiração e decomposição são os meios naturais mais comuns de adição de carbono na atmosfera (Smith et al., 1993).

## **2.2 Sequestro e armazenamento de carbono pelo solo**

O armazenamento de carbono no solo resulta do equilíbrio entre a entrada de carbono, através da matéria orgânica, e a saída, por decomposição ou mineralização da mesma (Petrokofsky et al., 2012). Devido às características do solo, este possui uma capacidade de armazenamento de carbono três vezes maior que a atmosfera e duas vezes maior que a vegetação, tornando-o o maior reservatório terrestre, apresentando importante papel no ciclo deste elemento (Petrokofsky et al., 2012; Silva & Medonça, 2007).

O sequestro de carbono ocorre prioritariamente pelos processos de humificação, agregação e sedimentação, e a agregação está entre os principais responsáveis pelo sequestro de carbono no solo (Lal, 1997). Os processos de floculação e cimentação são consequências da agregação do solo ou estruturação do substrato edáfico (Dukier et al., 2003). A formação de húmus é o processo que define a humificação, este consiste na decomposição/transformação de material vegetal ou animal por meio da atividade de microrganismos e a consequente geração deste material (Kiehl, 1976). As perdas de carbono ocorrem pelos processos de lixiviação, erosão, volatilização e decomposição (aeróbia ou anaeróbia) (Paula & Valle, 2007).

Os processos que influenciam a capacidade de absorção e manutenção do *stock* de carbono orgânico no solo estão relacionados com o clima, a vegetação, a drenagem e manejo do solo, a textura, a mineralogia e estrutura do solo (Resck et al., 2008). Esta manutenção também está dependente da quantidade e qualidade do resíduo orgânico produzido, da atividade microbiana e da qualidade do solo, pois deles vai depender o grau de proteção da matéria orgânica no solo de ataques por parte dos microrganismos (Resck et al., 2008). Em estudo apresentado por Lal (2007), obteve-se que solos mais arenosos possuem maior tendência de perda de carbono, devido à

maior suscetibilidade aos processos que causam esta perda, como a lixiviação, baixa agregação das partículas do solo e baixa atividade das argilas.

Para Lewandowski (2002), a concentração de carbono no solo está dependente da quantidade de matéria orgânica e, a presença desta no solo é o resultado dos processos da adição, por meio das raízes e resíduos da superfície, e da perda por meio da decomposição. Estes dois processos são afetados por cinco fatores:

1. **Manejo**, pode favorecer o crescimento da vegetação e conseqüentemente aumentar a quantidade de raízes e resíduos adicionadas ao solo por ano. Por outro lado, o uso intensivo do solo pode acelerar a perda de matéria orgânica por meio da decomposição. Também o preparo do solo acelera a decomposição dos resíduos orgânicos recentemente adicionados, contribuindo ainda para que compostos antigos e protegidos possam ser expostos à decomposição se pequenos agregados forem quebrados. Portanto, as práticas de manejo do solo podem alterar a quantidade de matéria orgânica e a profundidade a que essa se encontra;
2. **Textura do solo**, normalmente os solos com mais argila possuem maior teor de matéria orgânica, e os solos arenosos bem arejados propiciam a característica de decomporem a matéria orgânica com maior velocidade;
3. **Clima**, temperaturas mais altas elevam a degradação da matéria orgânica. Maiores índices de precipitação ou o uso de irrigação favorece o crescimento de plantas, portanto, há uma maior entrada de raízes e resíduos no solo;
4. **Posição na paisagem**, áreas baixas e mal drenadas têm níveis mais elevados de matéria orgânica, porque há menos oxigênio disponível no solo para a atividade microbiana, responsável pela decomposição;
5. **Vegetação**, nas pradarias a matéria orgânica é adicionada, principalmente, pelas raízes, que se estendem profundamente no solo. Nas florestas a matéria orgânica é adicionada, principalmente, pelas através das folhas que caem sobre o solo.

### **2.3 Sequestro de carbono e as mudanças climáticas**

Os principais componentes da atmosfera, nitrogênio, oxigênio e argônio, não possuem capacidade de absorção da radiação, outros componentes, encontrados em menor quantidade, como vapor de água, dióxido de carbono e metano, possuem a propriedade de serem opacos à radiação infravermelha, portanto aquecem as baixas camadas da atmosfera. Este processo de aquecimento da Terra ocorre de forma natural e é conhecido como “efeito estufa” e devido a isso e outros fatores tornou-se possível a vida nas camadas mais baixas da atmosfera (Pacheco & Helene, 1990).

Desde a Revolução industrial, aproximadamente há 150 anos atrás, a atividade antrópica tem adicionado quantidades significativas de gases de efeito estufa à atmosfera (Vijayavenkataraman et al., 2012). Esta Revolução, o desflorestamento e a agricultura têm sido as principais fontes de emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera. Atualmente a principal fonte emissora de CO<sub>2</sub> é a queima de combustíveis fósseis (Robert, 2006).

Um aumento nas emissões de gases de efeito estufa podem causar uma desestabilização na vegetação e no solo das regiões Boreais, Sub-boreais e dos Alpes (Robert, 2006). Em áreas subúmidas e semiáridas poderá ocorrer um aumento da evapotranspiração resultando no aumento do déficit de água e na aceleração dos processos de desertificação, podendo também favorecer uma maior variabilidade nos períodos de seca e chuvas (Robert, 2006). Percebe-se que o acréscimo destes gases poderá causar um grande aquecimento, que por sua vez poderá ter um impacto no clima mundial, causando o fenômeno conhecido como mudança climática (Vijayavenkataraman et al., 2012)

As mudanças climáticas se referem a uma significativa variação no estado das características médias do clima ou na sua variabilidade, persistindo por um extenso período (tipicamente décadas ou períodos superiores). Mudanças climáticas talvez sejam originadas a partir de um processo natural interno ou força externa e devidas às ações antropogénicas contínuas sobre a atmosfera e o uso da terra. As mudanças

climáticas há muito tempo deixaram de ser apenas uma curiosidade científica, e passaram a ser uma das muitas preocupações ambientais e regulamentares (Vijayavenkataraman et al., 2012).

Portanto, os altos teores de CO<sub>2</sub> fazem com que os cientistas fiquem preocupados, devido à relação entre a concentração deste componente na atmosfera e o aumento da temperatura, favorecendo o aquecimento global. No entanto, é importante lembrar que a Terra já teve períodos de aquecimento e o CO<sub>2</sub> não foi o principal agente deste processo. Porém já se possui a certeza que as mudanças climáticas decorrentes do aumento desta substância irão afetar os ecossistemas terrestres, pois irá ocorrer diversas alterações nas variáveis que mantêm o equilíbrio ecológico (Pacheco & Helene, 1990).

#### **2.4 Stock de carbono como mitigação para as mudanças climáticas**

O primeiro tratado que visa a redução na emissão dos gases de efeito estufa foi elaborado em 1997, o Protocolo de Kyoto, mesmo tendo sido elaborado na década de 90 e assinado por 84 países, este acordo não foi ratificado por todos estes, porém importantes membros do grupo das nações industrializadas o fizeram, como a União Europeia e o Japão (Roscoe, 2003). Utiliza-se como justificativa para a não ratificação as questões económicas de cada país. O atual sistema económico vigente pode levar ao que se denomina como ecologicamente insustentável, pois já se pode notar a perda significativa do capital natural e a degradação de seus fluxos de serviços. Evidências destas perdas são a ocorrência de desastres ecológicos, a mudança climática e a contínua perda de diversidade biológica, realçada pela homogeneização de paisagens naturais (Andrade & Romeiro, 2009).

Neste sentido, deve-se pensar em medidas que reduzam ou mitiguem a quantidade de carbono que as diversas nações emitem, mas as adoções de medidas que foquem na redução de carbono são mais difíceis para países industrializados, o que requer substantivas alterações na sociedade e na economia. São alterações no

sistema económico, no uso dos recursos, no capitalismo industrial e no modelo de vida (Freedman, 2005).

A principal alteração necessária para a redução da emissão de gases relaciona-se com a matriz energética, essa deve ser menos dependente dos combustíveis fósseis, porém isso é custoso, temporalmente e economicamente. Então os artigos 3.3 e 3.4 do Protocolo de Kyoto estabelecem que os GEE fixados nos ecossistemas terrestres, durante o período proposto para redução, poderão ser debitados nos compromissos assumidos, esta fixação se dá por meio de alterações no uso da terra e manejo de atividades florestais, outra possibilidade é a negociação de créditos de carbono entre os países (Roscoe, 2003).

Pesquisas realizadas no Brasil indicam que boa parte dos GEE são emitidos por atividades agrícolas, porém o uso e o manejo adequado podem levar a agricultura a assumir um papel de dreno de CO<sub>2</sub> atmosférico, podendo se transformar numa ação de mitigação destas emissões (Carvalho et al., 2009). Contudo, o reflorestamento de áreas agrícolas possui alto potencial como medida mitigadora de fixação e acúmulo de carbono (Freedman, 2005).

As medidas mitigadoras com maior eficiência, e que manteriam um uso economicamente viável, seriam a recuperação de pastagens (0,24 Gt C ano<sup>-1</sup>) e a adoção de sistemas agroflorestais (0,39 Gt C ano<sup>-1</sup>) (Watson et al., 2000). Se todas as mudanças de manejo e de sistemas adotados pelos autores fossem utilizadas iria se obter aproximadamente 1,4 Gt C ano<sup>-1</sup> na biomassa dos ecossistemas terrestres. Assim, a agricultura conservacionista pode ser uma das formas de absorver o carbono emitido pela queima de combustíveis fósseis, causando o retardamento ou amenização dos impactos da mudança climática global (Machado, 2005). As medidas objetivadas em sequestrar carbono possuem outras vantagens, tais como preservação do solo, da água e da biodiversidade. Estas medidas podem vir a ser atividades agrícolas, florestais e agroflorestais que contribuam para este processo, portanto devem ser incentivadas, propiciando maior apoio à pesquisa, assistência técnica e ao crédito rural (Roscoe, 2003).

Para os ecossistemas terrestres serem considerados uma eficiente forma de compensação estes deveriam possuir uma capacidade de absorção de carbono muito superior à da atmosfera. Portanto estes reservatórios devem ser tidos como um segundo processo de tamponamento temporário, assim propiciando o tempo ideal para que ocorra o processo de tamponamento primário nos oceanos, por meio da dissolução dos carbonatos, reabsorvendo os excedentes de CO<sub>2</sub> (Roscoe, 2003).

Devido ao aumento da temperatura causado pelas mudanças climáticas, as plantas do extremo norte já começaram a ser menos resilientes ao fogo, liberando o carbono presente nas plantas e no solo (Riebeek, 2011). As ações voltadas para prevenção de incêndios fazem com que não ocorra a liberação do carbono armazenado em material lenhoso (Riebeek, 2011).

Nos atuais níveis de emissão de CO<sub>2</sub>, e com tendência crescente, o sequestro de carbono pelos ecossistemas terrestres seria ineficiente, este causaria uma alteração significativa apenas quando combinado com outras medidas de contenção e redução da emissão dos combustíveis fósseis (Roscoe, 2003). As forças ainda devem estar centradas na redução de emissão de carbono por meio do menor uso de combustíveis fósseis. As ações voltadas para os ecossistemas terrestres devem ser equacionadas visando não interferir no processo de redução de emissões (Roscoe, 2003).

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Caracterização da área de estudo**

A bacia do alto rio Sabor ocupa total ou parcialmente o território das freguesias de Alfaião, Babe, Baçal, Carragosa, Castro de Avelãs, Donai, Espinhosela, França, Gimonde, Gondesende, Rabal, União das Freguesias de aveleda e Rio Onor, União das freguesias de Frio e Milhão, União das freguesias de São Julião de Palácios e Deilão e União das Freguesias da Sé, Santa Maria e Meixedo (DGT, 2016).

A área de estudo possui 30646 ha, ocupando a área nordeste do Parque Natural de Montesinho (PNM) e uma área ao sul desta, próximo de Bragança (Figura 2). Este parque foi criado pelo Decreto-Lei nº 355, de 30 de agosto de 1979. O local possui representatividade da fauna ibérica e europeia, esta é abundante e com relativa estabilidade. Outro fator que caracteriza a importância do PNM é a sua relativa proximidade aos padrões naturais, devido à baixa pressão humana (ICN/IPB, 2007).

O rio Sabor faz parte da rede hidrográfica do PNM e está entre os principais afluentes da margem direita do rio Douro. Dentro do território do parque estão distribuídas as áreas de cabeceira do rio Sabor e alguns afluentes de médio e pequeno porte. Entre estes encontram-se os rios Igrejas, Onor e Maçãs. Esta bacia é quase exclusivamente portuguesa, pois percorre apenas 2 km em território espanhol (ICN/IPB, 2007).

O clima da região sofre pouca influência marítima, portanto o macroclima da região possui características continentalizadas, fazendo com que o local possua maiores períodos de inverno, curtos e intensos verões, isso “conjugadas com um regime tipicamente Mediterrânico com uma estação xérica estival, muito marcada” (ICN/IPB, 2007).

A temperatura média varia entre 8,5°C na Serra de Montesinho e 12,8°C na baixa Lombada. A maior amplitude térmica é registrada nas áreas de vale, pois estas atingem as menores e maiores temperaturas no inverno e verão, respectivamente. Nos

demais sítios que possuam características semelhantes observa-se que a média mínima e máxima oscila, na devida ordem, entre 5-7°C e os 14-17°C (ICN/IPB, 2007).

Percebe-se que há uma influência da geomorfologia do local na variação da temperatura, o mesmo ocorre com a precipitação, os valores mais elevados ocorrem nas zonas de maiores altitudes e na parte ocidental, e conforme as massas de ar atravessam o parque, seguindo para esse e se desidratam, há uma redução acentuada. A distribuição dos períodos de chuva durante o ano é definida por dois extremos, elevada precipitação nos meses mais frios, onde 72% da precipitação anual ocorre, e quase ausência desse fenómeno no período dos meses mais quentes (ICN/IPB, 2007). Nos meses entre maio e outubro a evapotranspiração é superior à precipitação, causando estresse na vegetação devido à falta de água (Koe, 1988).

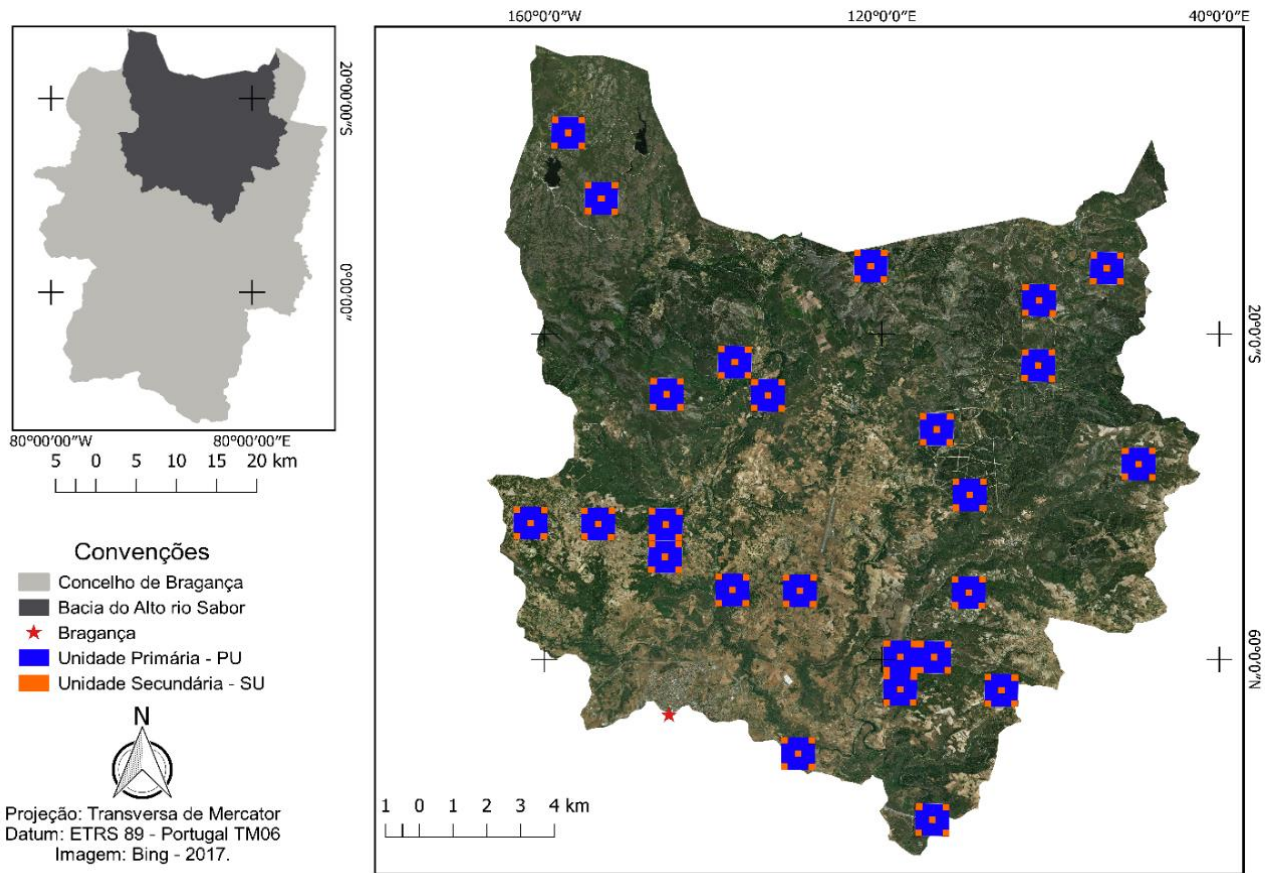
As altitudes dentro da área da bacia do rio Sabor variam de valores superiores a 1400 m na Serra de Montesinho, e inferiores a 600 m no fundo dos vales dos corpos hídricos próximos de Bragança (Koe, 1988). A região transmontana está localizada numa área de transição entre a influência atlântica para a continentalidade, sendo assim a precipitação no Parque natural de Montesinho diminui de Oeste para Este, desde 1200 mm/ano a 800 mm/ano (Koe, 1988).

A vegetação da região norte de Portugal apresenta características de duas formações fitogeográficas, a Eurosiberiana e a Mediterrânea, esta segunda expressa-se nas áreas mais quentes, ou seja, nos vales mais profundos e assim pode ser encontrada mais a norte, conforme a temperatura diminui a vegetação com características mediterrânicas passa a se misturar com as espécies características da formação Eurosiberiana, que se expressa com mais intensidade nas áreas húmidas das terras frias, e nestas há as áreas de sombra pluvial, que possui clima continental e ausência de espécies atlânticas (Koe, 1988). Estes tipos de vegetação podem ser encontrados numa boa parte da bacia do alto rio Sabor, pois os principais usos da terra encontrados são florestas (33%), florestas abertas, vegetação arbustiva e herbácea (48%). O uso não natural com maior percentual de área ocupada é a agricultura temporária (12%), esta ocorre mais a sul da bacia e próximo das áreas urbanas. Estes usos estão dispostos sobre, principalmente, Leptosolos (Koe, 1988).

### **3.2 Locais de amostragem e colheitas de campo**

Definiu-se a distribuição espacial e as pesquisas de campo em amostragens de duas etapas (Gruijter et al., 2006), para determinar os locais para colheita de dados de carbono orgânico do solo. A primeira etapa compreende a seleção aleatória de 25 unidades primárias (UP) eleitas e registradas numa grade regular de 1 x 1 km no sistema de coordenadas geográficas WGS 1984 UTM 29 N.

Devido à grande extensão territorial buscou-se a redução dos custos associados à colheita em toda a área das UP. Para isso definiu-se cinco unidades secundárias (US) de 200 x 200 m, que foram distribuídas nos cantos e no centro de cada UP (Figura 2). Com essa formatação obteve-se um número total de 125 pontos de colheita de amostras de solo, porém colheram-se apenas em 120, devido às dificuldades de acesso aos locais. No centro de cada US, colheram-se amostras de solo nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. Estas profundidades foram definidas com base nas características pedológicas do local, que compreende solos delgados (Leptosolos). Nas mesmas profundidades, colheram-se amostras de solo não perturbadas, de 100 cm<sup>3</sup>, para determinação da densidade aparente. Os locais de amostragem permitiram definir 5 tipos de uso da terra: agricultura, floresta, matos, pastagens e gramíneas.



**Figura 2** - Locais de amostragem de solo, unidades primárias e secundárias, da bacia do alto rio Sabor.

### 3.3 Quantificação laboratorial

As amostras de solos foram secas ao ar, crivadas para determinação da fração grosseira (> 2 mm) e analisadas para a concentração de carbono por combustão seca (ISO, 1995). Na determinação da quantidade de carbono orgânico do solo (COS) por unidade de área ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) utilizou-se a equação (1) (Tate et al., 1997, Percival et al., 2000):

$$COS = 10 * zCC \left( DA - \frac{2,65EG}{100} \right) \quad (1)$$

Onde:

CC: concentração de carbono da camada de solo mineral ( $\text{g kg}^{-1}$  ou  $\text{kg t}^{-1}$ ),

DA: densidade aparente da camada de solo mineral ( $\text{g cm}^{-3}$  ou  $\text{t m}^{-3}$ ),

z: espessura da camada de solo mineral (m),

EG: fator de correção para o conteúdo de elementos grosseiros ( $\text{v v}^{-1}$ ).

### 3.4 Análises estatísticas

Num primeiro momento testou-se a normalidade dos dados utilizando o teste de D'Agostino-Pearson, que se aplica a amostras com número de dados superior a 20 unidades, e pode ser aplicado para  $k$  amostras simultaneamente, para situações em que com número de unidade inferior a 20 aplicou-se o teste Shapiro-Wilk, que pode ser aplicado para situações onde se tem entre duas a 51 unidades em cada amostra (Ayres et al., 2007).

Buscou-se estabelecer correlações significativas ( $p < 0,05$ ) entre a quantidade de carbono de cada uma das camadas de solo com a altitude, o declive e a percentagem de coberto vegetal das US. Os dados relativos a estas variáveis da paisagem foram obtidos durante o processo de amostragem. Utilizou-se a ferramenta de ajustamento de curvas do *software* BioEstat 5.3, que aplica os dados em quatro modelos de regressão, linear (2), exponencial (3), logarítmico (4) e geométrico (5). A partir disto obteve-se a equação que representa a distribuição dos dados, com base no modelo mais ajustado.

$$Y' = a + bX \quad (2)$$

$$Y' = a * e^{bX} \quad (3)$$

$$Y' = a + b * \ln(X) \quad (4)$$

$$Y' = a * X^b \quad (5)$$

Onde:

Y': Variável dependente.

a: Valor do intercepto.

b: Valor do Coeficiente de regressão.

X: Variável independente.

Por meio do teste de variância Kruskal Wallis buscou-se determinar diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) entre a quantidade de carbono associado a cada uso da terra e tipo de solo no qual realizou-se a amostragem. Comparou-se as quantidades de carbono de cada camada de solo, sem realizar a comparação entre camadas.

### 3.4.1 Regressão linear múltipla

Utilizou-se a regressão linear múltipla para verificar se a altitude, declive, uso da terra e tipo de solo são capazes de prever a quantidade de carbono orgânico presente no solo. Realizou-se o teste de quatro modelos com diferentes combinações entre variáveis independentes e dependentes (Tabela 1).

**Tabela 1** – Modelos com combinações aplicadas no teste de regressão linear múltipla.

Modelo	Variáveis Independente	Dependente
1	Altitude (m)	Quantidade de carbono (t C ha <sup>-1</sup> )
2	Altitude (m) Uso da terra	Quantidade de carbono (t C ha <sup>-1</sup> )
3	Altitude (m) Uso da terra Tipo de solo	Quantidade de carbono (t C ha <sup>-1</sup> )
4	Altitude (m) Uso da terra Tipo de solo Declive (%)	Quantidade de carbono (t C ha <sup>-1</sup> )

Para isso utilizou-se a ferramenta de regressão linear do *software* IBM SPSS e aplicou-se o método de seleção de variáveis *stepwise* com base no valor de F. Este método testa as variáveis e as combinações uma a uma e apresenta os resultados daquelas que foram significativas para a regressão. Dentre os modelos aplicados,

obteve-se o melhor a partir do coeficiente de determinação  $r^2$  e do coeficiente de significância.

### 3.4.1.1 Organização das variáveis

O uso da terra e o tipo de solo são variáveis não numéricas. Para utilizá-las no teste de regressão linear múltipla foram classificadas com números (Tabelas 2 e 3) e ordenadas de forma crescente conforme a quantidade média de carbono em cada uso da terra ou tipo de solo, e definiu-se com zero aqueles que não foram amostrados a partir das coletas de campo.

Obteve-se os usos da terra para todo o território a partir dos dados da Carta do Ordenamento do Território fornecida pelo Direção Geral do Território, os dados referem-se ao uso no ano 2007 (Tabela 2). Com base nas características do uso da terra fez-se a correspondência destes com o uso da terra observado no momento da amostragem do solo.

**Tabela 2** – Numeração definida para o uso da terra e uso da terra correspondente conforme a Carta de ordenamento do Território 2º nível.

Uso da terra observado	Uso da Terra – Carta de ordenamento do Território 2º nível	Nº
	Áreas agrícolas heterogêneas	
Agricultura	Cultura temporária	1
	Cultura permanente	
Floresta	Florestas	4
Gramínea	Zonas descobertas e com pouca vegetação	3
Pastagens (Lameiros)	*	2
Mato	Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea	5
Outros		0

Os solos do território são apresentados na Carta de Solos do Nordeste de Portugal, a partir desta obteve-se os tipos de solos para todo o território da bacia do alto Rio Sabor (Agroconsultores e Coba, 1991).

**Tabela 3** – Numeração definida para os tipos de solo e identificação destes conforme a classificação da FAO-Unesco.

Tipo de solo - Classificação da FAO-Unesco	Sigla	Número
Leptosolos úmbricos de rochas básicas	lub	1
Leptosolos êutricos órticos de rochas básicas	leob	2
Luvissolos crômicos de rochas básicas	Lxb	3
Leptosolos dístricos órticos de migmatitos	Idom	4
Cambissolos dístricos crômicos de migmatitos e gnaiss blastomiloníticas	Bdxm	5
Leptosolos dístricos órticos de xisto	ldox	6
Leptosolos êutricos órticos de rochas ultrabásicas	leou	7
Alissolos háplicos de sedimentos detríticos	Uhs	8
Leptosolos úmbricos de xisto	lux	9
Leptosolos úmbricos de granitos	lug	10
Outros	*	0

### 3.5 Modelação

Para obtenção dos valores das altitudes da área de estudo utilizou-se o *software* QGIS 2.3 e realizou-se a aquisição da imagem SRTM com resolução de 1 arc-segundo – 30 metros (USGS, 2014). A partir disso, utilizou-se ferramentas disponíveis no *software* para calcular o declive do terreno em percentagem.

Em seguida à obtenção dos valores de altitude e de declive do terreno, realizou-se a modelação estatística da distribuição do carbono presente no solo. Para isso utilizou-se a equação obtida que foi aplicada a todo o território, diferenciando as equações obtidas para cada camada do solo amostrada.

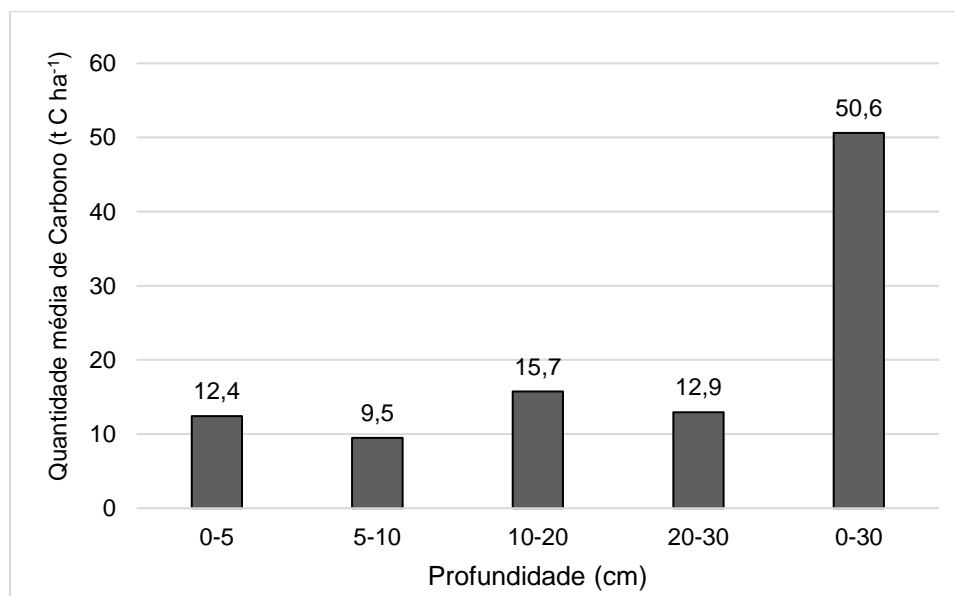
Organizou-se um outro arquivo *shapfile* contendo as informações de altitude, declive, uso da terra e tipo de solo, para todo o território. A partir destes dados e das equações resultantes da regressão linear múltipla estimou-se a distribuição espacial do carbono ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) para toda a bacia do Alto rio Sabor. Utilizou-se os coeficientes não

padronizados do modelo linear mais ajustado para construir a equação, ou seja, aquele que apresenta o maior valor de  $r^2$ .

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Armazenamento de Carbono no solo

Para uma área de 30 646 ha (área da bacia em estudo) estima-se que exista armazenado, até 30 cm de profundidade do solo, cerca de 1 566 011 toneladas de carbono ( $50,6 \text{ t C ha}^{-1}$ ) (Figura 3). Regista-se uma redução da quantidade de carbono da camada 0-5 cm ( $12,4 \text{ t C ha}^{-1}$ ) para a 5-10 cm ( $9,5 \text{ t C ha}^{-1}$ ) e um aumento desta para a 10-20 cm ( $15,8 \text{ t C ha}^{-1}$ ), o que parece estar relacionado com processos de translocação de matéria orgânica no solo. O valor somado das duas primeiras camadas (0-5 e 5-10 cm) é de  $21,9 \text{ t C ha}^{-1}$ , ou seja, caso as análises fossem realizadas apenas para três camadas com a mesma profundidade, a camada mais superficial seria a detentora da maior quantidade de carbono. As camadas mais profundas (10-20 e 20-30 cm) apresentam valores similares. A divisão num maior número de camadas ocorreu para se obter um maior detalhamento da distribuição e da dinâmica do carbono ao longo do perfil do solo (Fonseca et al., 2012a).



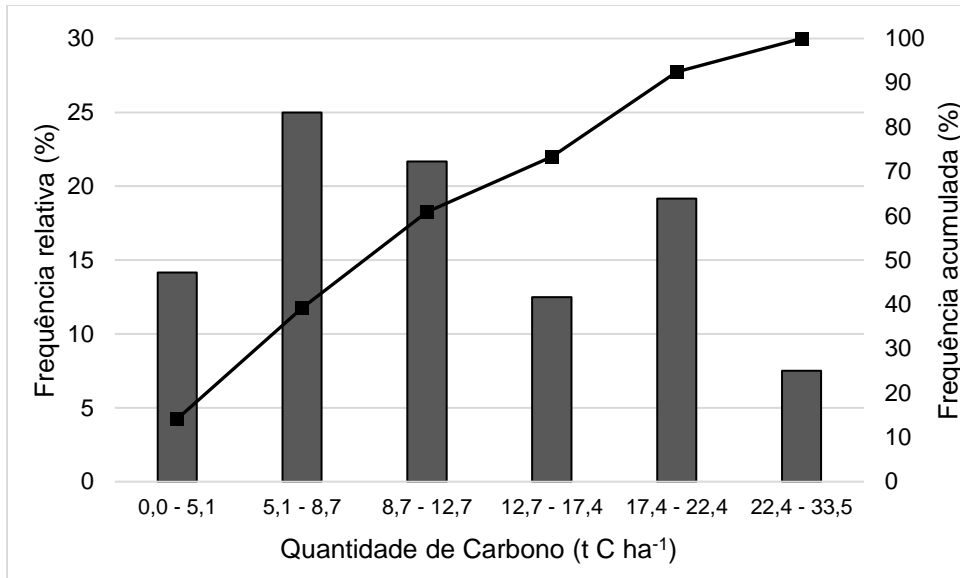
**Figura 3** - Quantidade de carbono armazenado ( $\text{t C ha}^{-1}$ ) nas diferentes profundidades do solo.

Observa-se que a quantidade de carbono presente em cada camada se comporta de forma distinta quando comparadas entre si, isso deve-se às diferenças entre as espessuras das camadas e à posição destas no perfil do solo (Tabela 4).

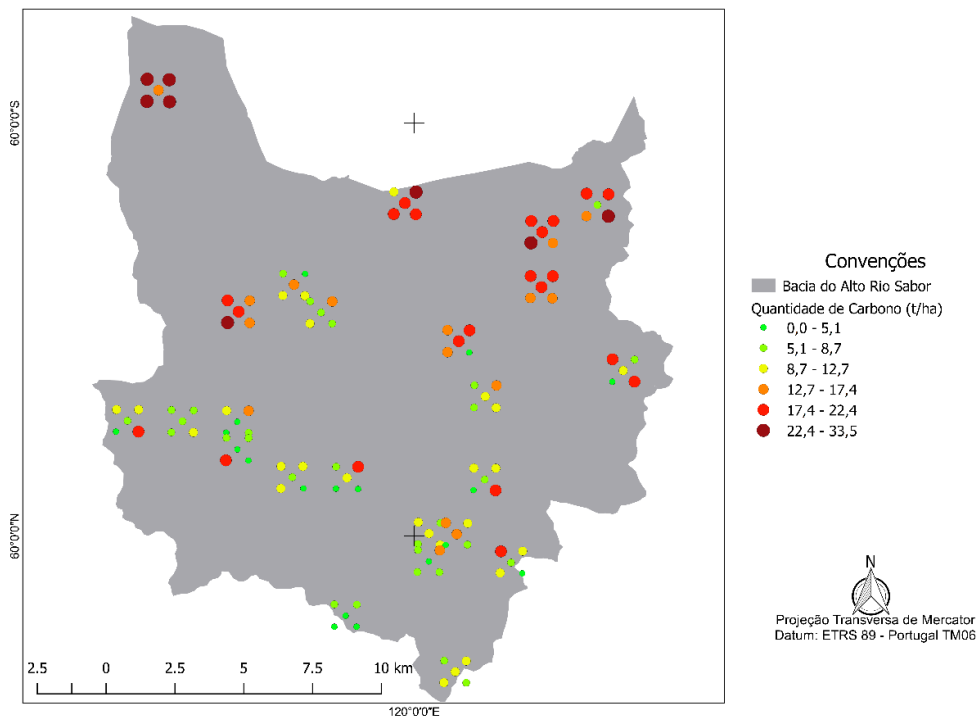
**Tabela 4** – Estatística descritiva dos resultados obtidos para o armazenamento de carbono (t C ha<sup>-1</sup>) nas diferentes profundidades.

	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
Mínimo	2,0	2,0	0,0	0,0
Máximo	33,5	31,0	52,9	53,0
Mediana	11,0	7,0	12,5	10,0
Média Aritmética	12,4	9,5	15,8	13,4
Variância	4,8	3,7	10,6	10,9
Desvio Padrão	6,9	6,1	10,3	10,4

A quantidade de carbono armazenada na camada 0-5 cm de profundidade é mais elevada na zona norte da bacia do alto rio Sabor (Figura 5), nesta zona é encontrado o valor máximo de quantidade carbono (33,5 t C ha<sup>-1</sup>) (Tabela 4) e nota-se a maior ocorrência de valores acima da média. Os valores de carbono no intervalo de 5,1 a 8,7 t C ha<sup>-1</sup> são os mais frequentes, a maior parte destes estão localizadas fora do Parque Natural de Montesinho e em áreas de menor altitude (Figuras 4 e 5).



**Figura 4** - Frequência relativa e acumulada da quantidade de carbono (t C ha<sup>-1</sup>) para a camada 0- 5 cm de profundidade.

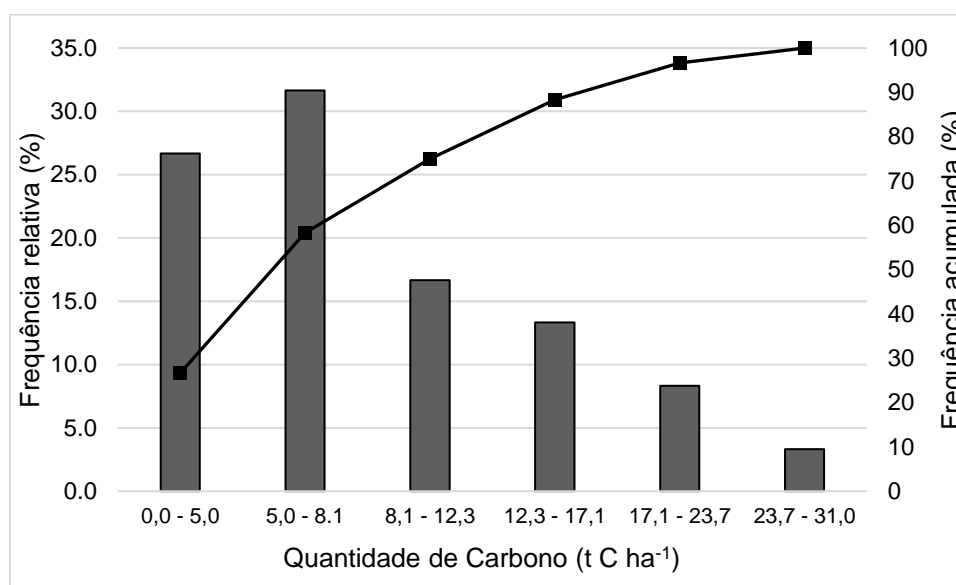


**Figura 5** - Quantidade de carbono armazenada (t C ha<sup>-1</sup>) na profundidade 0-5 cm.

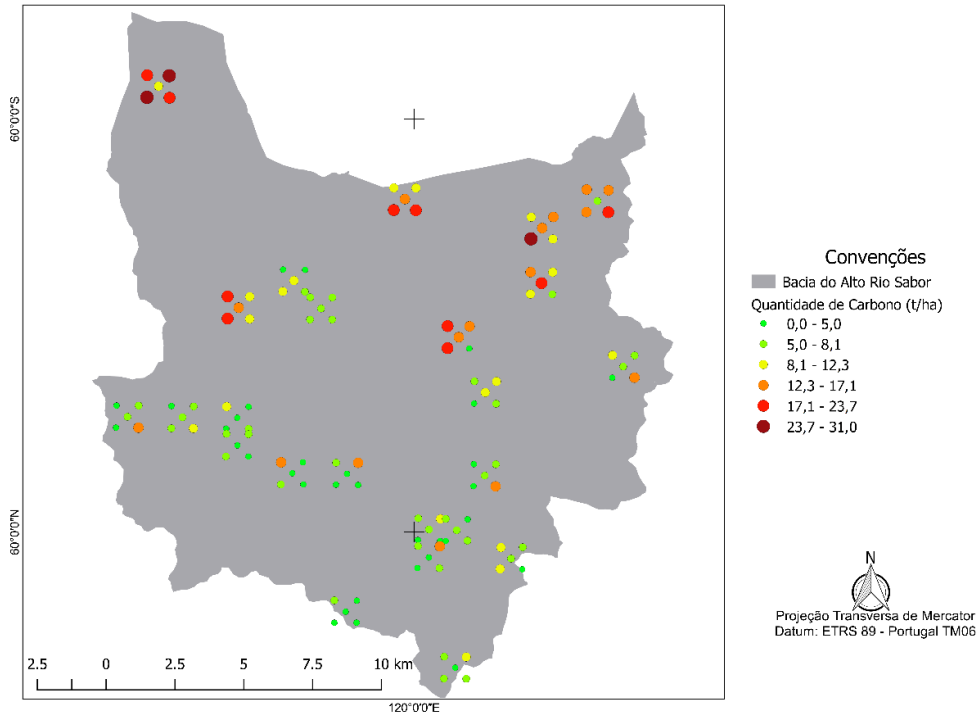
Para a camada 5-10 cm de profundidade também se observa a ocorrência dos maiores valores de quantidade de carbono nos solos amostrados no norte da bacia,

dentro da área do Parque Natural de Montesinho (Figura 7). Porém estes valores altos são menos representativos, uma vez que os menores ocorrem com maior frequência (Figura 6).

A maior parte dos pontos amostrados possuem quantidade de carbono no solo inferior à média, 58,3% destes estão dentro do intervalo de 0,0 a 8,1 t C ha<sup>-1</sup>, enquanto a média encontra-se dentro do intervalo de 8,1 e 12,3 t C ha<sup>-1</sup>, o que pode representar uma grande despariedade entre os pontos amostrados para esta camada.

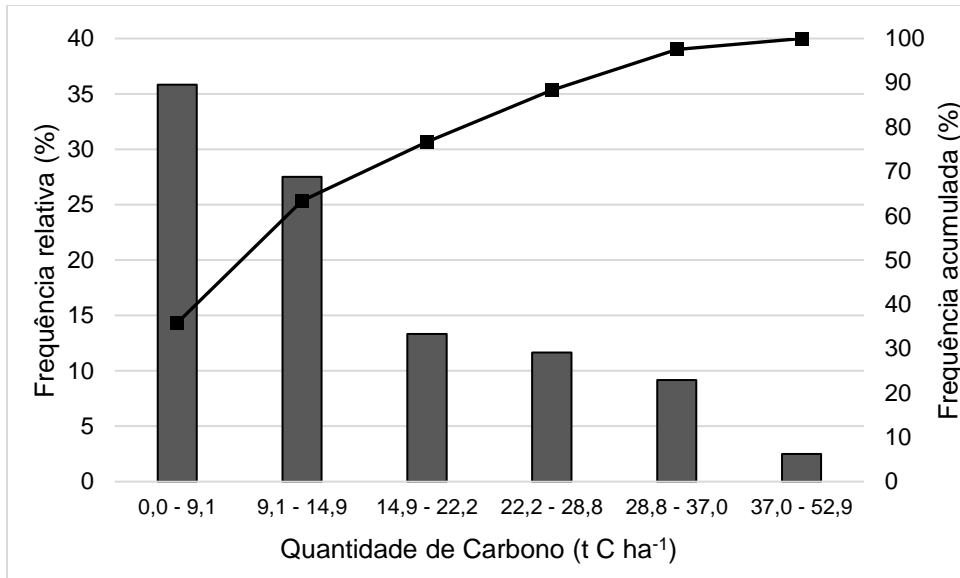


**Figura 6** - Frequência relativa e acumulada da quantidade de carbono (t C ha<sup>-1</sup>) na profundidade 5-10 cm.

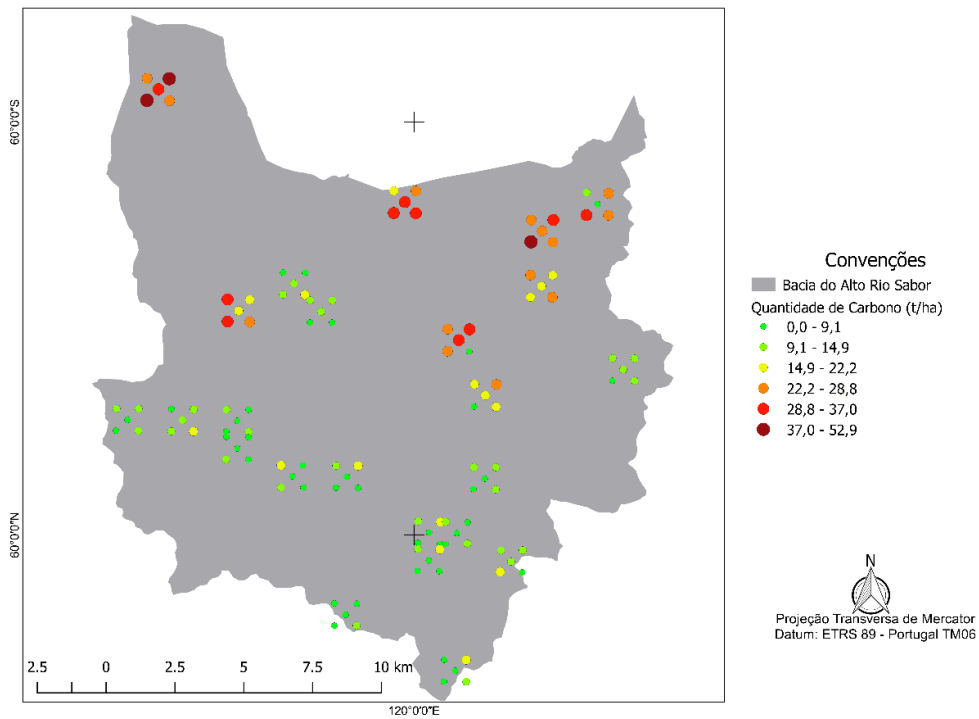


**Figura 7** - Quantidade de carbono armazenada ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) na profundidade 5-10 cm.

Assim como nas camadas mais superficiais, a camada 10-20 cm apresentou a maior parte dos valores de quantidade de carbono dentro dos intervalos mais baixos (Figura 8). Ocorre com maior frequência valores dentro do intervalo 0,0 a 9,1  $t\ C\ ha^{-1}$ , e a maioria destes encontram-se no sul da bacia, tal como nas demais camadas, os pontos de maior quantidade de carbono localizam-se no norte (Figura 9).



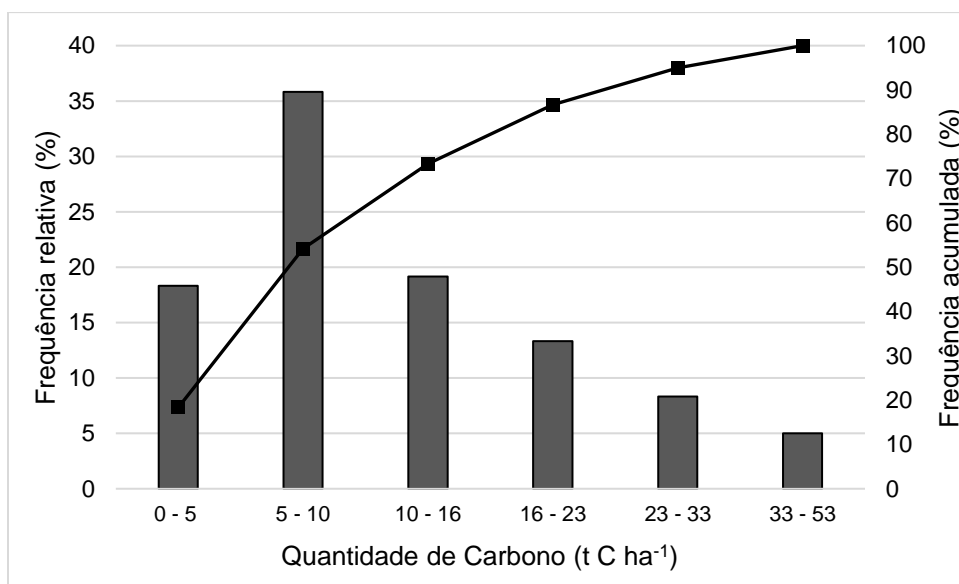
**Figura 8** - Frequência relativa e acumulada da quantidade de carbono (t C ha<sup>-1</sup>) na profundidade 10-20 cm.



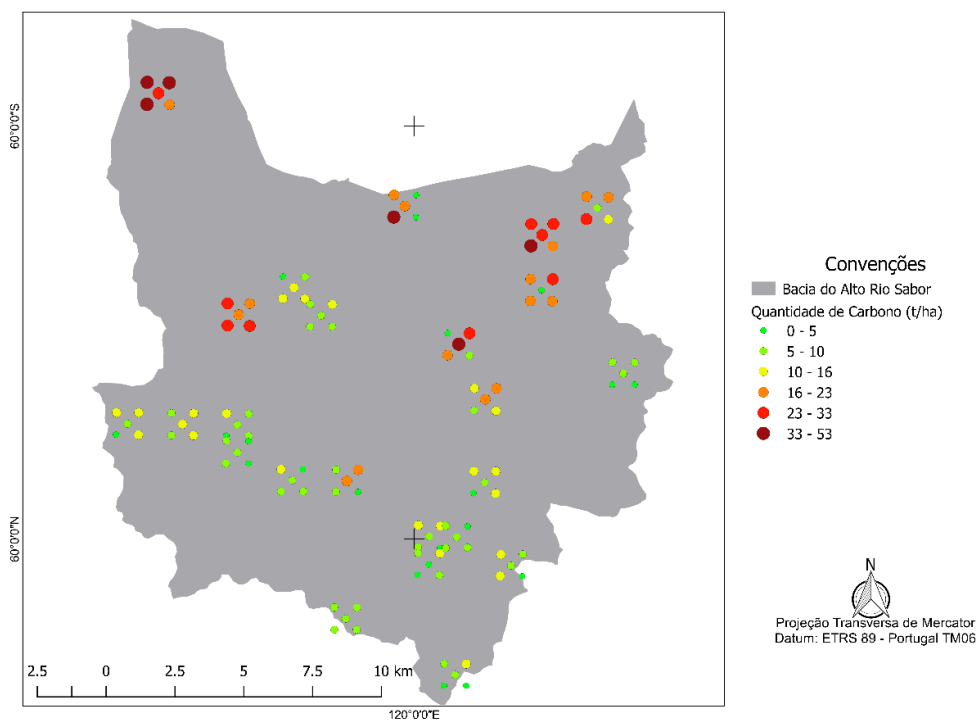
**Figura 9** - Quantidade de carbono armazenada (t C ha<sup>-1</sup>) na profundidade 10-20 cm.

Na profundidade 20-30 cm, 43 dos 120 pontos amostrados possuem valores de carbono entre 5 e 10 t C ha<sup>-1</sup>, o que representa 35,8% do total. Este intervalo ocorre com maior frequência e distingue-se dos demais (Figura 10).

Observa-se em todas as profundidades um padrão de distribuição do carbono no solo. Na zona norte da bacia registam-se os valores mais altos e na zona sul os valores mais baixos (Figura 11). A área a norte da bacia possui altitudes superiores a 900 m e usos da terra menos agressivos ao *stock* carbono (predominam os matos). Assim, observa-se a tendência das quantidades mais significativas de carbono estarem armazenadas nesta área. Também num estudo realizado em áreas de montanha Shaheen et al. (2017) observaram a importância da altitude e do uso da terra nos *stocks* de carbono. Foi realizado o estudo da variação da quantidade de carbono com o gradiente altitudinal no sopé do Himalaia menor da Caxemira, com altitudes variando entre 900 e 2500 m. Os valores máximos de carbono foram encontrados na faixa entre 900 e 1200 m de altitude, para todos os usos estudados, e dentre estes as florestas abertas possuem os maiores valores de carbono armazenado no solo.



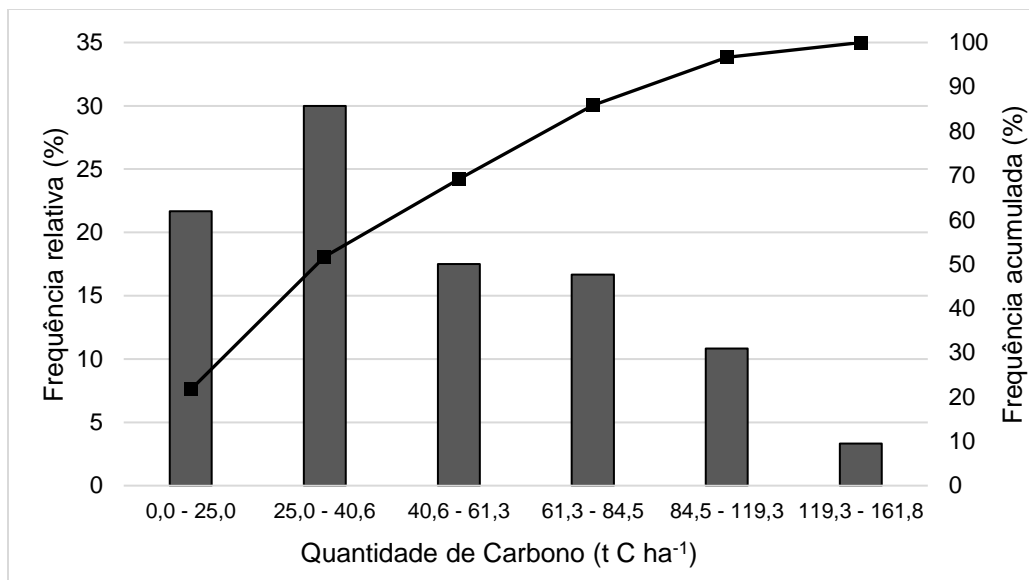
**Figura 10** - Frequência relativa e acumulada da quantidade de carbono (t C ha<sup>-1</sup>) na profundidade 20-30 cm.



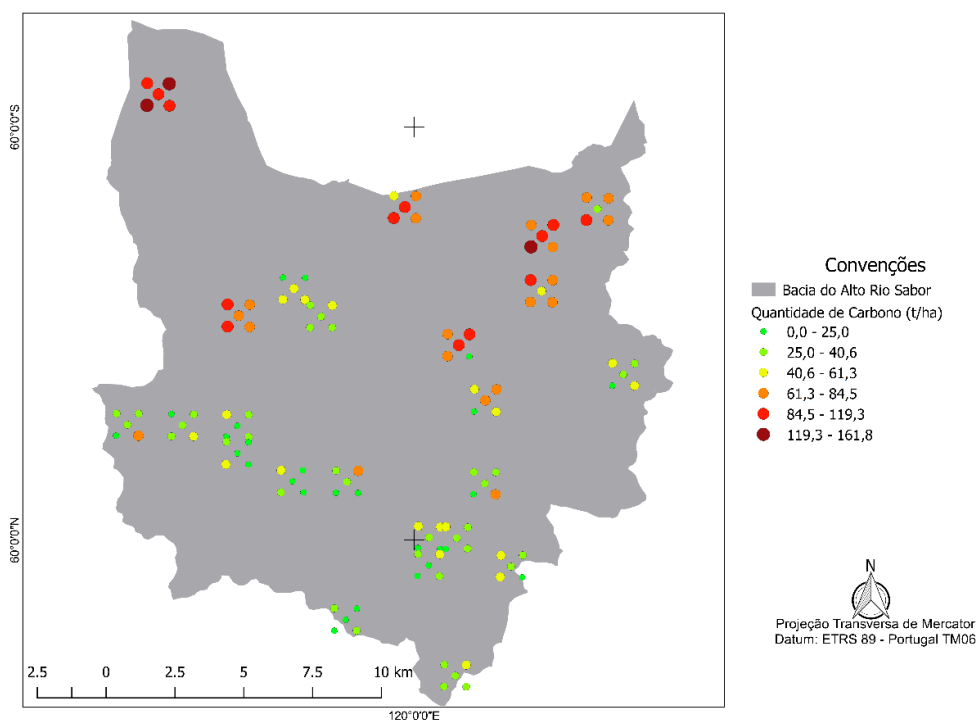
**Figura 11** - Quantidade de carbono ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) na profundidade 20-30 cm.

Mostrando o mesmo comportamento observado para as camadas quando analisadas individualmente, os valores de carbono na camada 0-30 cm (carbono total) ocorrem com maior frequência nos menores intervalos, inferiores a  $40,6\ t\ C\ ha^{-1}$  (Figura 12). O padrão observado para as profundidades analisadas em separado é refletido no valor total, ou seja, os valores mais elevados de carbono são menos frequentes e estão localizados na área norte da bacia (Figura 13).

A média,  $50,6\ t\ C\ ha^{-1}$ , encontra-se no intervalo  $40,6$  e  $61,3\ t\ C\ ha^{-1}$  e apenas 30,8% dos pontos amostrados encontram-se com valores de carbono superiores a este intervalo, ou seja, a maior parte dos pontos amostrados possuem quantidades de carbono inferiores à média, novamente, observa-se a diversidade de valores de carbono no solo da Bacia do Alto rio Sabor.



**Figura 12** - Frequência relativa e acumulada da quantidade de carbono total (0-30 cm) armazenada no solo (t C ha<sup>-1</sup>).

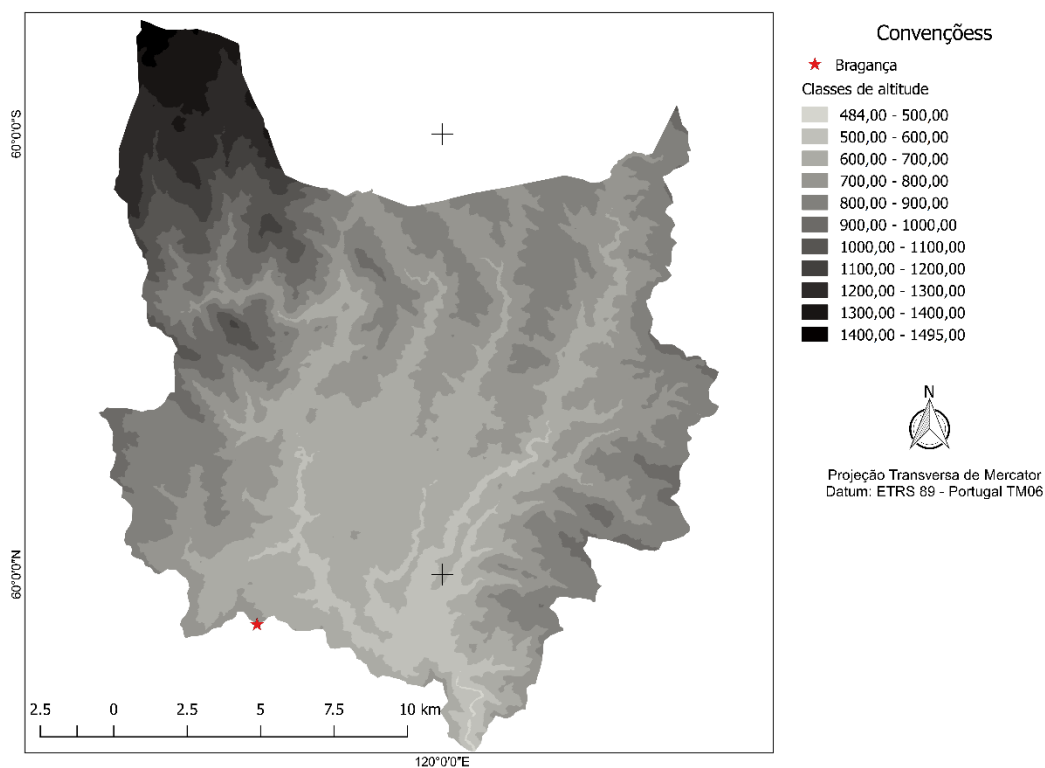


**Figura 13** - Quantidade de carbono total (t C ha<sup>-1</sup>) armazenada na profundidade 0-30 cm.

## 4.2 Variáveis Ambientais que afetam a quantidade de carbono no solo

### 4.2.1 Altitude

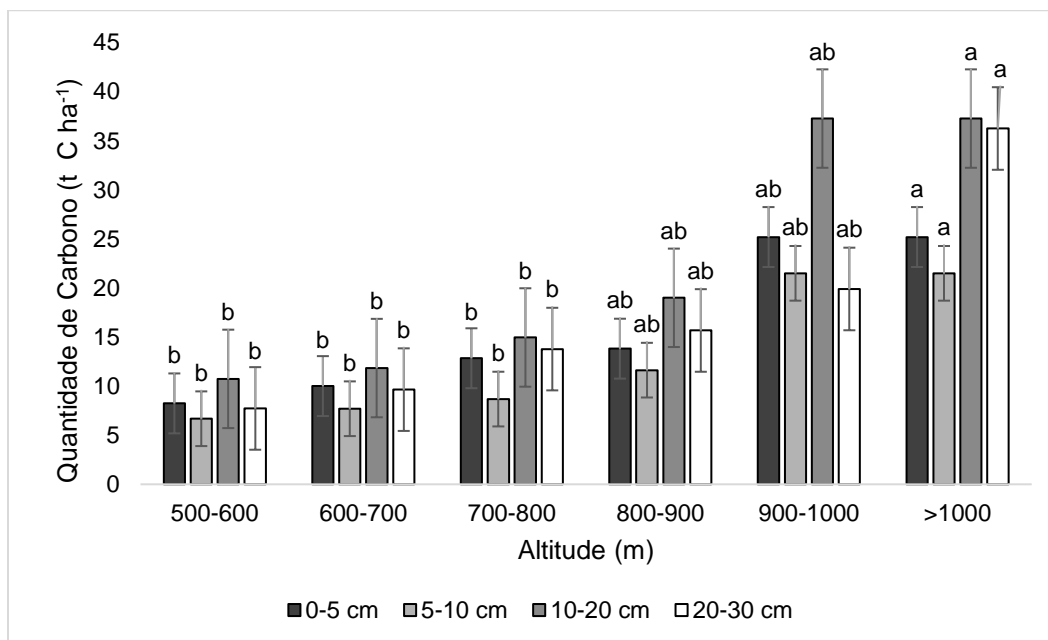
Dentro da área da bacia do Alto Rio Sabor a altitude varia de 484 m a sul e 1491 m a norte, próximo dos limites administrativos com a Espanha (Figura 14).



**Figura 14** - Carta de Altitudes da bacia do Alto Rio Sabor.

É conhecida a influência exercida pela altitude sobre a quantidade de carbono presente no solo (Manfrinato et al, 2002). Esta manifesta-se de modo que os solos das áreas mais baixas são os que possuem menores quantidades de carbono, com tendência a aumentar com o aumento da altitude, devido essencialmente às alterações que ocorrem ao nível do clima e do uso da terra (Fonseca et al., 2012b) (Figura 15).

Resultados idênticos foram obtidos por Leifeld et al. (2005) num estudo sobre *stock* de carbono orgânico em solos agrícolas localizados na Suíça.



**Figura 15** - Quantidade média de carbono ( $t C ha^{-1}$ ) para as diferentes profundidades do solo e intervalos de altitude. Para a mesma camada, letras diferentes indicam diferenças significativas entre intervalos de altitude.

Acima dos 1000 m de altitude a quantidade de carbono, em todas as camadas, é significativamente superior à quantidade encontrada abaixo dos 800 m. No intervalo entre os 800 e os 1000 m de altitude os valores de carbono tendem a ser estatisticamente idênticos aos registados acima e abaixo desse intervalo (Figura 15).

Com base nos resultados obtidos a partir de regressões lineares (Tabela 5, Figuras 16 e 17) confirma-se a existência de uma relação positiva entre a quantidade de carbono presente no solo e a altitude, isto é, a quantidade de carbono no solo aumenta com o aumento da altitude. Em parte, isto deve-se ao impacto da altitude sobre o microclima local, ocorrendo um aumento do teor de água no solo e diminuição da temperatura deste, nas zonas mais altas, o que contribui para uma redução da

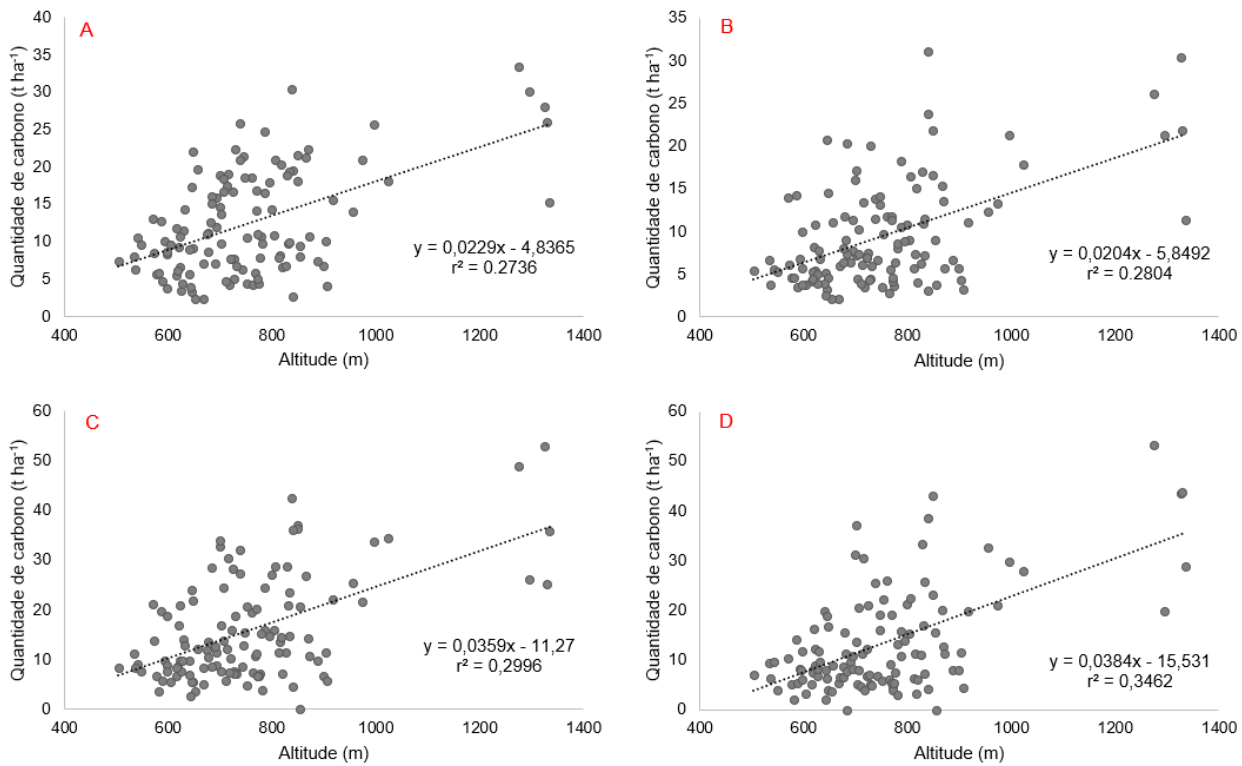
velocidade de decomposição da matéria orgânica, resultando num aumento da quantidade de carbono no solo (Smith et al., 2002; Fonseca et al., 2012b).

Simegn & Soromessa (2015) estudaram a variação da acumulação de carbono no solo no cinturão das florestas do Parque Nacional das Montanhas de Simen, Etiópia. Os resultados obtidos vão de encontro aos apresentados neste trabalho, pois os autores detetaram interferências da altitude na quantidade de carbono armazenada, juntamente com outros fatores como o declive e a quantidade de biomassa que entra no sistema, variando esta última com o uso da terra.

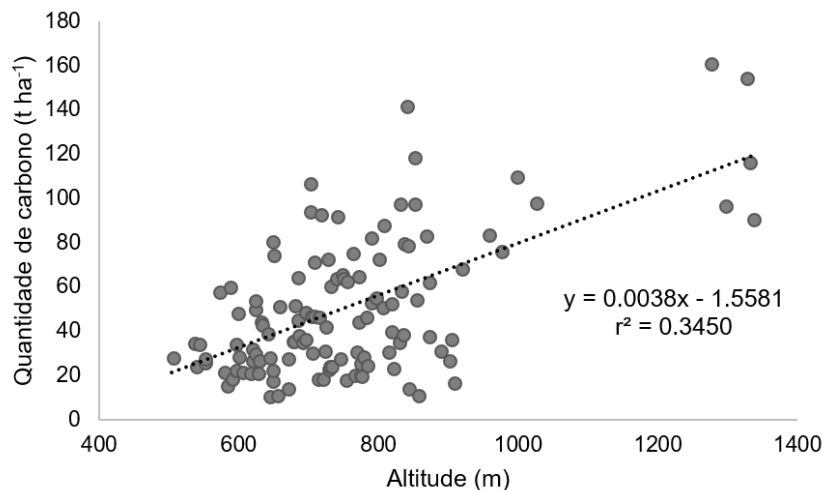
**Tabela 5** - Resultados dos testes de regressão, ajustamento de curva, entre a quantidade de carbono no solo nas diferentes profundidades e a altitude.

Profundidade (cm)	Regressão	p	r <sup>2</sup> (%)
0-5	Linear	<0,00001	27,4
5-10	Linear	<0,00001	28,0
10-20	Linear	<0,00001	30,0
20-30	Linear	<0,00001	34,6
0-30	Linear	<0,00001	35,9

De acordo com o coeficiente de determinação, r<sup>2</sup> (Tabela 5), as percentagens expressas dão indicação da força da relação entre as duas variáveis (quantidade de carbono e altitude), para as diferentes camadas de solo amostradas. Por exemplo, para a profundidade 0-5 cm, 27,4% da variação da quantidade de carbono é explicada pela altitude, aplicando-se esta leitura a todas as camadas. Esta força é relativamente baixa, e significa que a quantidade de carbono no solo é afetada por outras variáveis que não foram incluídas neste teste (Stevenson, 1981). Os valores de r<sup>2</sup> aumentam ligeiramente com a profundidade, o que pode traduzir um aumento da interferência da altitude na distribuição do carbono ao longo do perfil do solo.



**Figura 16** - Regressão entre a altitude e a quantidade de carbono no solo para as diferentes profundidades, 0-5 (A), 5-10 (B), 10-20 (C) e 20-30 cm (D).

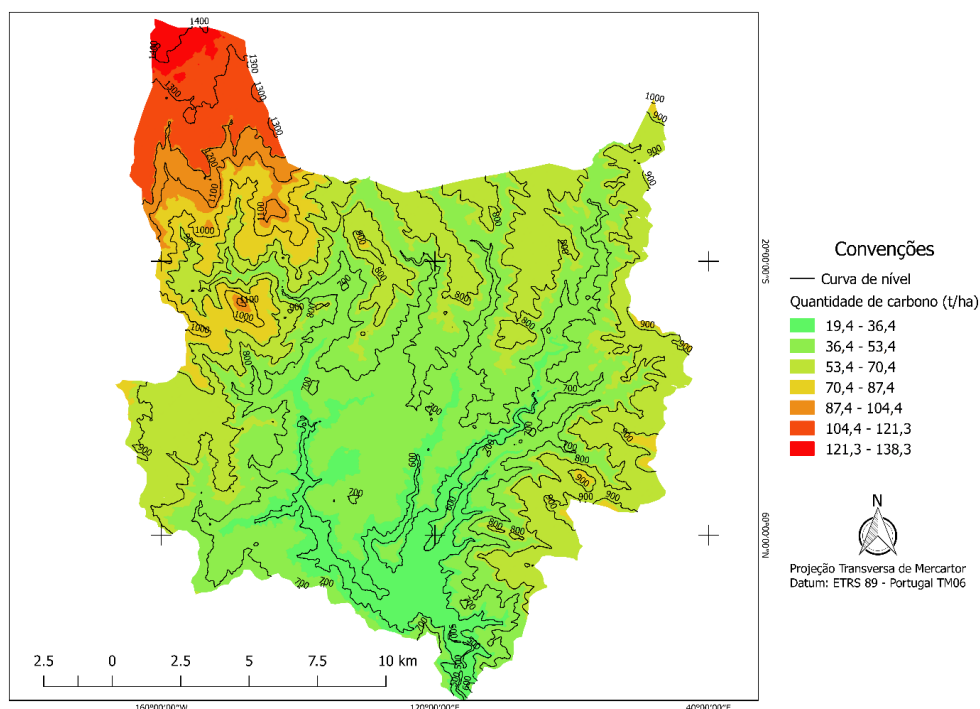


**Figura 17** - Regressão entre a altitude e a quantidade de carbono no solo para camada total (0-30 cm).

As equações resultantes dos testes de regressão permitiram realizar a modelação da distribuição do carbono para todo o território. O modelo linear foi o que melhor se ajustou ao conjunto dos dados em análise (Tabela 5). Assim, aplicou-se a Equação (2) ( $Y' = a + bX$ ; ver Materiais e Métodos), para modelar a distribuição do

carbono nas diferentes camadas do solo (Figuras 16 e 17). Os resultados da modelação são apresentados nas Figuras 18, 19, 20, 21 e 22 e, representam a relação entre a distribuição espacial do carbono no solo nas diferentes profundidades e as classes de altitude.

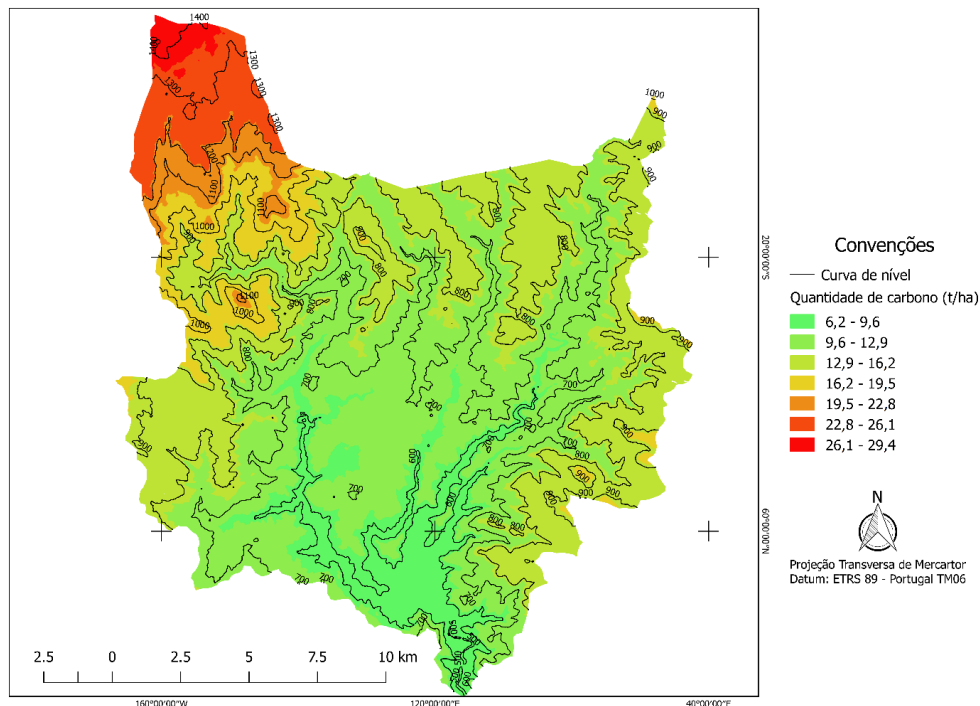
Quando se considera o conjunto das camadas globalmente (0-30 cm), que é o resultado da soma dos valores modelados para cada camada, observa-se o reflexo dos resultados obtidos pelo teste de ajustamento de curva, pois há uma relação positiva entre o aumento da quantidade de carbono presente no solo e o aumento da altitude. Os menores valores são encontrados nas áreas com altitudes próximas de 600 m ( $19,4 \text{ t C ha}^{-1}$ ), enquanto os maiores valores surgem nas áreas de altitudes que rondam os 1400 m ( $138,3 \text{ t C ha}^{-1}$ ) (Figura 18).



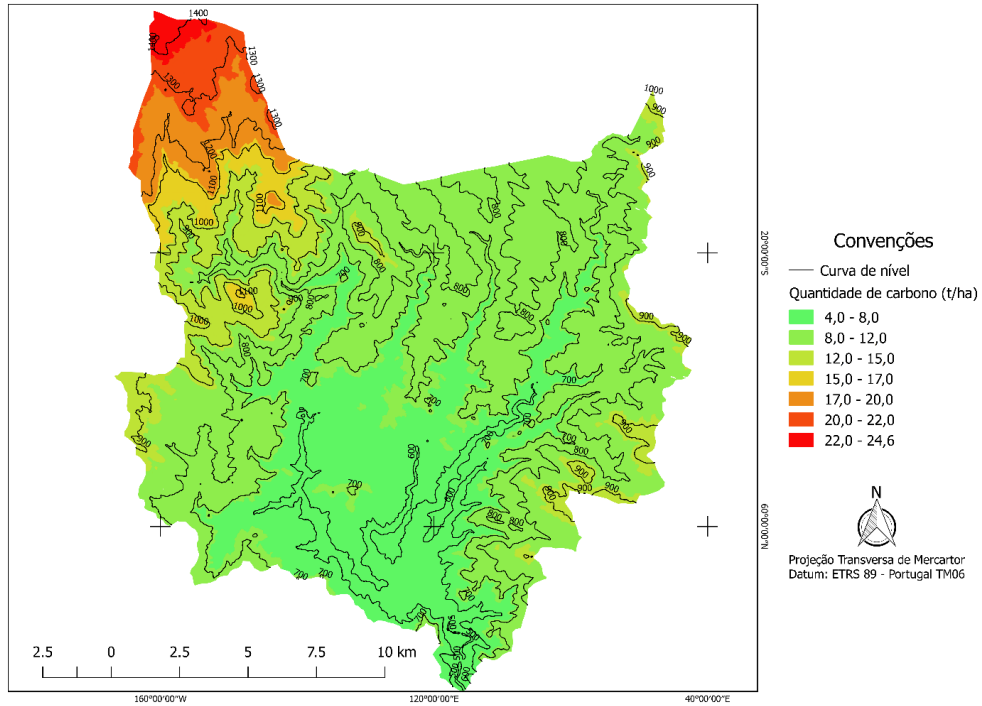
**Figura 18** - Distribuição do carbono presente na camada 0-30 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base na altitude.

Em todas as camadas de solo amostradas (0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm), observa-se também uma relação positiva entre as variáveis quantidade de carbono e altitude. Na camada 0-5 cm, o menor valor registado é de  $6,2 \text{ t C ha}^{-1}$  e o maior é de

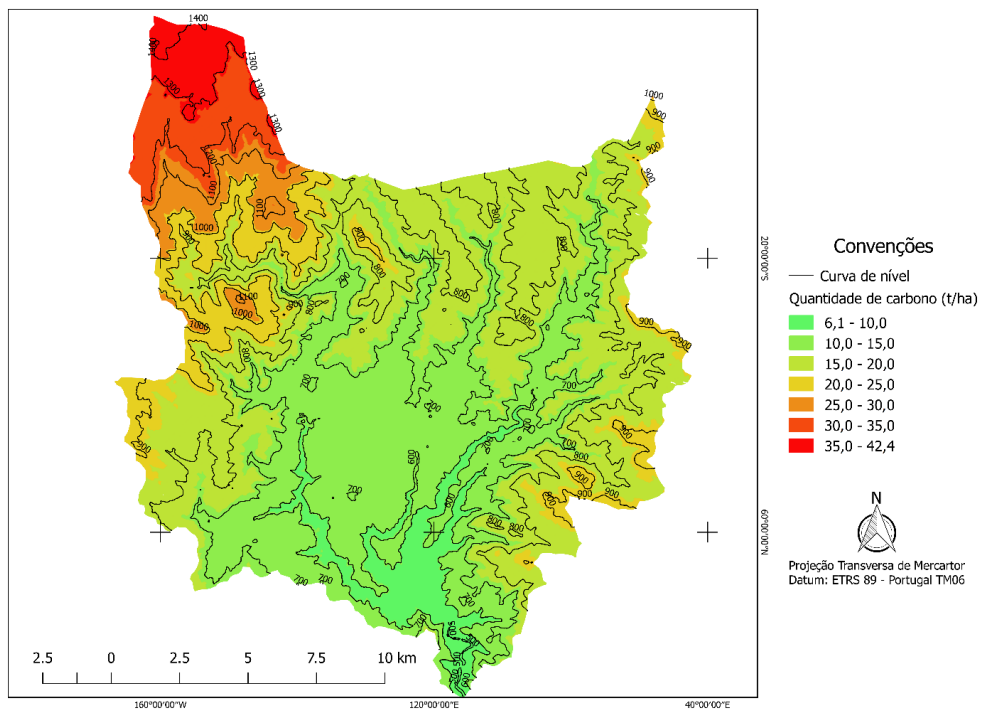
29,4 t C ha<sup>-1</sup>. A maior parte dos valores encontram-se no intervalo que varia de 9,6 a 12,9 t C ha<sup>-1</sup> e, estão predominantemente localizados na faixa de altitudes entre 600 e 700 m (Figura 19). Na camada 5-10 cm, grande parte do território exibe valores de carbono inferiores a 12 t C ha<sup>-1</sup>, com valores que variam de 4,0 a 24,6 t C ha<sup>-1</sup> (Figura 20). Na camada 10-20 cm os maiores valores de carbono situam-se na área da bacia acima dos 1300 m e os menores registam-se abaixo dos 600 m. Os intervalos de 10 a 15 t C ha<sup>-1</sup> e 15 a 20 t C ha<sup>-1</sup> aparentam ser os que ocupam a maior área do território (Figura 21). Finalmente, na camada mais profunda (20-30 cm), observa-se uma redução da quantidade de carbono comparativamente à camada que lhe fica acima, seguindo o comportamento padrão de redução da quantidade de carbono com a profundidade. As quantidades de carbono nos intervalos de 8 a 13 t C ha<sup>-1</sup> e de 13 a 18 t C ha<sup>-1</sup> são as que ocupam a maior parte do território (Figura 22).



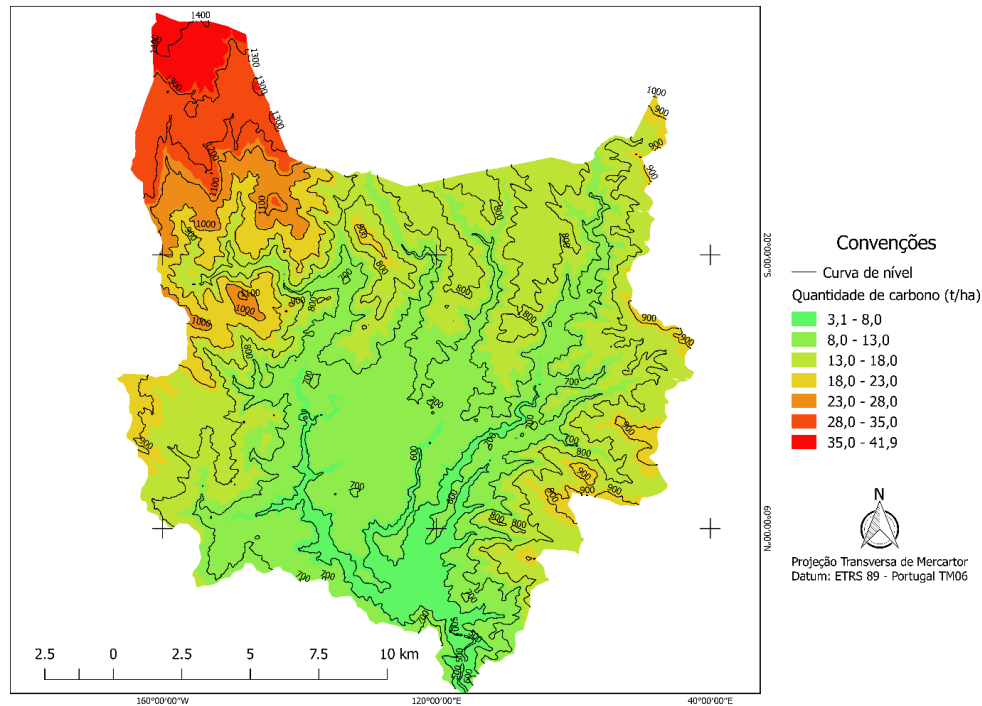
**Figura 19** - Distribuição do carbono presente na camada 0-5 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base na altitude.



**Figura 20** - Distribuição do carbono presente na camada 5-10 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base na altitude.



**Figura 21** - Distribuição do carbono presente na camada 10-20 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base na altitude.



**Figura 22** - Distribuição do carbono presente na camada 20-30 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base na altitude.

A maior parte da área da bacia em estudo (30 646 ha), localiza-se na faixa de altitude de 600 a 900 m (75,7 % da área do território). As áreas com altitudes superiores a 1400 m representam apenas 0,4 % da área total (Tabela 6). A partir dos resultados obtidos com a modelação estima-se que a camada 0-5 cm contenha em média  $13,9 \text{ t C ha}^{-1}$ , e cerca de 68 % deste encontra-se no intervalo de 600 a 900 m de altitude (Tabela 6). Na profundidade 5-10 cm a quantidade média de carbono estimada é de  $10,9 \text{ t C ha}^{-1}$ , e a maior parte encontra-se no intervalo de 800 a 900 m de altitude, o que se repete para a camada 10-20 cm, que apresenta uma quantidade média de  $18,2 \text{ t C ha}^{-1}$ . Por fim, a profundidade 20-30 cm apresenta um valor médio de carbono de  $15,9 \text{ t C ha}^{-1}$ , estando a maior quantidade armazenada no intervalo de altitude de 1200 a 1300 m, 24,5% (Tabela 6).

Em todos os casos, os valores médios de carbono obtidos por meio da modelação são superiores aos valores obtidos a partir das amostras colhidas no campo (Figura 3). Isto resultou numa diferença de nove toneladas entre o valor médio total

obtido e o estimado, sendo que o valor total médio resultante da modelação é de 59,1 t C ha<sup>-1</sup>.

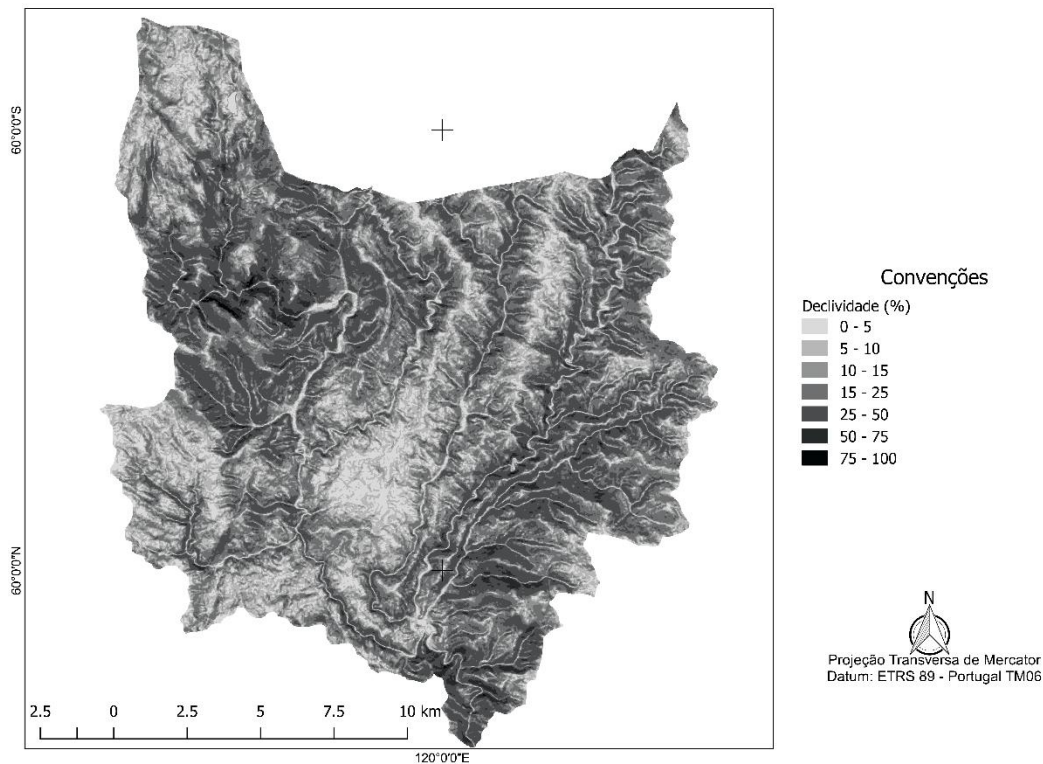
A estimativa da quantidade de carbono no solo por meio da modelagem estatística pode trazer erros, pois existe um conjunto de variáveis que interferem o armazenamento de carbono, como o modelo linear não considerar o decaimento da entrada de matéria orgânica após se atingir determinada altitude, assim como apresenta os dados de Shaheen et al. (2017), que observou um decaimento na quantidade de carbono no solo conforme se tem mais altitude, valores superiores a 1200 m, e o que ajuda a justificar a superioridade nas quantidades médias obtidas por meio da modelação.

**Tabela 6** – Distribuição percentual do carbono no solo para as diferentes profundidades e intervalos de altitude da área de estudo.

Altitude (m)	Área (%)	Profundidade (cm)			
		0-5	5-10	10-20	20-30
< 600	6,0	0,5	0,40	0,2	0,1
600-700	26,4	20,0	13,0	7,3	3,0
700-800	26,4	24,2	19,9	14,3	8,2
800-900	22,9	24,6	24,1	20,9	15,0
900-1000	6,6	8,1	9,4	9,6	8,4
1000-1100	3,3	4,7	6,3	7,5	7,9
1100-1200	2,0	3,2	4,9	6,6	8,2
1200-1300	3,9	6,8	11,5	17,5	24,5
1300-1400	2,1	4,0	7,5	12,5	19,4
> 1400	0,4	0,9	1,7	3,2	5,3

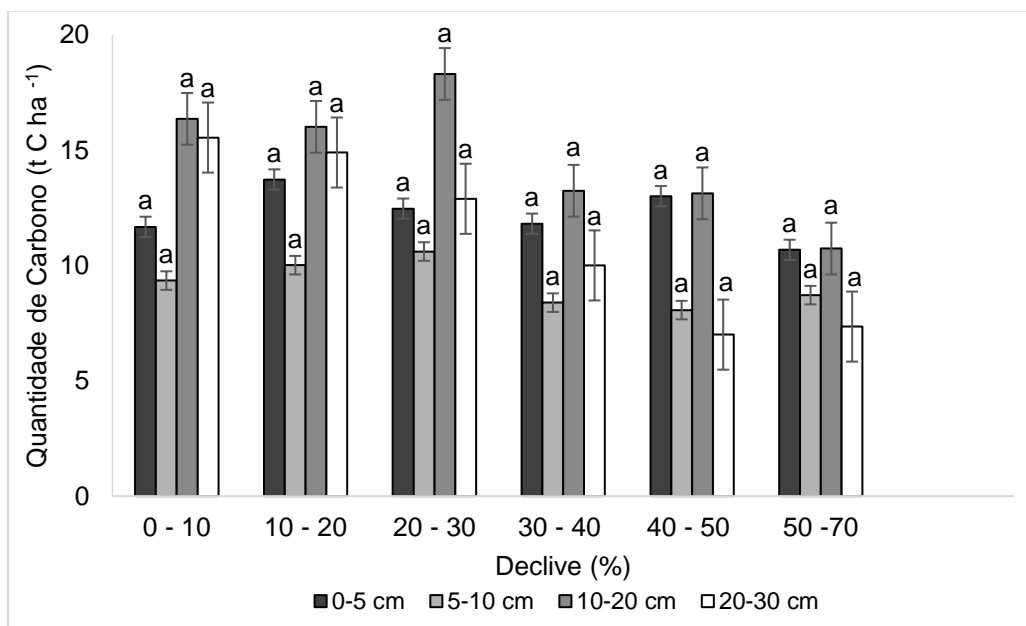
#### 4.2.2 Declive

O declive médio dos locais de amostragem é de 20,4%, com valores que variam de 0 a 64%. Os declives da área da bacia do alto rio Sabor variam entre 0 e 100% (Figura 23).



**Figura 23** - Carta de declives (%) da bacia do alto rio Sabor.

De um modo geral, o armazenamento de carbono é superior nos locais com declives inferiores a 30%. Contudo, a quantidade de carbono presente no solo não varia significativamente com a classe de declive, independentemente da camada considerada (Figura 24).



**Figura 24** - Quantidade média de carbono ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) para as diferentes profundidades do solo e classes de declive. Para a mesma camada, letras diferentes indicam diferenças significativas entre intervalos de declive.

No entanto, com base no teste de regressão, o declive do terreno influencia significativamente a quantidade de carbono na camada global (0-30 cm) e na camada mais profunda (20-30 cm) (Tabela 7). Isto já foi relatado para outras áreas do Parque Natural de Montesinho, especificamente em áreas de matos, onde o declive não afetou de forma significativa o armazenamento de carbono (Bompastor et al., 2009; Fonseca et al., 2012a).

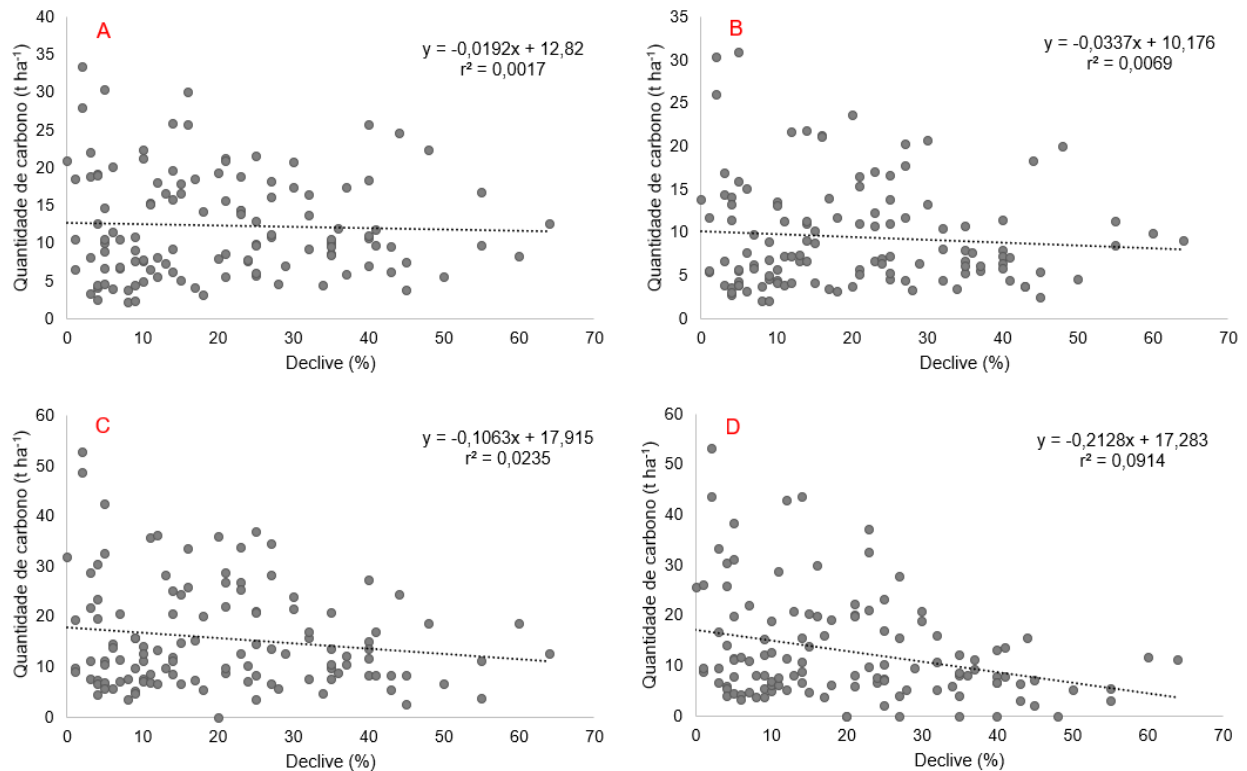
**Tabela 7** - Resultados dos testes de regressão, ajustamento de curva, entre a quantidade de carbono no solo, nas diferentes profundidades, e o declive do terreno.

Profundidade (cm)	Regressão	p	r <sup>2</sup> (%)
0-5	Linear	0,656	0,2
5-10	Linear	0,371	0,7
10-20	Linear	0,096	2,4
20-30	Linear	0,001	9,1
0-30	Linear	0,050	3,21

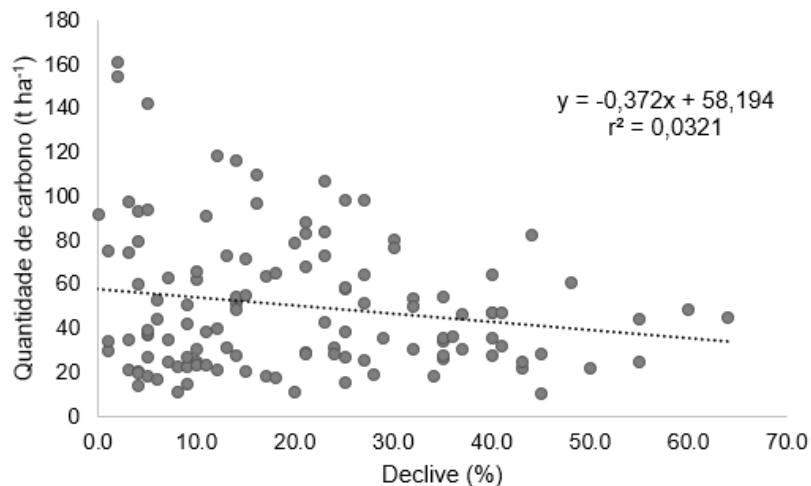
Na área de estudo, a relação entre a quantidade de carbono e o declive é negativa, ou seja, há a tendência de redução da quantidade de carbono no solo à

medida que aumenta o declive do terreno (Figura 25). Pois, a morfologia do terreno influencia o escoamento superficial e a perda de solo, diminuindo a resistência do solo à erosão com o aumento da inclinação (Qing-quan et al., 2001). O processo erosivo consiste na separação, transporte e sedimentação de partículas do solo por meio da ação de agentes erosivos, como a água, vento e gelo. Todos estes processos, nos seus diferentes estágios, causam forte impacto sobre a quantidade de carbono presente no solo, devido às perdas de matéria orgânica nos sedimentos (Lal, 2006).

Regra geral, as áreas de menor declive armazenam maiores quantidades de carbono no solo, pois estas áreas servem como depósito de compostos ricos em matéria orgânica provenientes de locais com maior gradiente de declive (Simegn e Soromessa, 2015; Conforti et al., 2016).



**Figura 25** - Regressão entre o declive e a quantidade de carbono no solo para as diferentes profundidades, 0-5 (A), 5-10 (B), 10-20 (C) e 20-30 cm (D).



**Figura 26** - Regressão entre o declive e a quantidade de carbono no solo para 0-30 cm de profundidade

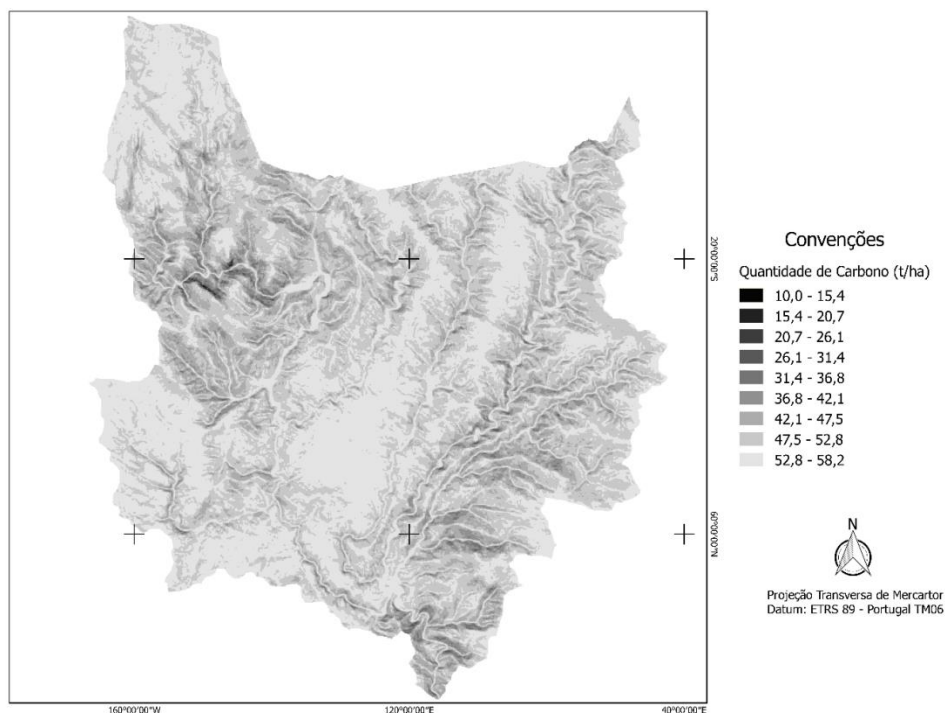
A partir das equações do modelo linear (Figuras 25 e 26) modelou-se a distribuição do carbono com base no declive para toda a área em estudo. As Figuras 27, 28, 29, 30 e 31 mostram a relação entre a distribuição espacial do carbono no solo nas diferentes profundidades e as classes de declive. As áreas representadas a cinza mais claro são as que apresentam maiores quantidades de carbono no solo. Frequentemente estas áreas ocupam as zonas aplanadas das cumeadas e fundos de vales, locais que são menos impactados pelos efeitos do escoamento superficial e favorecem a acumulação de matéria orgânica.

Em todas as camadas, a quantidade de carbono no solo diminui com o aumento do declive. Na camada 0-30 cm (resultado da soma a quantidade de carbono nas diversas camadas de solo consideradas globalmente) observa-se valores de carbono, que em boa parte do território, situam-se entre 52,8 e 58,2 t C ha<sup>-1</sup> (Figura 27).

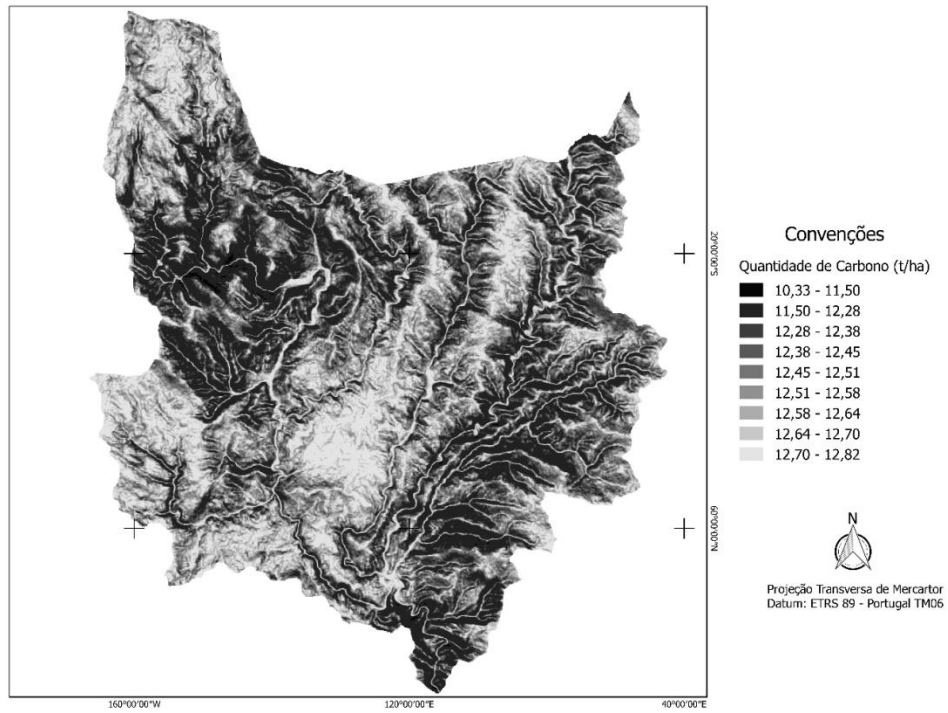
Na camada mais superficial (0-5 cm), a quantidade de carbono distribui-se por diversos intervalos estabelecidos entre 10,3 e 12,8 t C ha<sup>-1</sup> (Figura 28). Assim, observa-se uma maior significância de áreas com valores de carbono localizados em intervalos inferiores em comparação com a camada 0-30 cm, pelo que aquela camada pode apresentar maior variância dos valores, devido à interferência de outras variáveis ambientais, para além do declive.

A camada 5-10 cm é a que mostra menores quantidades de carbono armazenado no solo (5,8 a 10,2 t C ha<sup>-1</sup>), o que pode estar relacionado com a translocação de compostos orgânicos para as camadas subjacentes. Nesta camada observa-se um aumento da amplitude dos valores obtidos por meio da equação do modelo linear, quando comparada com os valores da camada mais superficial (Figura 29).

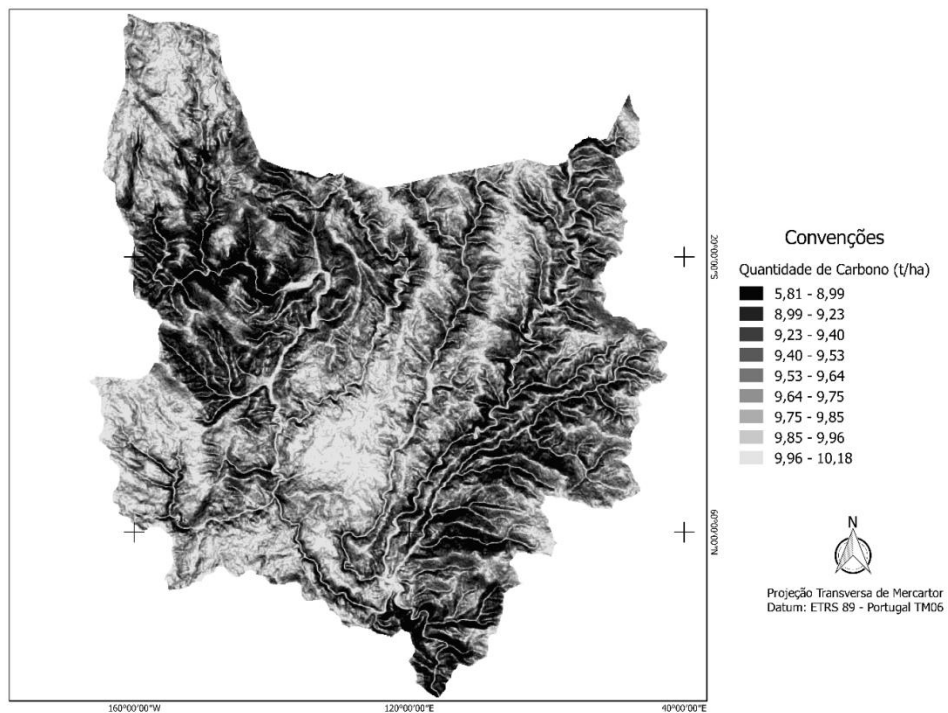
A camada 10-20 cm exibe uma maior homogeneidade entre os valores obtidos por meio da modelação e, a maior parte destes situam-se no último intervalo que varia de 16,5 a 17,91 t C ha<sup>-1</sup> (Figura 30). Por último, na camada 20-30 cm observa-se a ocorrência de locais onde a quantidade de carbono no solo pode atingir valores muito próximos de zero, o que é aceitável uma vez que se trata de solos delgados (Leptosolos). Contudo, a maioria da área do território apresenta valores de carbono nos intervalos entre 13,0 e 17,3 t C ha<sup>-1</sup> (Figura 31).



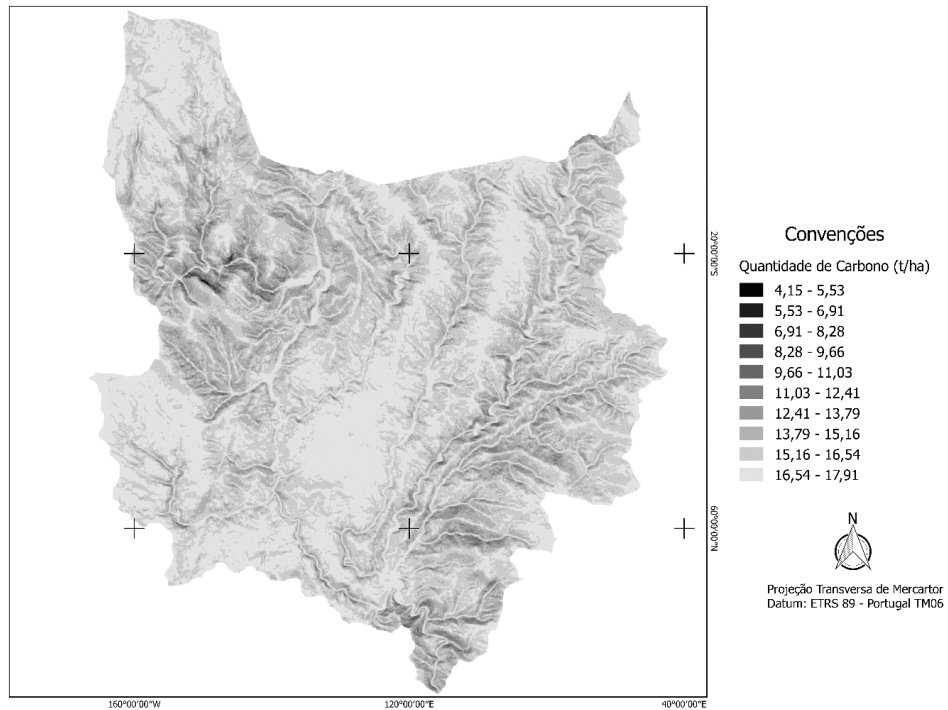
**Figura 27** - Distribuição do carbono presente na camada 0-30 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base no declive.



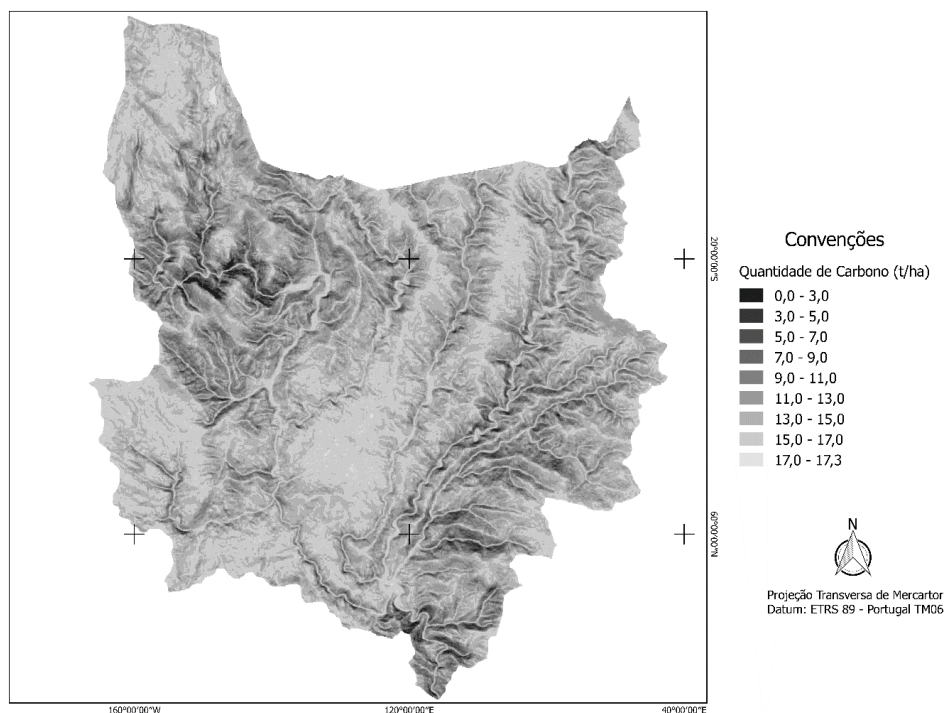
**Figura 28** - Distribuição do carbono presente na camada 0-5 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base no declive.



**Figura 29** - Distribuição do carbono presente na camada 5-10 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base no declive.



**Figura 30** - Distribuição do carbono presente na camada 10-20 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base no declive.



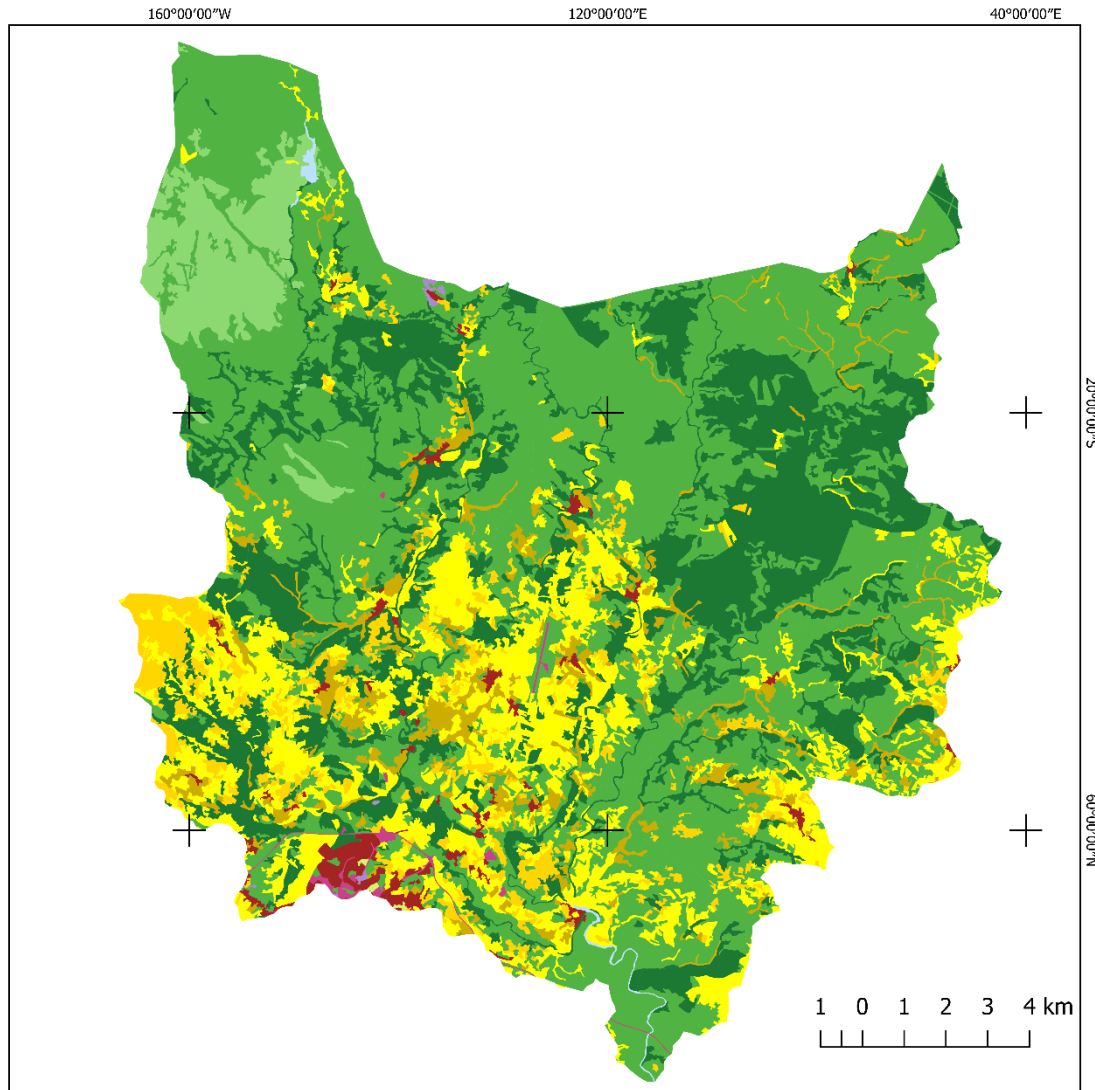
**Figura 31** - Distribuição do carbono presente na camada 20-30 cm dos solos da bacia do Alto rio Sabor com base no declive.

### 4.2.3 Uso da terra

Globalmente, as áreas de floresta e de matos são as que armazenam maiores quantidades de carbono, o que poderá estar relacionado com menores perturbações de origem antrópica (Lewandowski, 2002; Fonseca et al., 2012b).

A região nordeste de Portugal está a passar por um processo de abandono da terra. Em 2007, os matos ocupavam cerca de 45% do território, enquanto áreas com uso agrícola e florestal correspondiam a 36% e 19%, respectivamente. Estes valores comparados com percentuais anteriores demonstram que existe a tendência de incremento do percentual de terra destinada a usos adequados do solo (matos e florestas), isto pode representar um potencial de acréscimo da quantidade de carbono acumulado no solo desta região (Figueiredo et al., 2015).

No ano 2007, a maior parte da área de estudo era ocupada por áreas de florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea (Figura 32), ou seja, áreas de matos, assim corroborando com o uso mais representativo aquando das amostragens no campo (Tabela 8). Cerca de 1/3 do Parque Natural de Montesinho é ocupado por matos e segundo um estudo realizado por Fonseca et al. (2012a) mais de 80 % do carbono armazenado no sistema encontra-se no solo. Portanto, os solos destas áreas possuem grande valia para mitigação dos impactos ambientais associados ao carbono, e a tendência de aumento da área ocupada por matos é capaz de resultar num expressivo aumento da quantidade de carbono armazenada nos solos do Nordeste Português e, mais especificamente, na área de estudo. Também, um estudo realizado por Pinheiro (2009) demonstra o efeito deste processo de abandono. Investigou a evolução da paisagem da freguesia de Deilão, concelho de Bragança, e concluiu que as áreas de matos aumentaram, devido ao abandono de áreas agrícolas, resultando num aumento de 360% da quantidade de carbono armazenada no solo.



### Convenções

Uso da Terra - COS 2007

- Áreas agrícolas heterogêneas (Agricultura - 1)
- Área de extração de inertes (Outros - 0)
- Águas interiores (Outros - 0)
- Culturas permanentes (Agricultura - 1)
- Culturas temporárias (Agricultura - 1)
- Espaços verdes urbanos (Outros - 0)
- Florestas (Floresta - 4)
- Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea (Mato - 5)
- Indústria, comércio e transportes (Outros - 0)
- Tecido urbano (Outros - 0)
- Zonas descobertas e com pouca vegetação (Gramínea - 3)



Projeção Transversa de Mercator  
 Datum: ERTS 89 - Portugal TM06  
 Dados de Base: Carta de ordenamento do território - 2007.

**Figura 32** - Carta de Uso e Ocupação do Solo da bacia do Alto Rio Sabor, disponibilizada pela Direção Geral do Território e classificada ao segundo nível (COS, 2007).

Os solos de floresta e de matos são os que apresentam maior quantidade de carbono na camada superior (0-5 cm), mas estatisticamente idêntica aos dos restantes usos, com exceção da agricultura, comportamento que se repete nas camadas 10-20 e 20-30 cm (Tabela 8). A camada 5-10 cm contraria o padrão observado, o que pode estar relacionado com processos de eluição de compostos orgânicos. Globalmente, as áreas de matos exibem uma quantidade ligeiramente superior de carbono armazenado no solo.

**Tabela 8** - Estatística descritiva da quantidade de carbono (t C ha<sup>-1</sup>) para os diferentes usos da terra nas diferentes profundidades. Para a mesma camada, letras diferentes associadas à média indicam diferenças significativas entre usos da terra.

Prof. (cm)	Uso da terra	Nº de pontos	Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio Padrão
0-5	Agricultura	21	2,3	10,7	6,1 <sup>a</sup>	5,2	2,3
	Floresta	20	2,6	22,4	13,9 <sup>b</sup>	40,8	6,4
	Gramínea	8	4,3	18,0	11,8 <sup>b</sup>	24,7	5,0
	Pastagem	9	3,4	21,4	11,7 <sup>b</sup>	42,4	6,5
	Mato	62	3,9	33,5	14,2 <sup>b</sup>	52,8	7,3
5-10	Agricultura	21	2,1	9,1	4,9 <sup>a</sup>	2,9	1,7
	Floresta	20	3,1	20,8	9,6 <sup>ab</sup>	24,5	4,9
	Gramínea	8	2,8	16,1	10,3 <sup>b</sup>	24,3	4,9
	Pastagem	9	3,9	14,1	8,3 <sup>ab</sup>	17,8	4,2
	Mato	62	2,5	31,0	11,1 <sup>b</sup>	48,2	6,9
10-20	Agricultura	21	3,7	20,7	8,8 <sup>a</sup>	13,3	3,6
	Floresta	20	0	37,0	16,4 <sup>b</sup>	78,7	8,9
	Gramínea	8	5,8	32,7	15,9 <sup>b</sup>	75,2	8,7
	Pastagem	9	7,0	30,5	13,3 <sup>b</sup>	51,7	7,2
	Mato	62	2,7	52,9	18,2 <sup>b</sup>	140,7	11,9
20-30	Agricultura	21	3,8	15,6	7,4 <sup>a</sup>	9,4	3,1
	Floresta	20	0	26,1	13,6 <sup>b</sup>	56,7	7,5
	Gramínea	8	5,3	31,2	13,5 <sup>b</sup>	65,5	8,1
	Pastagem	9	6,8	30,6	15,1 <sup>b</sup>	57,2	7,6
	Mato	58	0	53,4	15,2 <sup>b</sup>	162,5	12,7

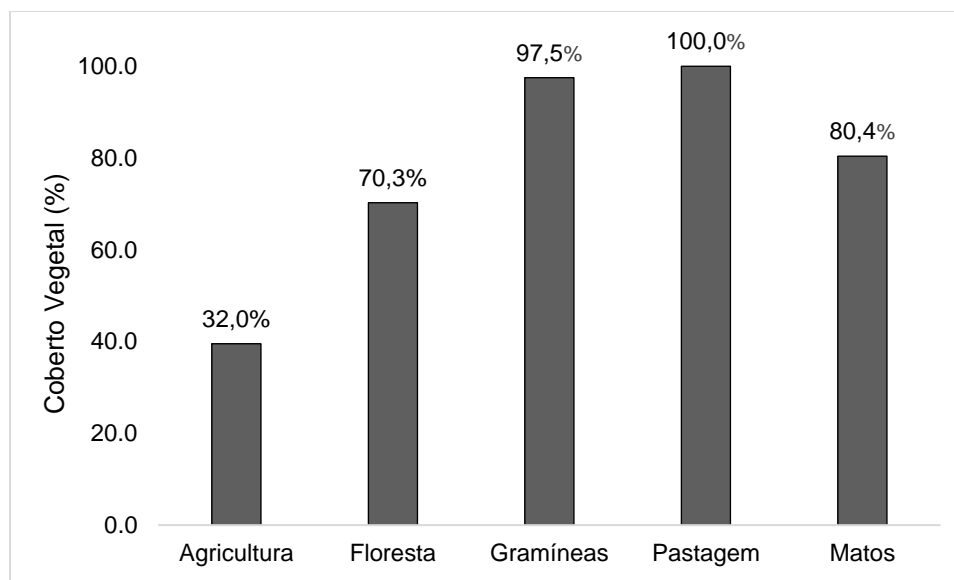
Regra geral, os solos agrícolas possuem menor capacidade de acumulação permanente de carbono, quando comparado com outros sistemas de uso da terra, o que está relacionado com o aumento da mineralização da matéria orgânica, devido às perturbações antrópicas (Freedman, 2005). Também o manejo das florestas, para

evitar a acumulação de resíduos orgânicos na superfície, a fim de prevenir os incêndios, pode ser o motivo de nestes solos o armazenamento de carbono ser idêntico ao observado na maioria dos usos.

Wiesmeier et al. (2012) estudaram 1460 perfis de solo no sudeste da Alemanha com o objetivo de quantificar o carbono armazenado nos solos dos principais usos da região (agricultura, floresta e pastagem), até um metro de profundidade. Concluíram que os solos de pastagem eram os que apresentavam maior quantidade de carbono, seguidos dos solos sob coberto florestal e que os solos agrícolas armazenavam quantidades de carbono significativamente inferiores aos usos citados (floresta e pastagem). Isto corrobora os resultados obtidos no presente estudo, pois para a área do alto rio Sabor as áreas agrícolas também armazenam quantidades de carbono inferiores às dos demais usos (floresta, mato, pastagem e gramíneas).

Yu et al. (2007) investigaram a distribuição do carbono nos solos da China e observaram que a maior densidade média de carbono orgânico aparecia nas zonas húmidas e mais baixas,  $209,9 \text{ t C ha}^{-1}$ , o que pode estar relacionado com a tendência ao acúmulo de matéria orgânica. Porém o valor máximo de densidade foi registado numa área de floresta de coníferas ( $225,9 \text{ t C ha}^{-1}$ ). Diferentemente dos resultados apresentados por estes autores, as pastagens (equivalente às zonas húmidas) e as florestas não possuem os maiores valores de carbono na bacia do alto rio Sabor, estando estes associados às áreas de matos (Tabela 8).

Os solos das pastagens possuem um valor médio de 100% de coberto vegetal, enquanto as áreas agrícolas apresentam o menor valor, 39,5 % (Figura 33). A maior percentagem de coberto vegetal nas pastagens não está associada a maiores quantidades de carbono nas camadas mais superficiais (Tabela 8), o que pode estar relacionado com as perturbações causadas pelo homem e pelos animais nestes sistemas (Fonseca et al., 2012b).



**Figura 33** - Percentagem de coberto vegetal para os diferentes usos do solo amostrados.

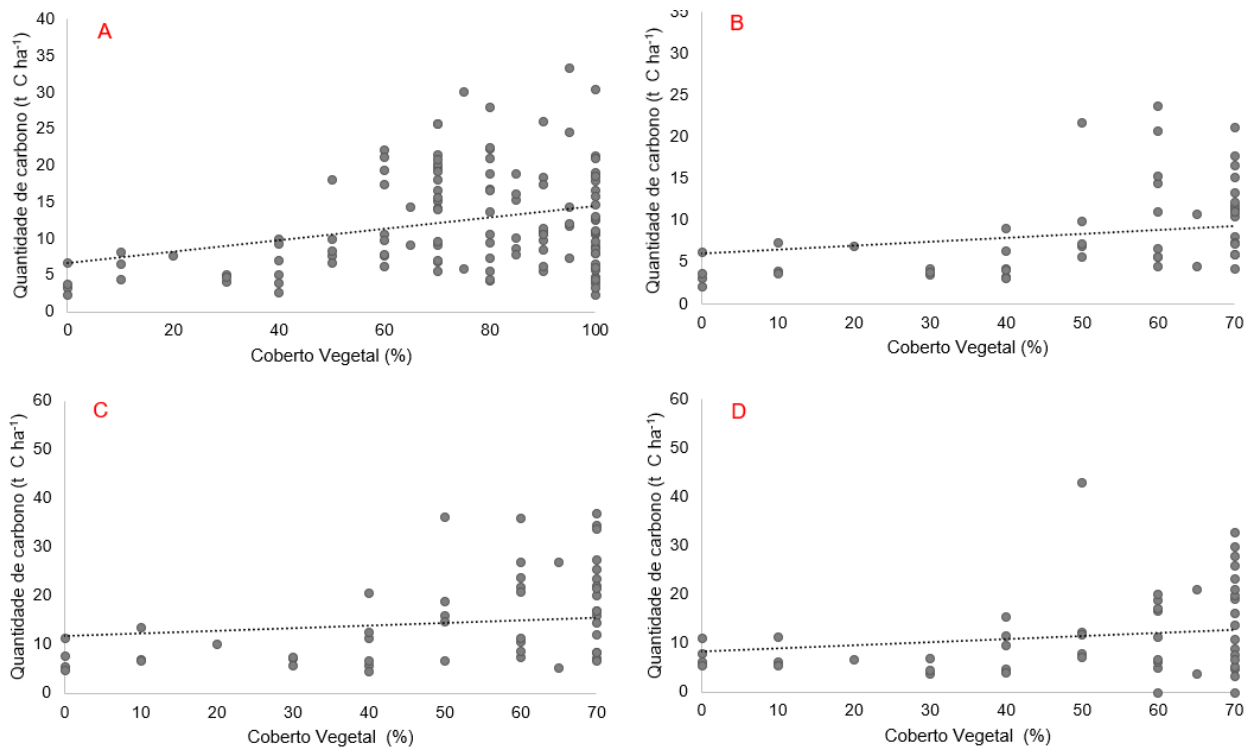
A percentagem de coberto vegetal influencia significativamente a quantidade de carbono presente no solo (Tabela 9), em todas as profundidades analisadas. Com base no valor de  $r^2$  a camada 0-5 cm é a que evidencia a maior influência, verificando-se uma redução dessa influência com a profundidade. No aspecto global (camada de 0-30 cm), se mantém a relação significativa entre a quantidade de carbono, com um valor de  $r^2$  inferior aos das camadas mais superiores.

**Tabela 9** - Resultados dos testes de regressão entre a percentagem de coberto vegetal e a quantidade de carbono presente nas diferentes camadas.

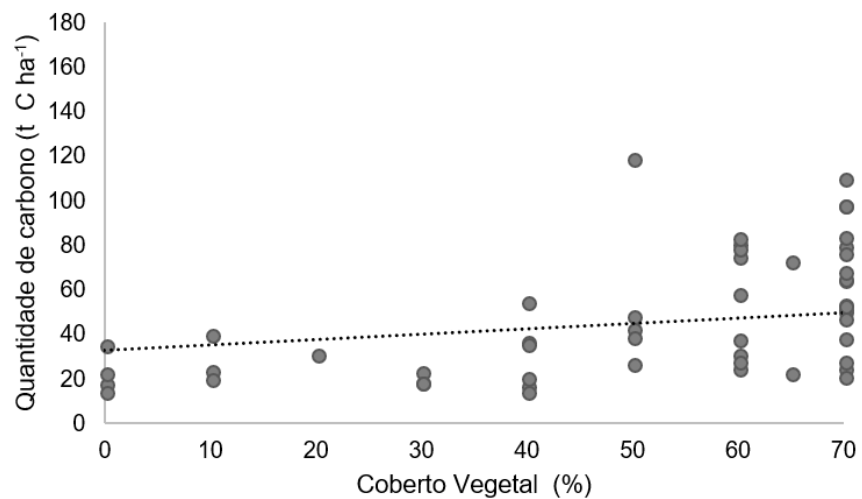
Profundidade (cm)	Regressão	p	$r^2$ (%)
0-5	Geométrica	<0,00001	16,7
5-10	Geométrica	0,0007	9,4
10-20	Geométrica	0,015	4,9
20-30	Geométrica	0,0409	2,7
0-30	Geométrica	0,002	7,4

Em todas as camadas amostradas, observa-se uma tendência de aumento da quantidade de carbono presente no solo com o aumento da percentagem de coberto vegetal, ou seja, ocorre uma relação positiva entre as duas variáveis (Figura 34). Esta constatação também fornece um contributo para explicar os menores valores de carbono nas áreas dedicadas à agricultura, pois são as que mostram menor percentagem de coberto vegetal.

Debarba (2002) estudou o comportamento do carbono orgânico em solos de Erechin e Santo Ângelo, Brasil, e constatou que a redução de entrada de biomassa no solo reflete-se numa diminuição da concentração de carbono orgânico neste. Isto ajuda a explicar a tendência de aumento da quantidade de carbono com o aumento da percentagem de coberto vegetal (Figura 34 e 35).



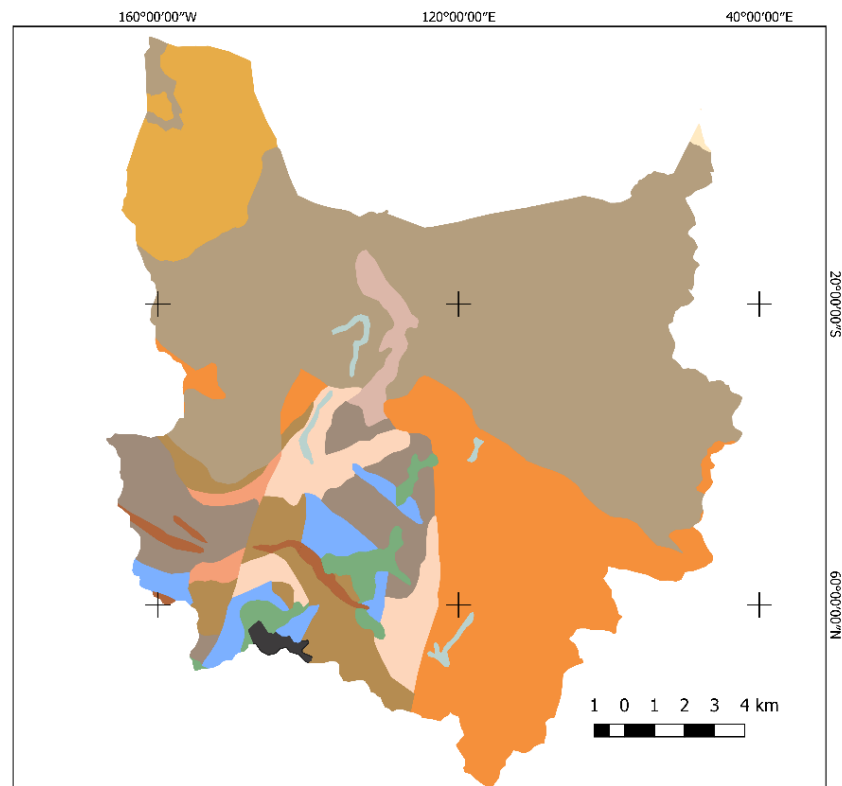
**Figura 34** - Dispersão dos dados da quantidade de carbono nas profundidades 0-5 (A), 5- 10 (B), 10-20 (C) e 20-30 cm (D) em relação à percentagem de coberto vegetal determinado na área de estudo por amostragem.



**Figura 35** - Dispersão dos dados da quantidade de carbono na profundidade de 0-30 cm em relação à percentagem de coberto vegetal determinado na área de estudo por amostragem.

#### 4.2.4 Solos

A área da bacia do Alto Rio Sabor integra treze Unidades Solo diferentes. As que ocupam maior percentagem da área são os Leptossolos úmbricos de xisto (lux) e os Leptossolos dístricos órticos de xisto (ldox), com 44,9 % e 28,8 %, respectivamente (Figura 36).



#### Convenções

- Cambissolos dístricos órticos de depósito sedimentares - Bdos
  - Cambissolos dístricos crómicos de migmatitos e gnaisses blastomiloníticos - Bdxm
  - Cambissolos úmbricos crómicos de xisto - Buxx
  - Leptossolos dístricos órticos de migmatitos - Idom
  - Leptossolos dístricos órticos de xistos - ldox
  - Leptossolos éutricos órticos de rochas básicas - Ieob
  - Leptossolos éutricos órticos de rochas ultrabásicas - Ieou
  - Leptossolos úmbricos de rochas básicas - Iub
  - Leptossolos úmbricos de granitos - Iug
  - Leptossolos úmbricos de xistos - lux
  - Fluvissois dístricos órticos de aluviões - Jdoa
  - Luvissois crómicos de rochas básicas Lxb
  - Alissolos háplicos de sedimentos detríticos - Uhs
  - Urbano
- Projeção Transversa de Mercator  
Datum ETRS89 - Portugal TM06

**Figura 36** - Carta de solos da bacia do Alto Rio Sabor. Fonte: Agroconsultores e Coba (1991).

A colheita das amostras de solo abrangeu nove das unidades solo identificadas, sendo esta colheita mais frequente nos solos que ocupam a maior percentagem da área (lux e ldox). Comparando estes dois tipos de solo, os lux mostram maior quantidade de carbono armazenada, e apresentam diferenças significativas em todas as camadas, com exceção da camada mais superficial (0-5 cm) (Tabela 10).

**Tabela 10** - Estatística descritiva da quantidade de carbono armazenado (t C ha<sup>-1</sup>) nas profundidades amostradas nas diversas Unidades Solo da área de estudo. Letras diferentes associadas à média indicam diferenças significativas entre unidades solo.

Parâmetro	Unidades Solo								
	Bdxm	ldom	ldox	leob	lub	lug	lux	Lxb	Uhs
<b>0-5 cm</b>									
Nº de pontos	9	3	29	9	4	3	53	4	2
Mínimo	2,4	6,3	3,9	3,4	4,4	26,0	4,3	3,3	2,4
Máximo	22,4	13,8	20,3	10,9	7,9	30,1	33,5	12,7	22,1
Média	10,1 <sup>b</sup>	9,2 <sup>ab</sup>	10,1 <sup>b</sup>	6,5 <sup>a</sup>	5,9 <sup>a</sup>	28,0 <sup>c</sup>	15,8 <sup>b</sup>	7,7 <sup>a</sup>	12,3 <sup>b</sup>
Variância	4,3	1,6	1,8	0,6	0,2	0,4	4,2	1,7	19,5
Desvio Padrão	2,1	1,3	1,35	0,7	0,5	0,65	2,1	1,3	4,4
<b>5-10 cm</b>									
Nº de pontos	9	3	29	9	4	3	53	4	2
Mínimo	2,1	3,8	2,5	3,5	3,7	21,3	2,8	3,2	2,2
Máximo	13,6	7,0	15,2	9,0	6,7	30,5	31,0	14,2	14,5
Média	5,7 <sup>a</sup>	5,1 <sup>a</sup>	6,9 <sup>a</sup>	5,4 <sup>a</sup>	5,1 <sup>a</sup>	24,6 <sup>c</sup>	12,6 <sup>b</sup>	6,6 <sup>a</sup>	8,3 <sup>ab</sup>
Variância	1,1	0,3	0,9	0,3	0,2	2,6	3,6	2,6	7,6
Desvio Padrão	1,05	0,5	0,9	0,6	0,4	1,6	1,9	1,6	2,7
<b>10-20 cm</b>									
Nº de pontos	9	3	29	9	4	3	53	4	2
Mínimo	3,7	7,6	2,7	7,1	6,7	25,3	0,0	5,4	5,0
Máximo	14,3	10,3	21,3	15,9	11,4	52,9	48,9	19,7	21,9
Média	9,3 <sup>a</sup>	8,8 <sup>a</sup>	10,9 <sup>a</sup>	9,5 <sup>a</sup>	8,4 <sup>a</sup>	34,8 <sup>c</sup>	21,5 <sup>b</sup>	9,4 <sup>a</sup>	13,4 <sup>a</sup>
Variância	1,3	0,2	2,6	1,0	0,5	24,7	11,6	4,8	14,4
Desvio Padrão	1,1	0,4	1,6	1,0	0,7	4,9	3,4	2,2	3,8
<b>20-30 cm</b>									
Nº de pontos	9	3	29	9	4	3	53	4	2
Mínimo	3,8	5,2	2,1	3,9	4,8	20,0	0,0	3,9	5,4
Máximo	19,9	6,8	15,6	15,5	6,8	43,8	53,4	14,2	16,7
Média	9,8 <sup>a</sup>	6,2 <sup>a</sup>	7,7 <sup>a</sup>	7,8 <sup>a</sup>	5,8 <sup>a</sup>	35,8 <sup>c</sup>	17,9 <sup>b</sup>	7,4 <sup>a</sup>	11,1 <sup>a</sup>
Variância	2,4	0,1	1,2	1,3	0,1	18,8	13,9	2,2	6,4
Desvio Padrão	1,5	0,25	1,1	1,2	0,3	4,3	3,7	1,5	2,5

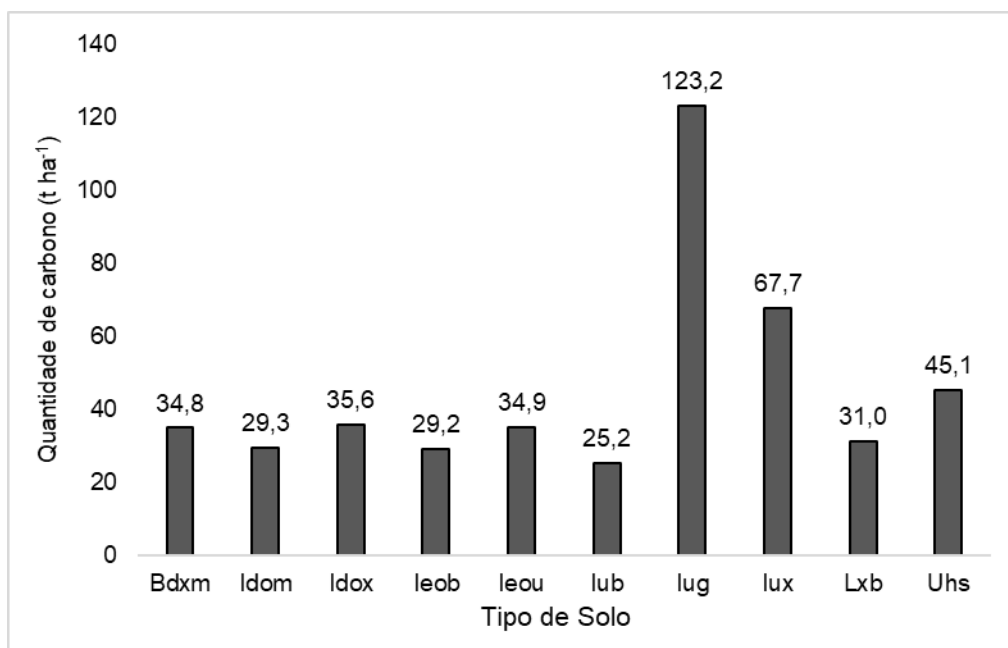
Quando se considera todas as unidades solo, observa-se que os Leptossolos úmbricos de rochas básicas (lub) mostram, tendencialmente, menores quantidades de carbono e os Leptossolos úmbricos de granito (lug) exibem sempre valores significativamente superiores aos restantes (Tabela 10), o que está relacionado com a posição geográfica que ocupam na paisagem e com o uso da terra associado. Os lub aparecem nas zonas mais baixas e são explorados em agricultura, enquanto os lug são os solos representativos das zonas mais altas e estão ocupados por matos (Figura 36) (Fonseca et al., 2012b). De um modo geral, os Leptossolos úmbricos possuem um teor médio/elevado de matéria orgânica no horizonte A, porém a quantidade desta é afetada por diversos fatores ambientais (Figueiredo, 2001). Observa-se uma forte influência das características ambientais sobre a quantidade de carbono no solo. A área a sul da bacia, onde se encontra a maior diversidade de unidades solo (Figura 36), possui menor altitude e usos da terra (Figura 32) que podem causar redução da quantidade de carbono, portanto são as áreas que possuem menores quantidades de carbono no solo.

Srinivasarao et al. (2009) estudaram solos agrícolas em 21 locais da Índia e observaram que a quantidade de carbono armazenada em Cambissolos variava entre 26,7 e 59,7 t C ha<sup>-1</sup>. Na bacia do Alto Rio Sabor amostrou-se um Cambissolo (Cambissolo dístrico crómico de migmatitos; Bdxm), que mostrou um valor de carbono total de 34,8 t C ha<sup>-1</sup> (Figura 37), valor que se encontra dentro do intervalo referido por aqueles autores. Na Amazónia Legal Brasileira, na espessura de um metro, os Cambissolos dístricos mostram uma quantidade média de 77,5 t C ha<sup>-1</sup>, e os Leptossolos dístricos e êutricos possuem 116,1 e 86,2 t C ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Diversos fatores, tais como clima e vegetação pouco perturbada, favorecem o armazenamento de carbono no solo desta região tropical (Moraes et al, 1995). Os Leptossolos úmbricos de granito e xisto (lug e lux), da área de estudo, apresentam quantidades de carbono semelhantes às dos solos amazónicos, com 123,2 e 67,7 t C ha<sup>-1</sup>, nesta ordem, os restantes contêm valores aproximados ou inferiores a 45 t C ha<sup>-1</sup> (Figura 37).

Yu et al. (2007) estudaram a quantidade de carbono armazenado nos solos da China com base num levantamento realizado na década de 80, na profundidade de um

m. Referem que para toda a área a quantidade média de carbono orgânico no solo é de 96,0 t C ha<sup>-1</sup>. A maior parte do carbono está armazenado em Cambissolos, que atingem valores da ordem de 102,8 t C ha<sup>-1</sup> e os Histossolos (solos orgânicos) registam os maiores valores, 994,7 t C ha<sup>-1</sup>. Nas bacias hidrográficas do rio Yangtze e do rio Amarelo os Leptossolos armazenam 55,7 e 41,4 t C ha<sup>-1</sup>, respectivamente, e os Luvisolos 142, 1 e 88,0 t C ha<sup>-1</sup>, nesta ordem.

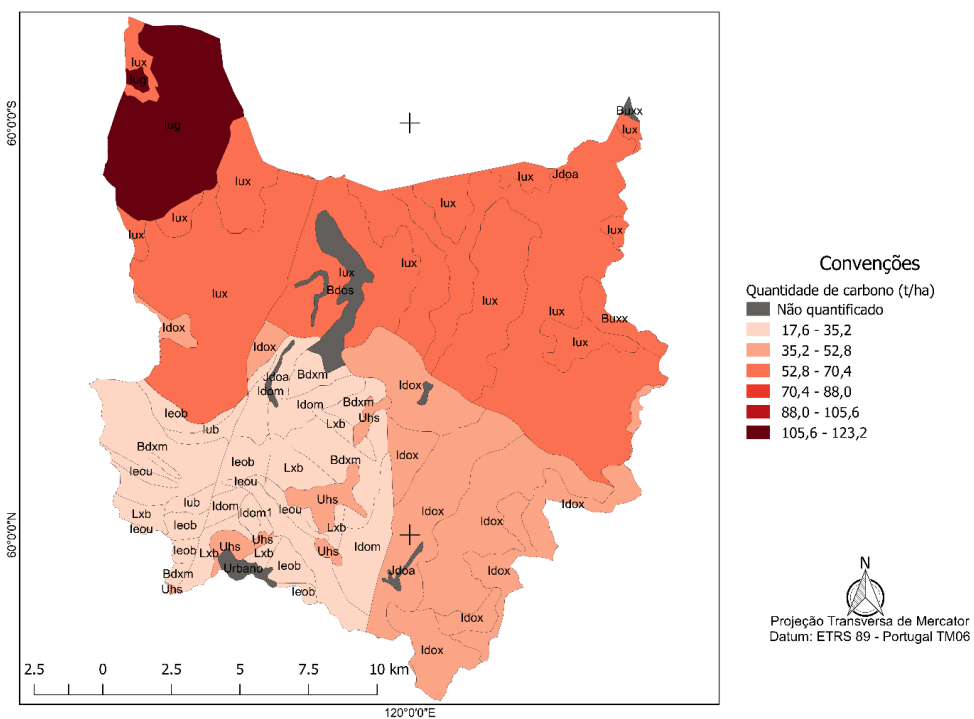
Afonso & Arrobas (2009) estudaram os solos da cidade de Bragança e obtiveram que os Cambissolos e Leptossolos possuem uma capacidade de troca catiónica (CTC) alta a muito alta e média, nesta ordem, e é sabido que a CTC está dependente da presença de matéria orgânica e argila no solo, indicando que estes solos podem apresentar maiores quantidades de carbono. Também observaram uma forte influência de fatores como altitude e uso da terra na distribuição espacial do carbono.



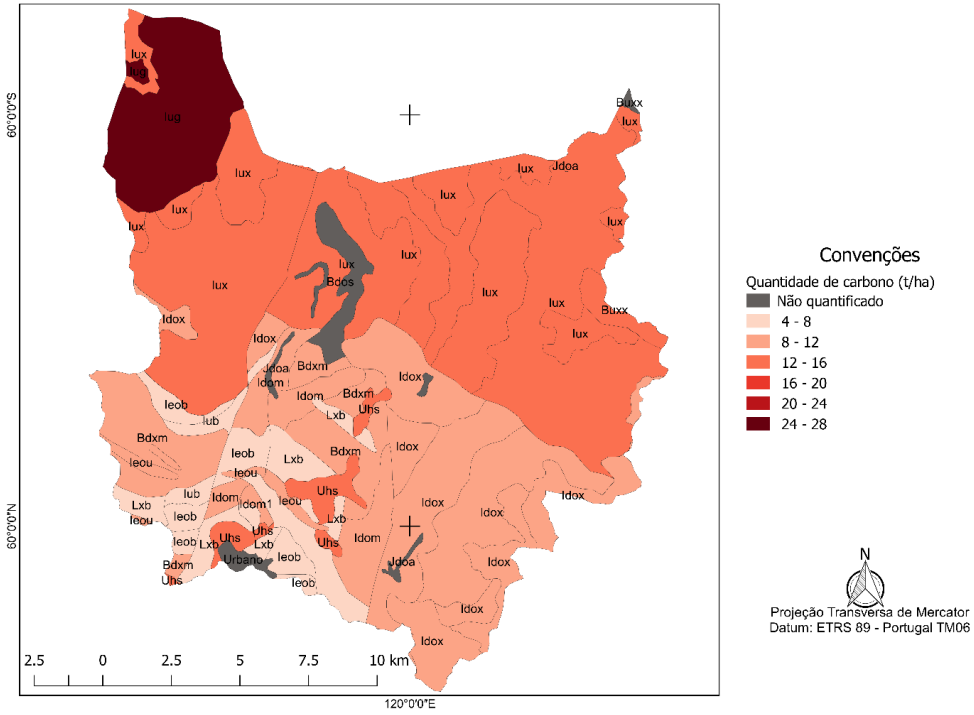
**Figura 37** - Quantidade média de carbono (t C ha<sup>-1</sup>) para as diversas unidades solo na profundidade 0-30 cm.

O efeito do tipo de solo na distribuição média da quantidade de carbono na camada 0-30 cm, bem como em todas as camadas quando consideradas

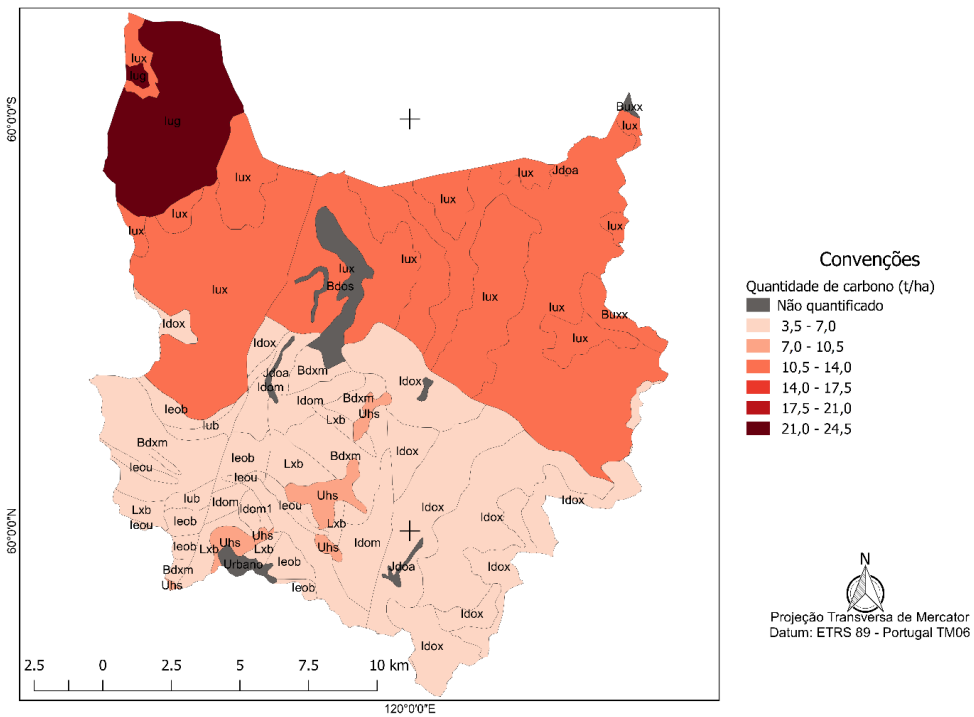
individualmente (0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm), dá-se de forma muito semelhante à obtida a partir da modelação com base nos valores de altitude, ou seja, maiores valores de carbono a norte e menores a sul (Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42). Sabe-se que a distribuição do carbono no solo depende de múltiplas variáveis ambientais, sendo as características do solo importantes nesta distribuição (Fonseca et al., 2012a), mas a altitude é um fator decisivo na explicação da variação do carbono na área de estudo, seguida do uso da terra.



**Figura 38** - Quantidade média de carbono ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) na profundidade 0-30 cm para as diversas unidades solo.



**Figura 39** - Quantidade média de carbono ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) na profundidade 0-5 cm para as diversas unidades solo.



**Figura 40** - Quantidade média de carbono ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) na profundidade 5-10 cm para as diversas unidades solo.



### 4.3 Modelação linear multivariada

Os resultados da regressão linear mostram que todos os modelos testados (ver descrição dos modelos na Tabela 1) se relacionam de forma significativa com a quantidade de carbono do solo na profundidade 0-30 cm. Porém o modelo 4, que inclui os dados de altitude, uso da terra, unidades solo e declive, é o que melhor representa a distribuição do carbono na bacia do Alto Rio Sabor, pois possui o maior valor de  $r^2$  (Tabela 11).

Adicionar a cada modelo uma nova variável (Tabela 1) que se relaciona significativamente com os dados resulta num aumento do  $r^2$  (Tabela 11). O modelo 1, o que utiliza apenas dados relativos à altitude, demonstra que esta variável é a que explica a variação da maior parte dos dados de carbono, pois isoladamente auxilia a explicar quase 36% da variação, e esta importância da altitude se repete em todas as profundidades.

**Tabela 11** - Valores de  $r^2$  e significância obtidos com a aplicação dos modelos de regressão linear múltipla aos dados da quantidade de carbono na camada 0-30 cm de profundidade.

Modelo	$r^2$	Aumento do $r^2$	Significância (p)
1	0,359	0,359	<0,0001
2	0,441	0,083	<0,0001
3	0,478	0,036	<0,0001
4	0,529	0,051	<0,0001

Para o modelo 4 obteve-se os valores dos coeficientes não padronizados no *software* IBM SPSS, e com estes construiu-se a Equação (5). A partir dessa Equação, realizou-se a modelação do carbono para a bacia do Alto Rio Sabor (Figura 43). Verifica-se que, assim como para os resultados da modelação linear univariável com dados da altitude, a região mais a norte é a que possui as maiores quantidades de carbono no solo, este mesmo comportamento deve-se ao fato da maior parte da variação do carbono no solo ser explicada pela altitude.

$$C (t/ha) = 0,089 * a + 5,897 * ut + 3,104 * s - 0,466 * d - 50,308 \quad (5)$$

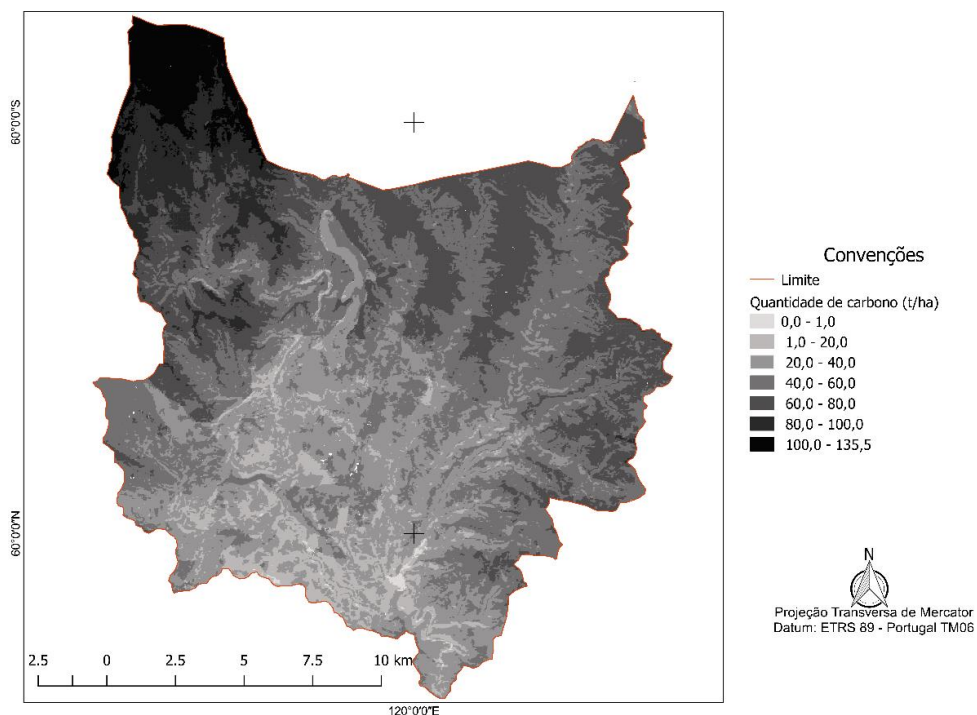
Onde:

a: Altitude (m);

ut: Numeração referente ao uso da terra (Tabela 2);

s: Numeração referente ao solo (Tabela 3);

d: Declive (%).



**Figura 43** – Mapa de distribuição do carbono ( $t C ha^{-1}$ ) na camada 0-30 cm, com base nos resultados da modelação linear multivariada.

O fato deste modelo linear multivariado explicar apenas 53 % da variação da quantidade de carbono presente no solo pode estar relacionado com a necessidade de compreender outros componentes associados à dinâmica da matéria orgânica, pois outros modelos que buscam quantificar a quantidade de carbono no solo consideram características da vegetação e da microbiota. Exemplo do modelo Century 4.0 que foi desenvolvido para quantificar nutrientes presentes nos primeiros 20 cm de solo, que

em suas equações considera aspectos estruturais da biomassa, como teor de celulose e lenhina, atividade microbiana, além de outros fatores ligados à paisagem, como quantidade de argila, limo e areia do solo, temperatura e humidade (Leite & Mendonça, 2013).

Para a profundidade 0-5 cm, dos quatro modelos, apenas o modelo 4 não é significativo, assim como na análise univariável do declive, esta variável não interfere de forma significativa na análise multivariada (Tabela 12). Nota-se para esta profundidade uma grande importância do uso da terra, com base no aumento que este causou no valor de  $r^2$ .

**Tabela 12** - Valores de  $r^2$  e significância obtidos com a aplicação dos modelos de regressão linear múltipla aos dados da quantidade de carbono na camada 0-5 cm de profundidade.

Modelo	$r^2$	Aumento do $r^2$	Significância (p)
1	0,274	0,274	<0,0001
2	0,407	0,133	<0,0001
3	0,461	0,055	<0,0001

Como o modelo 3 apresenta o maior valor de  $r^2$  construiu-se a partir dele a Equação (6). Tal como para os resultados alcançados na profundidade 0-30 cm, a área localizada a norte detém a maior quantidade de carbono no solo e a localizada a sul a menor. Esta variação, para além da influência altitude, está ligada a mudanças no tipo de solo e no uso da terra (Figura 44), relacionando-se com maior intensidade do uso da terra, pois a adição dessa variável ao modelo fez com que o valor de  $r^2$  aumentasse 0,133, enquanto a adição do tipo de solo causou um aumento de apenas 0,055.

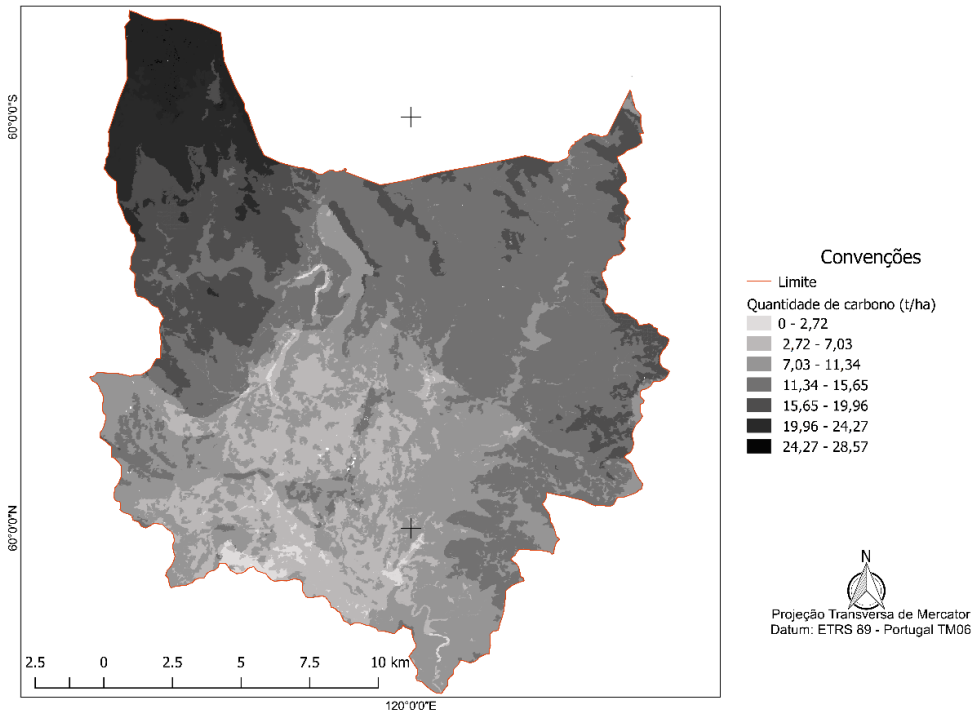
$$C (t/ha) = 0,019 * a + 1,167 * ut + 0,719 * s - 11,289 \quad (6)$$

Onde:

a: Altitude (m);

ut: Numeração referente ao uso da terra (Tabela 2);

s: Numeração referente ao solo (Tabela 3).



**Figura 44** - Mapa da distribuição do carbono ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) na camada 0-5 cm, com base nos resultados da modelação linear multivariada.

Na profundidade 5-10 cm observa-se o mesmo comportamento da camada anterior (0-5 cm), com os maiores valores de carbono localizados a norte e os menores a sul, e sem interferência significativa do declive na distribuição do carbono (Tabela 13). Assim, o modelo 3 é o mais ajustado aos dados desta camada, e a partir dele construiu-se a Equação (7) e realizou-se a modelação da distribuição do carbono (Figura 45). Para esta profundidade o uso da terra é menos representativo que na profundidade anterior, porém esta variável mantém maior relevância quando comparada com o tipo de solo.

**Tabela 13** - Valores de  $r^2$  e significância obtidos com a aplicação dos modelos de regressão linear múltipla aos dados da quantidade de carbono na camada 5-10 cm de profundidade.

Modelo	$r^2$	Aumento do $r^2$	Significância (p)
1	0,280	0,280	<0,0001
2	0,365	0,096	<0,0001
3	0,419	0,058	<0,0001

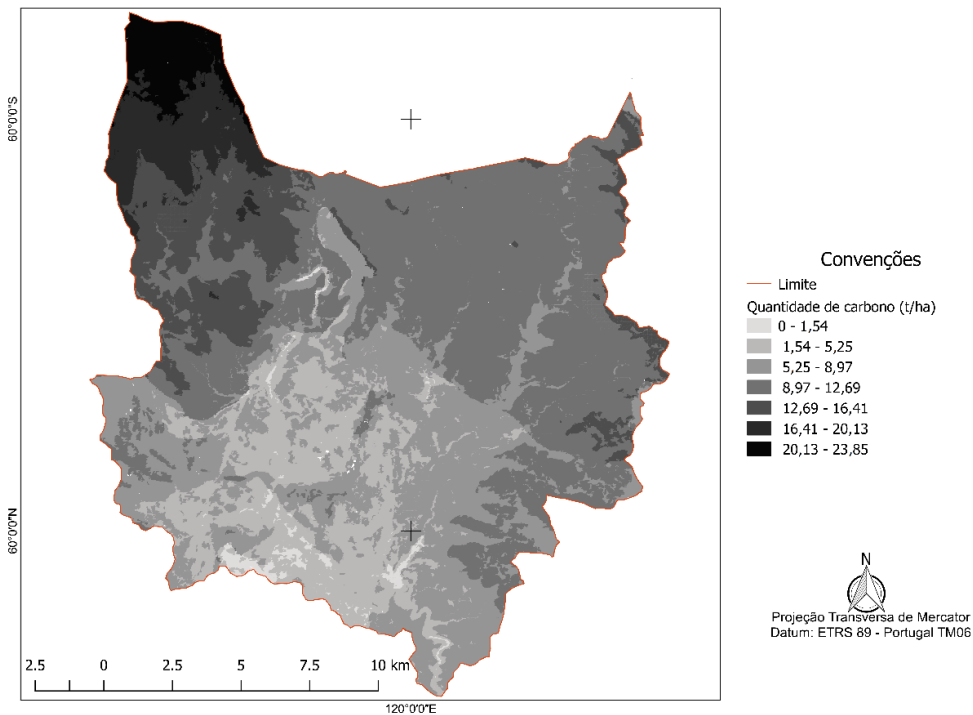
$$C \text{ (t/ha)} = 0,017 * a + 0,797 * ut + 0,647 * s - 10,870 \quad (7)$$

Onde:

a: Altitude (m);

ut: Numeração referente ao uso da terra (Tabela 2);

s: Numeração referente ao solo (Tabela 3).



**Figura 45** - Mapa da distribuição do carbono ( $t \text{ C ha}^{-1}$ ) na camada 5-10 cm, com base nos resultados da modelação linear multivariada.

Na camada 10-20 cm o modelo 4 apresenta o maior valor de  $r^2$ . No modelo de seleção de variáveis *stepwise* o declive nesta profundidade possui uma interferência significativa, com base no valor de F (Tabela 14).

**Tabela 14** - Valores de  $r^2$  e significância obtidos com a aplicação dos modelos de regressão linear múltipla aos dados da quantidade de carbono na camada 10-20 cm de profundidade.

Modelo	$r^2$	Aumento do $r^2$	Significância (p)
1	0,300	0,300	<0,0001
2	0,380	0,080	<0,0001
3	0,424	0,044	<0,0001
4	0,453	0,029	<0,0001

Logo, a partir da obtenção dos coeficientes não padronizados do modelo 4 construiu-se a Equação (8) e realizou-se a modelação da distribuição do carbono em toda a área de estudo. Pode-se notar que mesmo com a adição do declive na Equação algumas características da distribuição do carbono mantêm-se, pois os maiores valores encontram-se a norte e os menores a sul, o que está relacionado com o facto da maior parte da variação da quantidade de carbono ser explicada pela altitude e os efeitos associados a esta, como temperatura e humidade (Fonseca et al., 2012b). A principal alteração na distribuição do carbono verifica-se nas vertentes (efeito declive) (Figura 46).

$$C (t/ha) = 0,027 * a + 1,929 * ut + 0,957 * s - 0,142 * d - 15,505 \quad (8)$$

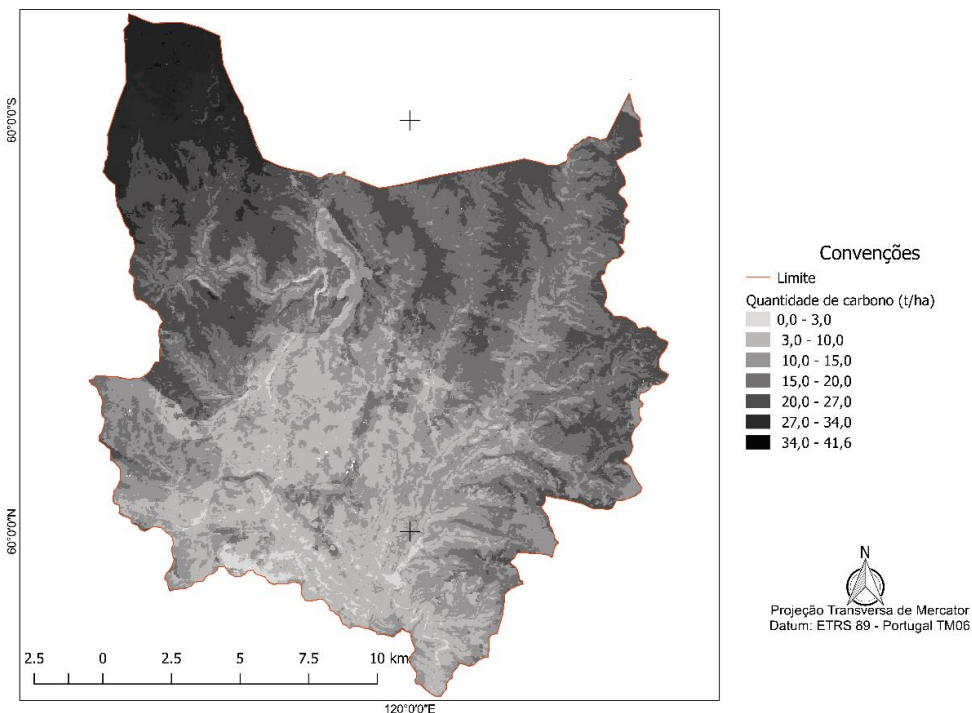
Onde:

a: Altitude (m);

ut: Numeração referente ao uso da terra (Tabela 2);

s: Numeração referente ao solo (Tabela 3);

d: Declive (%).



**Figura 46** - Mapa da distribuição do carbono ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) na camada 10-20 cm, com base nos resultados da modelação linear multivariada.

Assim como na camada 10-20 cm, o modelo 4 ajustou-se com maior qualidade aos dados da profundidade 20-30 cm. Portanto, utilizou-se os valores dos coeficientes não padronizados deste modelo e construiu-se a Equação (9).

Nesta profundidade nota-se uma maior influência do declive na variação dos dados, este causou um incremento no valor de  $r^2$  superior ao causado pelo uso da terra e tipo de solo (Tabela 15).

**Tabela 15** - Valores de  $r^2$  e significância obtidos com a aplicação dos modelos de regressão linear múltipla aos dados da quantidade de carbono na camada 20-30 cm de profundidade.

Modelo	$r^2$	Aumento do $r^2$	Significância (p)
1	0,334	0,334	<0,0001
2	0,356	0,022	<0,0001
3	0,386	0,030	<0,0001
4	0,455	0,070	<0,0001

$$C (t/ha) = 0,029 * a + 1,527 * ut + 0,789 * s - 0,222 * d - 15,196 \quad (9)$$

Onde:

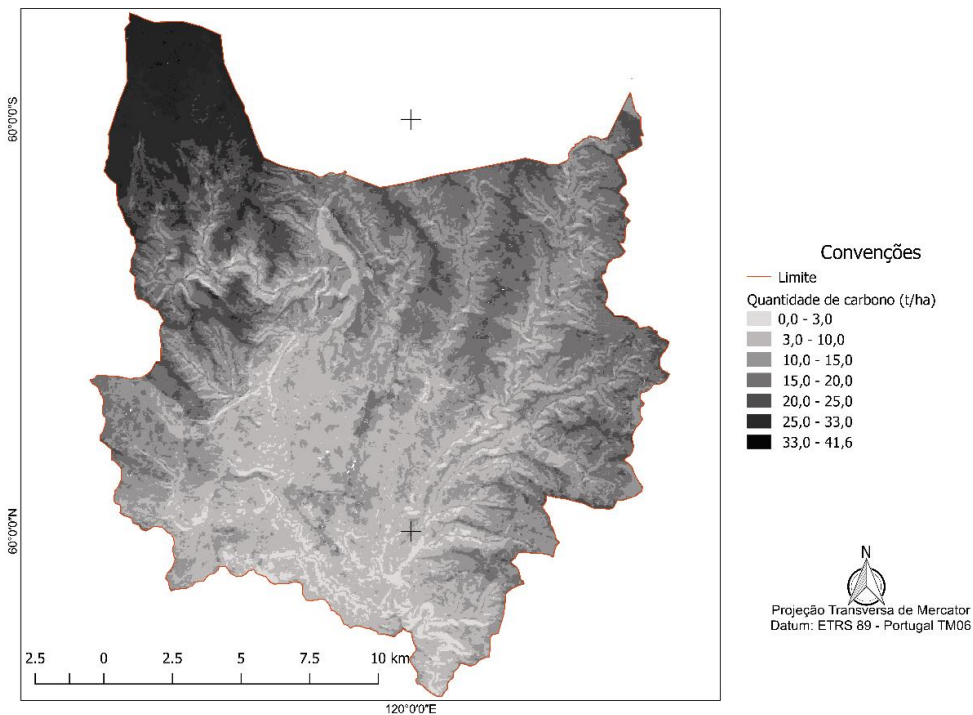
a: Altitude (m);

ut: Numeração referente ao uso da terra (Tabela 2);

s: Numeração referente ao solo (Tabela 3);

d: Declive (%).

Ao modelar a distribuição de carbono a partir da Equação (9) verificou-se o mesmo comportamento registado para as demais camadas de profundidade, porém com uma perceptível interferência do declive na distribuição do carbono, pois as vertentes possuem menor quantidade de carbono armazenado, quando comparado com áreas de topo de morro e planícies de fundo de vale. Porém os maiores valores de carbono mantêm-se a norte e os menores a sul, como reflexo do gradiente de altitude, uso da terra e tipo de solo (Figura 47).



**Figura 47** - Mapa da distribuição do carbono ( $t C ha^{-1}$ ) na camada 20-30 cm, com base nos resultados da modelação linear multivariada.

## 5. Conclusões

Os resultados da distribuição do carbono na bacia do Alto Rio Sabor indicam que o carbono se encontra em maior quantidade na zona norte do território, o que resulta da interferência das variáveis ambientais, pois nesta zona é onde estão localizados os locais de maior altitude e com usos da terra (essencialmente matos e floresta), que favorecem o armazenamento de carbono no solo. A altitude é a variável ambiental que mais influência exerce sobre a distribuição do carbono no solo e o declive, regra geral, não interfere com aquela distribuição.

Os solos localizados abaixo dos 800 m, mostram valores de carbono significativamente inferiores aos que ficam acima dos 1000 m. A faixa entre os 800 e os 1000 m constitui uma zona de transição com valores de carbono estatisticamente idênticos aos encontrados nas altitudes acima e abaixo daquele intervalo.

As áreas de menor declive (inferior a 30%) são as que armazenam maiores quantidades de carbono, porém não mostram diferenças significativas em relação às áreas com declive mais acentuado, com exceção da camada mais profunda (20-30 cm)

Dentre os usos da terra, os matos são os que possuem a maior quantidade média de carbono armazenado no solo, mas apenas com diferenças estatisticamente significativas em relação ao uso agrícola da terra. Mantêm valores idênticos aos observados nos solos de floresta, pastagem e gramíneas.

As unidades de Leptosolos úmbricos de granitos (lug) e de xistos (lux) são as que armazenam maiores quantidades de carbono. Percebe-se que existe uma grande influência do uso da terra e da altitude sobre o armazenamento de carbono no solo, pois a sua distribuição está mais dependente destas duas variáveis, que do tipo de solo.

Os modelos lineares multivariados construídos possuem valores de  $r^2$  superior a 0,419, sendo que o modelo para a profundidade total (0-30 cm) mostra um  $r^2$  de 0,529. Portanto, as variáveis utilizadas nestes modelos estatísticos são componentes da paisagem e tipos à macroescala e explicam parte da distribuição do carbono

armazenado no solo. Para maior exatidão da compressão dessa distribuição existe a necessidade da observação dos componentes à microescala, como a microbiota e as características da biomassa. Observa-se também a necessidade de validação e calibração dos resultados obtidos por este método de modelação, para assim aferir com maior precisão a quantidade de carbono presente na bacia do Alto Rio Sabor.

## Referências

- Afonso, N., Arrobas, M. (2009). Contribuição para a Elaboração da Carta de Solos da Cidade de Bragança. *Livro de Actas, Qualidade do Ambiente Urbano: Novos Desafios*, Instituto Politécnico de Bragança: 136 – 142.
- Agroconsultores & Coba. (1991). Carta dos Solos do Nordeste de Portugal (*Soil Map of Northeast Portugal*). UTAD. Vila Real.
- Andrade, D. C., Romeiro, A. R. (2009). Capital natural, serviços ecossistêmicos e sistema econômico: rumo a uma “Economia dos Ecossistemas”. *Texto Para Discussão*. IE/UNICAMP, Campinas, v. 1, n. 159, p.1-23.
- APA. (2012). Roteiro nacional de baixo carbono: análise técnica das opções de transição para uma economia de baixo carbono competitiva em 2050. Agência Portuguesa do meio. Alfragide, Portugal. Retirada em janeiro 26, 2018, de: [https://www.apambiente.pt/\\_zdata/DESTAQUES/2012/RNBC\\_COMPLETO\\_2050\\_V04.pdf](https://www.apambiente.pt/_zdata/DESTAQUES/2012/RNBC_COMPLETO_2050_V04.pdf)
- APA. (2017). Emissões de CO2 decorrentes dos incêndios em Portugal. Retirada em janeiro 15, 2018: <[https://apambiente.pt/\\_zdata/DESTAQUES/2017/Nota\\_Emissoes\\_CO2\\_Pos\\_Incendios\\_30.10.2017.pdf](https://apambiente.pt/_zdata/DESTAQUES/2017/Nota_Emissoes_CO2_Pos_Incendios_30.10.2017.pdf)>.
- Ayres, M., Jr. Ayres, M., Ayres, D. L., Santos, A. d. A. S. d., Ayres, L. L. (2007). *BioEstat: Aplicações Estatísticas nas áreas das ciências Bio-médicas*. Belém, PA, Brasil.
- Bompastor, A., Figueiredo, T. de, Fonseca, F. (2009). Matos do Parque Natural de Montesinho, NE de Portugal – produção de serviços ecossistêmicos. Em: *1º Congresso de desenvolvimento regional de Cabo Verde, 2º Congresso Lusófono de Ciência Regional, 15º Congresso da APDR e 3º Congresso de Gestão e Conservação da Natureza*, 338 – 364. Retirada em abril 23, 2018, de: <http://www.apdr.pt/congresso/2009/pdf/Sess%C3%A3o%205/278A.pdf>
- Carvalho, J. L. N., Cerri, C. E. P., Cerri, C. C. (2009). SPD aumenta sequestro de carbono pelo solo. *Visão Agrícola*, 9, p. 132-135.
- Conforti, M., Lucà, F., Scarciglia, F., Matteucci, G., Buttafuoco, G. (2016). Soil carbon stock in relation to soil properties and landscape position in a forest ecosystem of southern Italy (Calabria region). *Catena*, 144: 23-33. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.0230341-8162/>

- Correia, A. A. D. (1986). *Bioquímica nos solos, nas pastagens e forragens*. Porto: Fundação Calouste Gulbenkian. 787 p.
- Debarba, L. (2002). Simulação Pelo Modelo Century Do Impacto Da Agricultura No Estoque De Carbono Orgânico De Solos Do Planalto Rio-Grandense. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10183/2416>
- DGT, Diretório Geral do Território. (2006). Carta Administrativa Oficial de Portugal. Retirada em janeiro 15, 2018: [http://www.dgterritorio.pt/cartografia\\_e\\_geodesia/cartografia/carta\\_administrativa\\_oficial\\_de\\_portugal\\_\\_caop\\_/caop\\_em\\_vigor/](http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal__caop_/caop_em_vigor/)
- Dlugokencky, E., Tans, P. (2017). Recent global CO<sub>2</sub>. NOAA/ESRL. Retirada em março 5, 2018, de: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>
- Dukier, S. W., Rethon, F. E., Torrent, J., Smeck, N. E., Lal, R. (2003). Iron hydroxide crystallinity effects on soil aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, v. 67, p. 606-611.
- Figueiredo, T. de, Fonseca, F., Hernández, Z. (2015). Uso da terra e riscos de degradação do solo no Nordeste de Portugal: mudanças nas últimas décadas. *Anais do Encontro Anual das Ciências do Solo – 2015*, Castelo Branco, Portugal, 63-69. Retirada em abril 23, 2018, de: <http://hdl.handle.net/10198/14842>
- Figueiredo, T. de. (2001). Uma panorâmica sobre os recursos pedológicos do nordeste transmontano. *II Seminário dos Recursos Naturais do Nordeste Transmontano*, Bragança: 4-11.
- Fonseca, F., Figueiredo, T. 2012. Carbon in soils of Montesinho Natural Park, Northeast Portugal: preliminary map-based estimate of its storage and stability. *Spanish Journal of Rural Development* Vol. III (1), 71-78.
- Fonseca, F., Figueiredo, T., Ramos, M.A.B., 2012a. Carbon storage in the Mediterranean upland shrub communities of Montesinho Natural Park, northeast of Portugal. *Agroforestry Systems* 86, 463-475.
- Freedman, B. (2005). *Environmental Ecology: The ecological effects of pollution, disturbance, and other stresses*. 2. ed. Estados Unidos da América: Academic Press.
- Garrana, R. E. (2011). *Avaliação do êxito do Protocolo de Quioto em Portugal* (Dissertação de Mestrado não publicada). Instituto Superior de Economia e

Gestão - Universidade Técnica de Lisboa. Retirada em janeiro 15, 2018, de: <https://www.iseg.ulisboa.pt/aquila/getFile.do?fileId=245492&method=getFile>.

- Grujter, J., Brus, C., Bierkens, M., Knotters M. (2006). Sampling for natural resource monitoring. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- IPB/ICN (2007). Plano de Ordenamento do Parque Natural de Montesinho – Estudo de Caracterização. Bragança.
- IPB/ICN (2007). Plano de Ordenamento do Parque Natural de Montesinho – Relatório. Bragança.
- ISO. (1995). Soil quality – determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis), International Standard ISO 10694. Geneva (Switzerland). International Organization for Standardization.
- Kiehl, E. J. (1979). Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: Agronômica Ceres, 262 p.
- Koe, T. D. (1988). Flora e vegetação da bacia superior do rio Sabor no Parque Natural de Montesinho. Bragança: Serviços Gráficos do I.P.B., 47 p. (Estudos). Depósito legal nº 190048/1987.
- Lal, R. (1997). Soil processes and greenhouse effect. In: Lal, R., Blum, W. H., Valentine, C., Stewart, B. A. (Ed.). Methods for assessment of soil degradation. Boca Raton: CRC Press, p. 199-212. (Advances in Soil Science, 9).
- Lal, R. (2006). Influence of soil erosion on carbon dynamics in the World. In: Roose, E. J., Lal, R., Feller, C., Barthès, B., Stewart, B.A. Soil erosion and Carbon Dynamics. Boca Raton: CRC Press. Cap. 3. p. 23-35.
- Lal, R. (2007). Carbon management in agricultural soils. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 12 (2): 303-322.
- Lashof, D. a, & Ahuja, D. R. (1990). Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming. Nature. <https://doi.org/10.1038/344529a0>
- Leifeld, J., Bassin, S., Fuhrer, J. (2005). Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. Agriculture, Ecosystems and Environment, 105: 255-266. doi:10.1016/j.agee.2004.03.006
- Leite, L. F. C., & Mendonça, E. de S. (2003). Modelo Century de dinâmica da matéria orgânica do solo: equações e pressupostos. *Ciência Rural*: 33(4), 679–686.

<https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000400015>

- Lewandowski, A. (2002). *Organic matter management*. University of Minnesota Extension. Retirada em janeiro 15, 2018, de: <<https://www.extension.umn.edu/agriculture/soils/soil-properties/soil-management-series/organic-matter-management/>>.
- Machado, P. L. O. D. A. (2005). Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Quimica Nova*, 28(2), 329–334. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000200026>
- Manfrinato, W.; Piccolo, M. De C.; Cerri, C. C.; Bernoux, M.; Cerri, C. E. P. (2002). Monitoring carbon stocks in soil of a forest-pasture chrono sequence and determining its origin with isotope technology in Guaraqueçaba (PR), Brazil. In: *International Symposium on Forest Carbon Sequestration And Monitoring, 2002, Taipei*. Proceedings... Taipei: Taiwan Forest Research Institute, p. 142-153.
- Martins, C. R., Pereira, P. A. de P., Lopes, W. A., & Andrade, J. B. de. (2003). Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: a Importância na Química da Atmosfera. *Caderno Temáticos de Química Nova Na Escola*, 5, 28–41.
- Moraes, J. L., Cerri, C. C., Melillo, J. M., Kicklighter, D., Neill, C., Skole, D. L., Steudler, P. A. (1995). Soil Carbon Stocks of the Brazilian Amazon Basin. *Soil Sci. Soc. Am. L.*, 59: 244-247.
- Pacheco, R. P. D. S., & Helene, M. E. M. (1990). Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO<sub>2</sub>. *Estudos Avançados*, 4(9), 204–220. <https://doi.org/10.1590/S0103-40141990000200010>
- Paula, T. A., Valle, C. M. (2007) Quantificação do estoque de carbono no solo e a mitigação da mudança climática. In: *Congresso De Pesquisa E Inovação Da Rede Norte Nordeste De Educação Tecnológica*, 2., 2007, João Pessoa: Cefet-PB.
- Percival, H. J., Parfitt, R. L., Scott, N. A. (2000). Factors controlling soil carbon levels in New Zealand Grasslands is clay content important? *Soil Sci Soc America J.* 64:1623– 1630.
- Petrokofsky, G., Kanamaru, H., Achard, F., Goetz, S. J., Joosten, H., Holmgren, P., ... Wattenbach, M. (2012). Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.1186/2047-2382-1-6>

- Pinheiro, H. M. P. (2009). Alteração do uso do solo e *stocks* de carbono na freguesia de Deilão, Bragança. Dissertação de Mestrado para obtenção do título de mestre em Gestão de Recursos Florestais, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal. 59 p.
- Qing-quan, L., Li, C., Jia-chun, L. (2001). Influences os slope gradient on soil erosion. *Applied Mathematics and Mechanics*, English Edition, 22 (5): 510-519. <https://doi.org/10.1023/A:1016303213326>
- Resck, D. V. S., Ferreira, E. A. B., Figueiredo, C. C., Zinn, Y. L. (2008) Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: Santos. G. De A., Silva, L. S. Da, Canellas, L. P., Camargo, F. De O. (Ed.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole. Cap. 21, p. 359-417.
- Riebeek, H. (2011). The Carbon Cycle. NASA - Earth Observatory. Retirada em janeiro 15, 2018: <<https://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/>>.
- Robert, M. (2006). Global Change and Carbon Cycle: The position of Soils and Agriculture. In: Roose, E. J., Lal, R., Feller, C., Barthès, B., Stewart, B.A. Soil erosion and Carbon Dynamics. Boca Raton: CRC Press. Cap. 1. p. 3-12.
- Rosa, R. S., Messias, R. M., & Ambrozini, B. (2003). Importância da compreensão dos ciclos biogeoquímicos para o desenvolvimento sustentável. São Carlos: Instituto de Química de São Carlos - USP. Retirada em janeiro 15, 2018, de: <http://www.iqsc.usp.br/iqsc/servidores/docentes/pessoal/mrezende/arquivos/EDUC-AMB-Ciclos-Biogeoquimicos.pdf>
- Roscoe, R. (2003). Rediscutindo o papel dos ecossistemas terrestres no sequestro de carbono. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, Brasília, 20(2): 209-223, ago. 2003. Retirada em janeiro 15, 2018, de: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/88882/1/v20n201.pdf>>
- Shaheen, H. Saeed, Y. Abbasi, M. K. Khaliq, A. (2017). Soil Carbon Stocks Along an Altitudinal Gradient in Different Land-Use Categories in Lesser Himalayan Foothills of Kashmir. *Eurasian Soil Scienci*, 50(4): 432-437. Retirada em abril 15, 2018, de: <https://link.springer.com/article/10.1134/S106422931704010X>
- Silva, I. R., Medonça, E. S. (2007) Matéria orgânica do solo. In: Novais, R. F., Alvarez V., V. H., Barros, N. F. D., Fontes, R. L. F., Cantarutti, R. B., Neves, J. C. L. (Ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 275-375.

- Simegn, T. Y., Soromessa, T. (2015). Carbon Stock Variations Along Altitudinal and Slope Gradient in the Forest Belt of Simen Mountains National Park, Ethiopia. *American Journal of Environmental Protection*, 4(4): 199-201. Doi: 10.11648/j.ajep.20150404.15
- Smith, J. S., Halvorson, J. J., Bolton Jr., H. (2002). Soil properties and microbial activity across a 500 m elevation gradient in a semi-arid environment. *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 1749-1757.
- Smith, T. M., Cramer, W. P., Dixon, R. K., Leemans, R., Neilson, R. P., & Solomon, A. M. (1993). The global terrestrial carbon cycle. *Water, Air, & Soil Pollution*, 70(1-4), 19-37. <https://doi.org/10.1007/BF01104986>
- Srinivasarao, C., Vittal, K. P. R., Venkateswarlu, B., Wani, S. P., Sahrawat, K. L., Marimuthu & Sumanta Kundu, S. (2009). Carbon Stocks in Different Soil Types under Diverse Rainfed Production Systems in Tropical India. *Soil Science and Plant Analysis*, 40:15-16, 2338-2356, DOI: 10.1080/00103620903111277
- Stevenson, F. J., Cole, M. A. (1999). *Cycles of Soil*. 2. ed. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, Inc., 427 p.
- Stevenson, W. J. (1981). *Estatística Aplicada à Administração*. São Paulo: Harper.
- Tate, K. R., Giltrap, D. J., Claydon, J. J, Newsome, P. F., Atkinson, I. A. E., Taylor, M. D., Lee, R. (1997). Organic carbon stocks in New Zealand's terrestrial ecosystems. *Journal of the Royal Society of New Zealand*. 27:315-335.
- USGS, U.S. Geological Survey. (2014). EarthExplorer – Entity ID SRTM1N41W007V3. Retirada em fevereiro 15, 2018, de: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vijayavenkataraman, S., Iniyan, S., Goic, R. (2012). A review of climate change, mitigation and adaptation. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 16(1): 878-897. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.009>.
- Watson, R. T., Core Writing Team (Ed.). (2001). *Climate change 2001: synthesis report: third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge: IPCC: Cambridge University Press, 397 p.
- Watson, R. T.; Noble, I. R.; Bolin, B.; Ravindranath, N. H.; Verardo, D. J.; Dokken, D. J. (2000). *Land use, land-use change, and forestry: a special report of the IPCC*. Cambridge: IPCC: Cambridge University Press, 377 p.

- Wiesmeier, M., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Haug, S., Reischl, A., Schilling, B., Lützow, M. von., Kögel-Knabner, I. (2012). Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. *Global Change Biology*, 18: 2233–2245, doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02699.x
- Yu, D. S., Shi, X. Z., Wang, H. J., Sun, W. X., Chen, J. M., Liu, Q. H., Zhao, Y. C. (2007). Regional patterns of soil organic carbon stocks in China. *Journal of Environmental Management*, 85: 680 – 689. doi:10.1016/j.jenvman.2006.09.020