

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SEQUESTRO FLORESTAL DE CARBONO DE MATAS RIPÁRIAS EM ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE COM O USO DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

ASSESSING THE POTENTIAL OF FOREST CARBON SEQUESTRATION IN RIPARIAN FORESTS IN PERMANENT PRESERVATION AREAS USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS)

Roseli Mendonça Dias

Mestra em Engenharia Urbana,
Universidade Federal de São
Carlos São Carlos, SP, Brasil

roosemendonca@hotmail.com

Nemésio Neves Batista

Salvador

Doutor em Engenharia Hidráulica
e Saneamento, Universidade
Federal de São Carlos, São Carlos,
SP, Brasil

nemesio@ufscar.br

Magno Botelho Castelo

Branco

Doutor em Ecologia e Recursos
Naturais, Iniciativa Verde, São
Paulo, SP, Brasil

magno@iniciativaverde.org.br

Renato Miazaki de Toledo

Doutorando em Ecologia,
Universidade de São Paulo, São
Paulo, SP, Brasil

rmt@usp.br

RESUMO

O sequestro florestal de carbono é um incentivo aos projetos de restauro florestal das matas ripárias degradadas. O objetivo desse trabalho é determinar o potencial de sequestro florestal de carbono de matas ripárias em Áreas de Preservação Permanente (APPs), classificando a vegetação existente e estimando a biomassa florestal acima do solo por meio de modelo com a utilização de Sistema de Informações Geográficas (SIG). A metodologia empregada no trabalho consistiu na aplicação de um modelo para determinação do Índice de Biomassa Potencial (IBP) e na estimativa da densidade de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Para APPs com vegetação classificada como categoria arbóreo fechado, foi encontrado um potencial de 175,43tCO₂e/ha; para APPs de categoria arbóreo-arbustivo aberto, foi encontrado um potencial de 212,97tCO₂e/ha; e para APPs de categoria herbáceo predominante, foi encontrado um potencial de 243,80tCO₂e/ha. Concluiu-se que com o restauro florestal dessas APPs, as florestas ainda jovens e degradadas sequestrarão uma quantidade significativa de carbono até atingir o porte máximo.

Palavras-chave: Mata Ripária, Sistema de Informações Geográficas, Sequestro Florestal de Carbono.

ABSTRACT

Forest carbon sequestration is an incentive for forest restoration projects of degraded riparian forests. The purpose of this work is to determine the potential of riparian forests forest carbon sequestration in Permanent Preservation Areas (PPAs), by classifying the existing vegetation and estimating forest biomass above the ground by means of a model which uses Geographic Information System (GIS). The methodology used in this work consists in applying a model for determining the Potential Biomass Index (PBI) and in estimating the density of equivalent carbon dioxide (CO₂e). For PPAs with vegetation classified as closed arboreal category, it was found a potential of 175,43tCO₂e/ha; for the category open shrubby-tree, it was found a potential of 212.97tCO₂e/ha; and for predominant herbaceous category, it was found a potential of 243,80tCO₂e/ha. In conclusion, with the reforestation of these PPAs, the forests still young and degraded will sequester a significant amount of carbon until they reach the maximum size.

Keywords: Riparian Forest, Geographic Information System, Forestry Carbon Sequestration.

INTRODUÇÃO

A estimativa da biomassa das florestas é realizada por meio dos componentes das árvores, e é expressa em peso seco por unidade de área [1].

Medições de campo, modelagem ou ambos os métodos estão sendo utilizados para estimar a biomassa viva acima do solo, em florestas de grande extensão [2].

Inventários florestais consistem em medições de altura e diâmetro à altura do peito das árvores em seções em uma área escolhida. Esses dados são extrapolados para toda a área, mas não incluem a heterogeneidade da paisagem. A escolha de um modelo baseado em SIG permite a incorporação da heterogeneidade espacial no processo de crescimento vegetal, resultando em dados mais confiáveis [3].

A estimativa da quantidade de biomassa vegetal potencial acima do solo depende das condições climáticas, topográficas e edáficas e não depende de atividades antrópicas [3].

Para o cálculo do potencial de fixação de CO₂ pelas florestas, dados de biomassa são indispensáveis [4].

A fixação de carbono pelas florestas pode dar suporte a programas de reflorestamento no Estado de São Paulo, tendo em vista um possível financiamento desses projetos por meio da venda de Reduções de Emissões Certificadas (RECs) [5].

Assim, os proprietários rurais nas bacias do Estado poderiam desenvolver projetos de restauro florestal das matas ripárias degradadas, onde a geração dos créditos de carbono arcaria parcialmente com as despesas desses projetos.

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é determinar o potencial de sequestro florestal de carbono para matas ripárias em APPs.

Para o conhecimento do potencial de sequestro florestal de carbono pelas matas ripárias como incentivo ao restauro florestal dessas matas por seus proprietários rurais, fez-se uso de técnicas de geoprocessamento por meio de SIG. Essas técnicas permitiram o estudo do potencial de sequestro florestal de carbono das matas ripárias em APPs rurais da Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré (BHTJ) no município de São Carlos, haja vista que a grande maioria das matas ripárias em APPs urbanas foram suprimidas para canalização dos cursos d'água.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

A área de estudo escolhida foi a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê-Jacaré (UGRHI 13) dentro do município de São Carlos. O município de São Carlos localiza-se no centro do estado de São Paulo, o qual está contido na UGRHI 13 e na UGRHI 9 (Mogi-Guaçu), sendo 39,35% do território situado na UGRHI 13, e 60,65% na UGRHI 9 [6] (Figura 1).

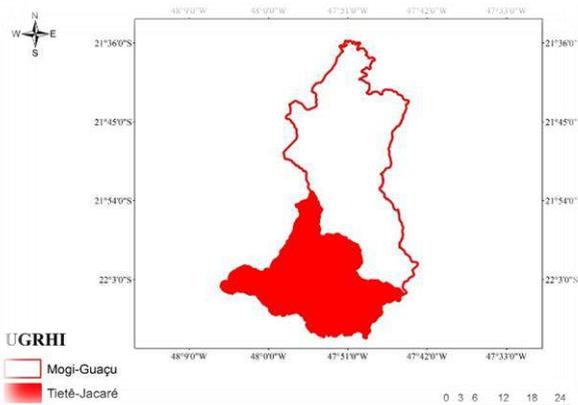


Figura 1 - Bacias Hidrográficas pertencentes ao município de São Carlos – SP.

O município possui uma população de 221.950 habitantes, sendo a população residente urbana 213.061 habitantes e a população residente rural 8.889 habitantes em uma área de 1.137,332Km² [7].

O município de São Carlos está localizado na província geomorfológica das Cuestas Basálticas [8] e seu clima é do tipo Cwa, conforme a classificação de Koeppen, apresentado inverno seco e verão chuvoso. A precipitação média é de 1422,8mm e a temperatura média anual é de 21.2°C, com a máxima média mensal 23°C nos meses de janeiro e fevereiro e a mínima média mensal 18°C no mês de julho [9].

As florestas: semi-decídua e ripária, cerrado e cerradão formam a vegetação do município [10-11]. Os principais tipos de uso do solo são: agricultura, reflorestamento e mineração.

Índice de Biomassa Potencial

O Índice de Biomassa Potencial (IBP) foi baseado no modelo de Iverson *et al.* [3] e pelas adaptações desse modelo por Martins *et al.* [12] para o estado de São Paulo. Posteriormente foi estimada a densidade de CO₂e

em toneladas por hectare (t/ha), pelo restauro florestal das matas ripárias da BHTJ no município de São Carlos.

No modelo foram atribuídos índices a dados de solo, pluviosidade, Índice Climático Modificado de Weck (ICMW) e topografia, utilizando a Equação 1 [3]. Para cada uma dessas quatro camadas consideradas foi atribuído um índice com valor de 25 pontos, totalizando 100 pontos no modelo para gerar um mapa de densidade de biomassa potencial.

$$IBP=I(ICMW)+I(pluviosidade)+I(topografia)+I(solos) \quad (1)$$

Para a execução deste trabalho o *software* utilizado foi o ArcGIS 10 [13].

Para a camada solos, a qual considera textura e fertilidade, o arquivo digital, em formato *shape*, contendo as classes de solo encontradas no município de São Carlos foi disponibilizado pela Professora Adriana Pires do Departamento de Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

Os dados referentes à pedologia do município foram digitalizados das quadrículas de São Carlos, bBrotas e dDescalvado disponíveis no Levantamento pPedológico sSemidetalhado do Estado de São Paulo do Instituto Agrônomo de Campinas – IAC na escala 1:100.000.

Foram utilizadas as seguintes classes de solos estabelecidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) [14]: Argissolo Vermelho-Amarelo, Gleissolo+Neossolo Flúvico, Latossolo Férrico, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Litólico, Neossolo Quartzarênico e Nitossolo.

Para a classificação da textura foi considerada a fração argila de cada tipo de solo, sendo apresentada por Oliveira e Prado [8] no memorial descritivo do Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo da Quadrícula de São Carlos.

Foram consideradas, portanto, cinco classes de textura distribuídas por tipo de solo: muito arenosa, arenosa, média, argilosa e muito argilosa [14].

A fim de compor as informações dos solos, foi realizada uma classificação da fertilidade para cada tipo de solo, haja vista a variação de fertilidade que ocorre nestes.

Os dados de fertilidade foram determinados a partir da análise dos atributos químicos e da descrição dos solos

contidos em Oliveira e Prado [8]; de informações adquiridas de profissionais da área de fertilidade dos solos que esclareceram a hierarquia dos solos no município quanto à fertilidade; e do mapa de remanescentes de vegetação do município de São Carlos, gerado pelo Departamento de Proteção dos Recursos Naturais (DPRN), na escala 1:50.000, e apresentado por Montañó [15], o qual considera os seguintes tipos de vegetação encontrados no município: cerrado, cerradão, capoeira, mata e vegetação de várzea.

Para este trabalho, apenas os locais de cerrado, cerradão e mata foram levados em conta na determinação da fertilidade, de modo que o arquivo em formato *shape* foi sobreposto com o *shape* de solos. Assim, foi possível identificar qual vegetação está contida em qual tipo de solo, tendo por base que os solos típicos de cerrado apresentam baixa fertilidade comparados aos solos típicos de mata.

Os fragmentos de vegetação remanescentes serviram de base para identificar a fertilidade dos solos, visto que o estoque de biomassa é maior em solos argilosos e de fertilidade alta e menor em solos arenosos e de fertilidade baixa, onde a presença de florestas caracteriza o solo mais fértil, e a presença de cerrado um solo menos fértil [16].

O arquivo digital dos remanescentes de vegetação, em formato *shape*, foi cedido pelo Professor Marcelo Montañó do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Universidade de São Paulo – USP.

Feita a análise dos atributos químicos juntamente com as informações recebidas pelos profissionais da área de solos e dos fragmentos de vegetação encontrados na BHTJ do município de São Carlos, foi possível classificar os solos da área de estudo em quatro classes: muito baixa, baixa, média e alta.

Contudo, considerando a textura e a fertilidade, o melhor tipo de solo contribuiu com 25 pontos e o pior tipo com 5 pontos. A distribuição dos pesos foi realizada por tipo de solo (Tabela 1).

Tabela 3. Distribuição dos pesos por tipos de solos

Solos	Pesos
Argissolo Vermelho-Amarelo	25
Neossolo Litólico	25
Latossolo Férrico	17
Nitossolo	17
Latossolo Vermelho	11
Gleissolo+Neossolo Flúvico	8
Latossolo Vermelho-Amarelo	8
Neossolo Quartzarênico	5

Já a camada referente à topografia é composta pelas variáveis altitude elipsoidal e declividade, sendo os 25 pontos da camada distribuídos em 13 pontos para a altitude e 12 pontos para a declividade.

Para obter a altitude da área de estudo foram utilizados dados de radar, do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), com resolução espacial de 90m, sistema de coordenadas Geográfica e Sistema de Referência WGS-84, quadrículas SF-22-X-D, SF-22-Z-B, SF-23-V-C e SF-23-Y-A do estado de São Paulo, os quais são usados para gerar os Modelos Digitais de Elevação [17].

A classe que se enquadra para a BHTJ no município de São Carlos é a 500 – 1.500m de altitude, com 11 pontos no modelo (Tabela 2) [12-3]. Foi adotada, portanto, essa pontuação para altitude.

Tabela 2. Distribuição dos pesos por altitude

Altitude (m)	Pesos
0 – 15	8
15 – 50	11
50 – 500	13
500 – 1.500	11
>1.500	7

A obtenção da declividade foi através do Modelo Digital de Elevação SRTM.

Iverson *et al.* [3] reportam que em áreas inclinadas podem ser encontrados valores altos de densidade de biomassa, mas ocorre que em áreas planas as densidades médias tendem a ser maiores que os terrenos inclinados.

Desse modo, a distribuição dos pesos ficou com 12 pontos para inclinações baixas e 8 pontos para inclinações elevadas (Tabela 3) [3]

Tabela 3. Distribuição dos pesos por declividade

Declividade (%)	Pesos
0 – 10	12
10 – 20	10
>20	8

A terceira camada que compõe o modelo é o ICMW, desenvolvido por Weck (1961, apud WECK [18]) para determinar a produtividade potencial de florestas na Alemanha com base em dados de clima, o qual não conseguiu testar seu índice. Iverson *et al.* [3] utilizaram tal índice com algumas modificações. Mais tarde, Martins *et al.* [12] usaram uma fórmula mais simples do ICMW (Equação 2).

$$ICMW = \frac{S(P_1 + \sqrt{P_2})(G)}{100(Tm)} \quad (2)$$

Onde:

“S (horas) é o comprimento médio do dia durante a estação de crescimento; P₁ (dm) é o número de meses nos quais a precipitação média anual é inferior a 200 mm; P₂ é o número de meses nos quais a precipitação média anual excede 200 mm; G (meses) é a duração da estação de crescimento, que corresponde ao número de meses sem ocorrência de déficit hídrico e Tm (Celsius) é a temperatura média do mês mais quente da estação de crescimento [12]”.

O arquivo digital, contendo o ICMW utilizado neste trabalho, em formato *raster*, foi o arquivo usado por Martins *et al.* [12], adaptado para a BHTJ no município de São Carlos. As variáveis empregadas foram estação de crescimento, solarimetria e temperatura média do mês mais quente do ano.

A variável estação de crescimento, que considerou os meses sem chuvas, foi obtida pelos autores das cartas do IBGE na escala 1:1.000.000, apresentando cinco grupos:

“Sem seca – ausência de períodos secos, com chuvas durante todo o ano. Subseca – período de seca geralmente inferior a um mês. 1 a 2 meses secos – período de seca entre 1 e 2 meses. 3 meses secos – seca durante 3 meses do ano. 4 a 5 meses secos – 4 a 5 meses sem chuvas [12]”.

Posteriormente, os autores superestimaram os períodos sem chuvas por meio de dados de meses secos, elevando, assim, a confiabilidade do modelo:

“Sem seca – considerado como ausência de déficit hídrico. Subseca – período de déficit equivalente a um mês. 1 a 2 meses secos – déficit equivalente a dois meses. 3 meses secos – 3 meses de déficit. 4 a 5 meses secos – considerado como 5 meses de déficit hídrico [12]”.

Para a variável solarimetria os autores buscaram os dados no Atlas Solarimétrico do Brasil [19], e para a variável temperatura e pluviosidade nas bases disponíveis em [20-21-22-23-24-25].

No modelo de Martins *et al.* [12], adaptado de Iverson *et al.* [3], os valores de ICMW ficaram entre 198 e 1.222, ocupando 25 classes distribuídas pelos 25 pontos. Assim, para a área de estudo da BHTJ os pesos ficaram distribuídos de 8 a 13 pontos [12].

A última camada do modelo é a pluviosidade, na qual o arquivo digital correspondente a ela, em formato *raster*, foi obtido de Hijmans *et al.* [20].

Essa base de dados WorldClim (disponível em <http://www.worldclim.org>) disponibiliza dados de temperatura máxima, média e mínima e precipitação que compõem diversos mapas climatológicos utilizados em modelagens. Uma base que divide o planeta apresentando dados para cada região, excetuando os polos [20].

As classes de precipitação com seus respectivos pesos considerados pelos autores, constam na Tabela 4 [12-3].

Tabela 4. Distribuição dos pesos por precipitação

Precipitação (mm)	Pesos
1.000 – 1.200	11
1.200 – 1.400	13
1.400 – 2.000	16
2.000 – 2.400	19
2.400 – 2.800	22
2.800 – 3.200	25
3.200 – 3.600	22
>3.600	19

Para a área de estudo deste trabalho, cuja precipitação está em torno de 1.400mm [9], foi considerada a classe 1.200 – 1.400mm com 13 pontos no modelo [12-3].

Em seguida foram atribuídos os pontos às camadas e confeccionados os mapas de pesos, em formato raster, correspondentes à cada uma das camadas do modelo.

A soma das camadas resultou no Mapa IBP com os índices de biomassa potencial para a área de estudo.

A calibração do modelo ocorreu com a atribuição de valores médios de biomassa de diferentes formações vegetais, disponíveis na literatura (Tabela 5), aos valores mínimo e máximo da escala de IBP [12]. De acordo com os mesmos autores a partir dessa atribuição, os valores intermediários foram encontrados adotando-se a escala

linear, já que anteriormente os diversos pesos tinham sido fixados para as variáveis.

O Mapa de Densidade de Biomassa Potencial, em t/ha, foi, portanto, confeccionado.

Tabela 5. Valores médios de biomassa encontrados na literatura

Fisionomia	t/há
Campo limpo, campo sujo e campo cerrado	<40
Cerrado strictu sensu, cerrado denso	41 – 120
Cerradão, estacional semidecidual	120 – 220
Estacional semidecidual, ombrófila mista	220 – 300

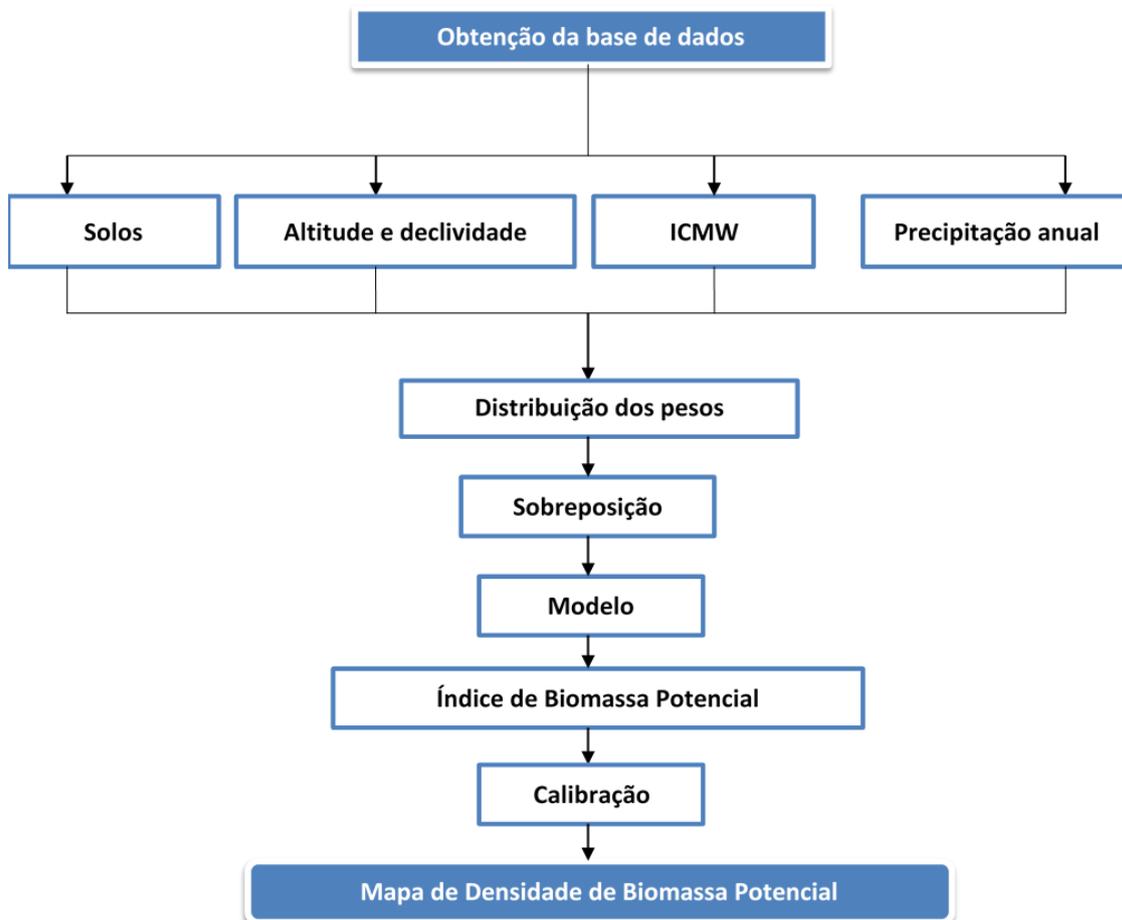


Figura 2 - Fluxograma com as etapas do modelo

Para estimar a densidade de CO₂e das matas ripárias, visto que as RECs são comercializadas em tCO₂e, o Mapa de Densidade de Biomassa Potencial (t/ha) foi

transformado em valores de tC/ha e posteriormente em tCO₂e/ha.

O cálculo do estoque potencial de carbono foi realizado considerando que 47% da biomassa seca é carbono, já para a obtenção dos valores em tCO₂e/ha o teor de carbono foi multiplicado por 3,67 [26].

Para estimar a densidade de CO₂e das matas ripárias em APPs da área de estudo, o Mapa de Densidade de Biomassa Potencial foi sobreposto com o Mapa das Categorias de Degradação das Matas Ripárias elaborado por Dias *et al.* [27]. Desse modo, foram obtidos os valores de biomassa potencial para cada uma das categorias de degradação estabelecidas. As APPs classificadas com suas respectivas categorias que sobrepõem a área nula do IBP não constaram nos cálculos de potencial estimado.

Os valores de biomassa encontrados para as categorias de degradação, portanto, foram convertidos para tC/ha e para tCO₂e/ha.

A fim de obter somente valores do sequestro florestal de carbono líquido potencial, pois são estes valores que interessam no comércio das RECs, foram calculados valores de biomassa por meio da subtração de valores médios atuais de biomassa dos valores de biomassa potencial encontrados para cada categoria. Esses valores de biomassa atual foram determinados por um cálculo

de média simples dos valores apresentados pelos autores Melo e Durigan [16], Saatchi *et al.* [28] e por outros autores contidos em Martins *et al.* [12].

Os valores médios de biomassa estabelecidos e adotados para as categorias foram, portanto, 100t/ha para a categoria arbóreo fechado, 50t/ha para a categoria arbóreo-arbustivo aberto e 20t/ha para a categoria herbáceo predominante.

Posteriormente os valores encontrados foram convertidos para tC/ha e para tCO₂e/ha e multiplicados pela área total de cada categoria de degradação e somadas as três categorias, obtendo assim, um valor total do sequestro florestal de carbono potencial para as matas ripárias em APPs da área de estudo.

Com o total de tCO₂e/ha determinado para cada categoria foi estimado o rendimento financeiro que o sequestro florestal de carbono poderá gerar para um projeto de restauro florestal de matas ripárias em APPs com base na cotação do preço de mercado em Euros (€) disponível no site: <<http://www.pointcarbon.com>>

Os valores de rendimento foram determinados inicialmente em Euros (€), moeda utilizada no mercado de carbono, e convertidos para Reais (R\$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na camada solo a pontuação mais elevada, 25 pontos, foi distribuída para os solos mais férteis e argilosos, já a menor pontuação, 5 pontos, para o solo mais arenoso e menos fértil. O restante da pontuação foi distribuído entre os solos intermediários.

Para a camada topografia, a qual foi dividida em altimetria e declividade, a maior altitude encontrada na área de estudo foi 1.019m concentrada na parte leste da área, e a menor altitude encontrada foi 545m concentrada na parte oeste da área.

Com a definição da classe de altitude encontrada na área de estudo, 500 – 1500 m, o peso referente a essa classe que compõe o modelo foi 11 pontos.

Das classes de declividade encontradas na área de estudo há predominância de inclinação menor que 10%.

Os pesos adotados para as classes de declividade são 8, 10 e 12 pontos respectivamente, os quais foram

distribuídos conforme as classes de declividade estabelecidas.

A precipitação que ocorre na área de estudo sofre pequena variação durante o ano. O peso estabelecido para a classe de precipitação anual 1.200 – 1.400 mm encontrada para a área de estudo foi 13 pontos.

As classes de pesos do ICMW, de 8 a 13 pontos, mostram uma distribuição uniforme pela área, com pontuação maior concentrada no centro da área.

A soma das camadas: solo, altimetria, declividade, precipitação anual, e ICMW, com seus respectivos pesos atribuídos, resultou no IBP, que variou de 41 a 75. Ressalta-se que a pontuação máxima do modelo é 100 pontos; portanto, a modelagem está dentro da pontuação estabelecida.

O Mapa IBP é apresentado na Figura 3, onde os índices gerados se distribuem pela área, como pode ser observado.

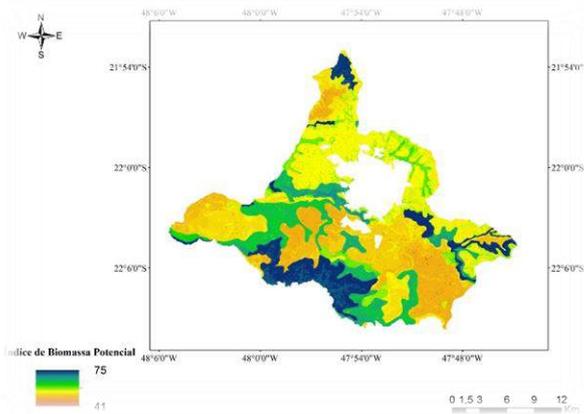


Figura 3 - Índice de Biomassa Potencial da BHTJ no município de São Carlos.

A maior pontuação foi encontrada principalmente ao sul da área, o que era esperado, já que a região concentra uma vegetação arbórea maior.

A zona urbana do município não foi inserida como área de estudo, portanto, foi considerada nula no modelo. Dessa forma, não foram obtidos valores de IBP para a zona urbana.

Com a calibração foram obtidas as médias para locais com formação vegetal de cerrado, cerradão e mata (Tabela 6)

Tabela 6. Densidade de biomassa potencial média obtida da calibração do modelo

Fitofisionomia	Biomassa (t/ha)
Cerrado	124
Cerradão	116
Mata	221

É possível notar, ao comparar com valores da literatura, que para os locais de mata o resultado foi compatível, mas para cerrado e cerradão os valores não foram os esperados. Isso pode ser explicado considerando que na amostragem das fitofisionomias os melhores solos são os mais cobiçados, portanto, os melhores cerradões deram lugar para a agricultura ou outros usos.

Observando a frequência de mata em Latossolo Férrico, pode-se dizer que áreas que estejam classificadas como cerrado tem condições de evoluir para cerradão. Autores como Miranda, Bustamante e Miranda [29] e Moreira [30] mencionam que a não ocorrência de queimadas nos cerrados em períodos variados de tempo permite que

estes adotem fisionomias como cerradão e floresta estacional semi-decidual.

Desse modo, a média do IBP para cerradão foi menor, considerando o desmatamento em solos mais férteis, enquanto a média do IBP para cerrado foi maior por haver áreas de cerradão degradado com potencial para regeneração, principalmente em Latossolo Férrico e Latossolo Vermelho.

A partir do IBP gerado para a BHTJ no município de São Carlos, foi confeccionado o mapa com os valores de densidade de biomassa potencial (Figura 4). Vale ressaltar que esta é a biomassa potencial estimada para a área de estudo e não a biomassa atual existente na área.

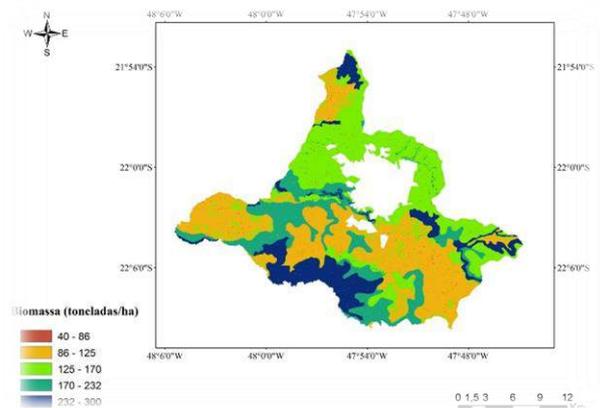


Figura 4 - Toneladas de biomassa estimadas para a BHTJ no município de São Carlos

O menor valor de biomassa potencial encontrado, 40t para campo, e o maior, 300t para floresta estacional semidecidual, evidencia a transição das formações florestais.

Os maiores valores de biomassa potencial determinados estão nos melhores solos, principalmente onde ainda se encontram fragmentos florestais.

Como observado na Figura 7, o mapa apresenta apenas a densidade de biomassa potencial determinada para toda a área de estudo. As toneladas de biomassa potencial foram, portanto, transformadas para toneladas de carbono (C) e dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Os respectivos valores estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Densidade de biomassa potencial estimada, de carbono e de dióxido de carbono equivalente para a BHTJ em São Carlos

Biomassa (t/ha)	Carbono – C (t/ha)	Dióxido de carbono equivalente - CO ₂ e (t/ha)
40 – 78	19 – 37	69 – 135
78 – 124	37 – 58	135 – 214
124 – 169	58 – 79	214 – 292
169 – 231	79 – 109	292 – 398
231 - 300	109 – 141	398 – 517

Assim como os valores de biomassa potencial, os maiores valores de CO₂e verificados estão nos melhores solos, especialmente onde ainda se encontram fragmentos florestais.

Pretendendo atingir o objetivo deste trabalho que é determinar o potencial de sequestro florestal de carbono de matas ripárias em APPs, a densidade de biomassa potencial foi obtida para cada categoria estabelecida para as APPs da área de estudo (Figura 5) [27]

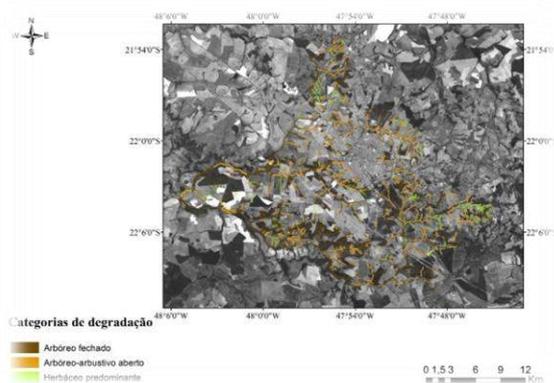


Figura 5 - Categorias de degradação das matas ripárias

A sobreposição do Mapa de Densidade de Biomassa Potencial com o Mapa das Categorias de Degradação das Matas Ripárias resultou nas toneladas de biomassa potencial para cada categoria de degradação (Tabela 8).

Tabela 8. Densidades de biomassa potencial estimada, de carbono e de dióxido de carbono equivalente para as matas ripárias.

Categorias	Biomassa (t/ha)	Carbono – C (t/ha)	Dióxido de carbono equivalente - CO ₂ e (t/ha)
Arbóreo fechado	201,71	94,80	347,92
Arbóreo-arbustivo aberto	173,46	81,53	299,22
Herbáceo predominante	161,35	75,83	278,30

Transformando estes valores para obtenção das densidades de sequestro florestal de carbono potencial, obteve-se os valores apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Densidades de sequestro florestal de carbono potencial estimado para as matas ripárias

Categorias	Biomassa (t/ha)	Carbono – C (t/ha)	Dióxido de carbono equivalente - CO ₂ e (t/ha)
Arbóreo fechado	101,71	47,80	175,43
Arbóreo-arbustivo aberto	123,46	58,03	212,97
Herbáceo predominante	141,35	66,43	243,80

O sequestro potencial para as três categorias de degradação corresponde a 388.523,29 toneladas de biomassa em 3.332,45ha de APP. Isto corresponde a um total de 670.163,82t CO₂e para as APPs.

Na categoria arbóreo fechado, com área total de aproximadamente 1.371,68ha, há predominância de formação florestal que já sequestrou quantidades consideráveis de carbono, mas ainda possuem um potencial de sequestro a ser atingido até o amadurecimento dessas florestas. Para esta categoria foi estimada uma densidade potencial de 175,43t CO₂e/ha.

Para a categoria arbóreo-arbustivo aberto, cuja área total é aproximadamente 1.572,99ha, o valor de CO₂e potencial estimado é 212,97t/ha. Nessas áreas a vegetação ainda não atingiu um porte de floresta, portanto, o restauro florestal dessas matas permitirá grande ampliação no estoque de carbono.

Na categoria herbáceo predominante, cuja área total é de aproximadamente 387,78ha, não há formação florestal, o potencial de CO₂e esperado para essa categoria é maior, sendo 243,80t/ha. Com o restauro florestal dessas áreas, a fixação de carbono será maior

até que a floresta amadureça e o estoque se estabilize em 243,80t/ha.

Com os valores de densidade de CO₂e determinados para cada categoria de degradação, estimou-se também o rendimento financeiro que estes podem gerar com base de € 1.00 por tonelada de CO₂e por hectare (valor cotado no site: <<http://www.pointcarbon.com>>. Acesso em: 26 de abril de 2013. Os valores de rendimento foram apresentados em Real com cotação do dia 26 de abril de 2013 (€ 1.00 = R\$ 2,60).

Tabela 10. Comparação do rendimento e custo de restauro florestal para as três categorias de degradação, com o valor de € 1.00 por tCO₂e (valores em R\$ de abril de 2013).

Categorias	Dióxido de carbono equivalente - CO ₂ e (t/ha)	Rendimento financeiro (R\$/ha)
Arbóreo fechado	175,43	456,12
Arbóreo-arbustivo aberto	212,97	553,72
Herbáceo predominante	243,80	633,88

Nota-se que o rendimento com a venda das RECs é baixo e não cobre os custos do restauro florestal se o preço pago pela tCO₂e for baixo. Posto isso, a geração das RECs pelos projetos de sequestro florestal de carbono arcaria parcialmente com os custos dos projetos de restauro florestal das matas ripárias em APPs. Isto acontece devido a desvalorização da tCO₂e no mercado de carbono.

Com base no trabalho de Birch *et al.* [31], onde os autores fazem análises econômicas sobre áreas de restauro e regeneração em combate à degradação ambiental, observou-se que os custos do restauro não são pagos com um valor baixo por tonelada de CO₂e. Isto, portanto, se comprova com a projeção feita neste trabalho para as matas ripárias em APPs da BHTJ em São Carlos.

CONCLUSÕES

O modelo escolhido para determinar o potencial de sequestro florestal de carbono mostrou-se adequado. O levantamento dos valores de toneladas de CO₂e por hectare, determinados para cada categoria de degradação estabelecida para as matas ripárias da área de estudo, através do restauro florestal de suas matas ripárias, oferece subsídios para a implementação de projetos no âmbito do MDL, incentivando os proprietários rurais.

O uso de um mapa pedológico em escala maior para a modelagem, 1:10.000 por exemplo, seria o mais indicado. Entre as camadas consideradas no modelo IBP, a que mais contribuiu com os resultados gerados foi a camada solo, visto que as camadas precipitação anual e altitude tiveram apenas uma classe de peso. Assim, uma variedade maior dos tipos de solos encontrados em áreas menores, devido ao nível de detalhe, proporcionará uma diversidade maior também na fertilidade dos solos e conseqüentemente apresentará valores de IBP mais condizentes com os valores utilizados na calibração do modelo.

Dessa forma, permite-se concluir que as florestas, ainda jovens e degradadas, sequestrarão uma quantidade considerável de carbono até atingir o porte máximo a partir do restauro florestal dessas APPs.

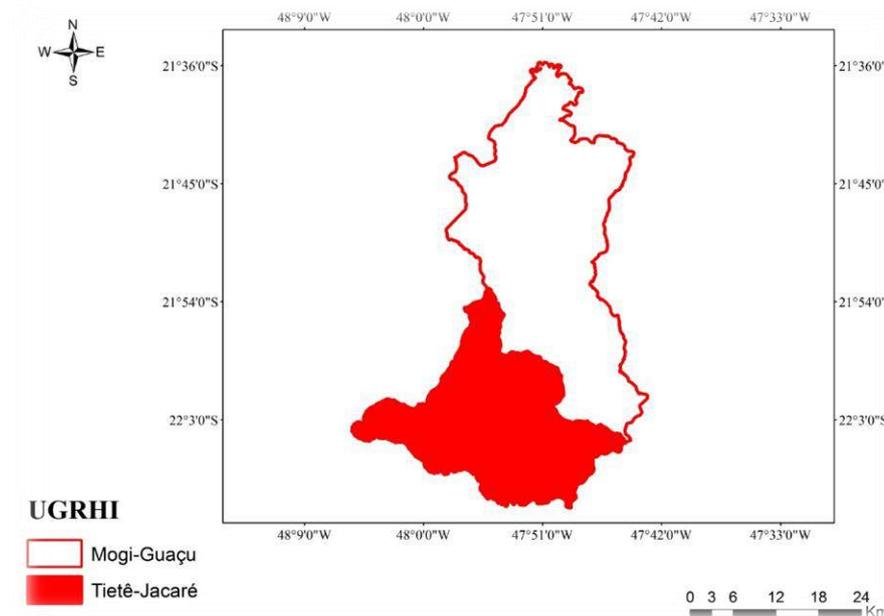


Figura 1 - Bacias Hidrográficas pertencentes ao município de São Carlos – SP

Tabela 1 - Distribuição dos pesos por tipos de solos

Solos	Pesos
Argissolo Vermelho-Amarelo	25
Neossolo Litólico	25
Latossolo Férrico	17
Nitossolo	17
Latossolo Vermelho	11
Gleissolo+Neossolo Flúvico	8
Latossolo Vermelho-Amarelo	8
Neossolo Quartzarênico	5

Tabela 2 - Distribuição dos pesos por altitude

Altitude (m)	Pesos
0 – 15	8
15 – 50	11
50 – 500	13
500 – 1.500	11
>1.500	7

Tabela 3 - Distribuição dos pesos por declividade.

Declividade (%)	Pesos
0 – 10	12
10 – 20	10
>20	8

Tabela 4 - Distribuição dos pesos por precipitação.

Precipitação (mm)	Pesos
1.000 – 1.200	11
1.200 – 1.400	13
1.400 – 2.000	16
2.000 – 2.400	19
2.400 – 2.800	22
2.800 – 3.200	25
3.200 – 3.600	22
>3.600	19

Tabela 5 - Valores médios de biomassa encontrados na literatura.

Fisionomia	t/ha
Campo limpo, campo sujo e campo cerrado	<40
Cerrado strictu sensu, cerrado denso	41 – 120
Cerradão, estacional semidecidual	120 – 220
Estacional semidecidual, ombrófila mista	220 – 300

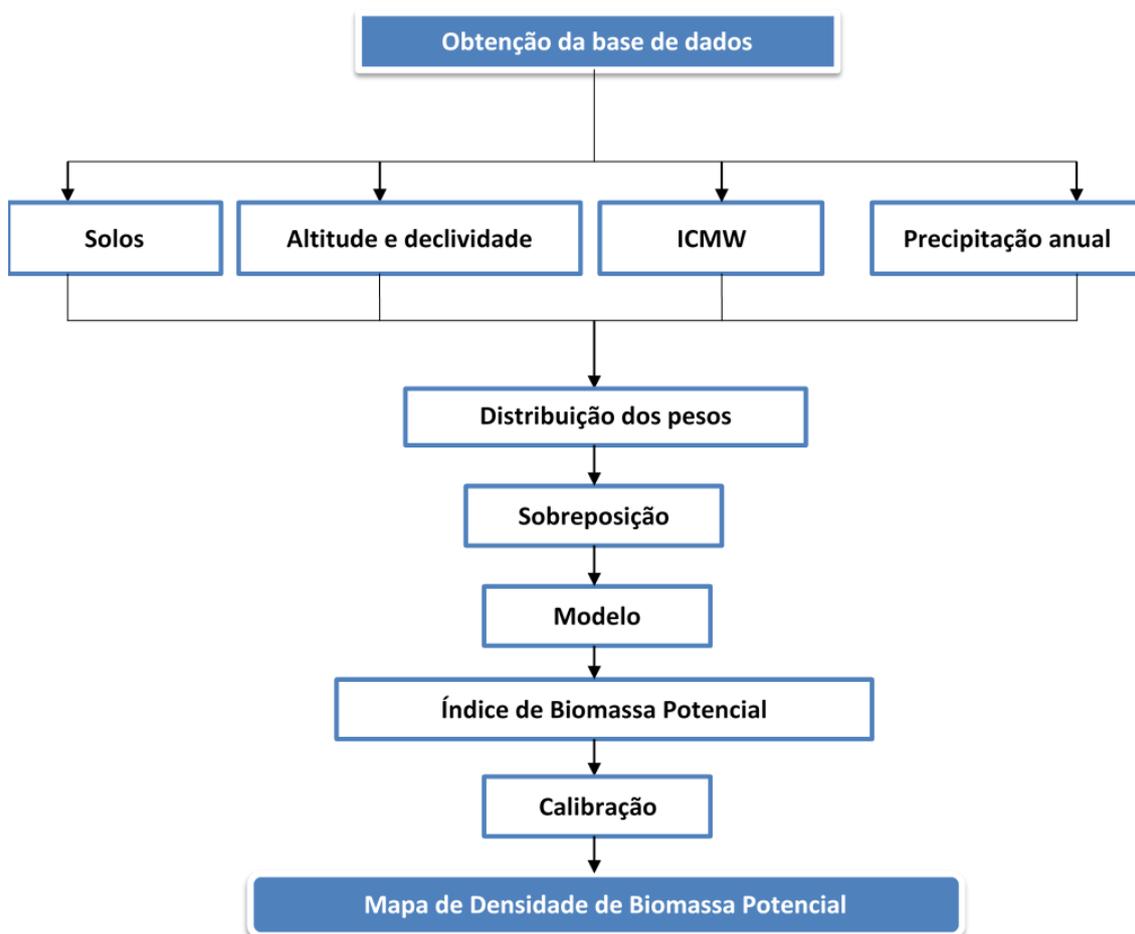


Figura 2 - Fluxograma com as etapas do modelo.

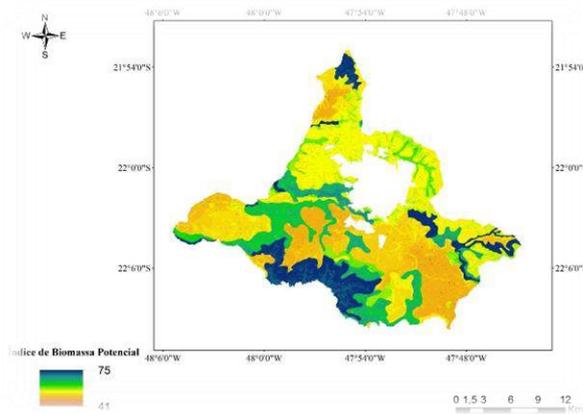


Figura 3 - Índice de Biomassa Potencial da BHTJ no município de São Carlos.

Tabela 6 - Densidade de biomassa potencial média obtida da calibração do modelo.

Fitofisionomia	Biomassa (t/ha)
Cerrado	124
Cerradão	116
Mata	221

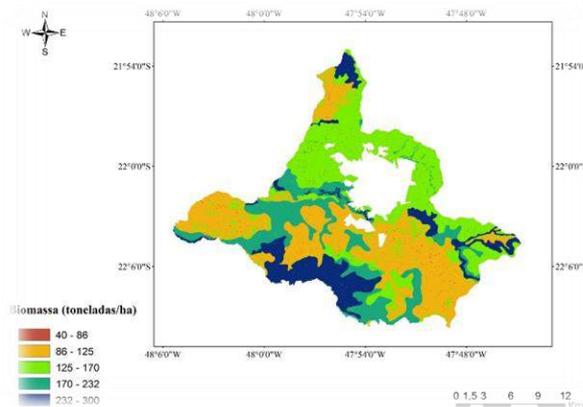


Figura 4 - Toneladas de biomassa estimadas para a BHTJ no município de São Carlos.

Tabela 7 - Densidade de biomassa potencial estimada, de carbono e de dióxido de carbono equivalente para a BHTJ em São Carlos.

Biomassa (t/ha)	Carbono – C (t/ha)	Dióxido de carbono equivalente - CO ₂ e (t/ha)
40 – 78	19 –	69 – 135
78 – 124	37 – 58	135 – 214
124 – 169	58 – 79	214 – 292
169 – 231	79 – 109	292 – 398
231 - 300	109 – 141	398 – 517

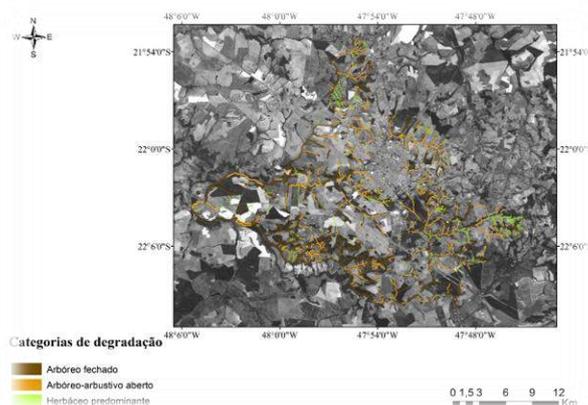


Figura 5 - Categorias de degradação das matas ripárias.

Tabela 8 - Densidades de biomassa potencial estimada, de carbono e de dióxido de carbono equivalente para as matas ripárias.

Categorias	Biomassa (t/ha)	Carbono – C (t/ha)	Dióxido de carbono equivalente - CO ₂ e (t/ha)
Arbóreo fechado	201,71	94,80	347,92
Arbóreo-arbustivo aberto	173,46	81,53	299,22
Herbáceo predominante	161,35	75,83	278,30

Tabela 9 - Densidades de sequestro florestal de carbono potencial estimado para as matas ripárias.

Categorias	Biomassa (t/ha)	Carbono – C (t/ha)	Dióxido de carbono equivalente - CO ₂ e (t/ha)
Arbóreo fechado	101,71	47,80	175,43
Arbóreo-arbustivo aberto	123,46	58,03	212,97
Herbáceo predominante	141,35	66,43	243,80

Tabela 10 - Comparação do rendimento e custo de restauro florestal para as três categorias de degradação, com o valor de € 1.00 por tCO₂e (valores em R\$ de abril de 2013).

Categorias	Dióxido de carbono equivalente - CO ₂ e (t/ha)	Rendimento financeiro (R\$/ha)
Arbóreo fechado	175,43	456,12
Arbóreo-arbustivo aberto	212,97	553,72
Herbáceo predominante	243,80	633,88

AGRADECIMENTOS

À CAPES pela concessão da bolsa de Mestrado à primeira autora, possibilitando a realização deste trabalho.

À Prof.a Adriana Pires do Departamento de Ciências Ambientais da UFSCar, ao Prof. Marcelo Montañó da USP e ao Odo Primavesi pelas informações disponibilizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROWN, S. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. **FAO Forestry Paper 134**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 1997.
- HOUGHTON, R. A *et al.* The **Spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon**: a comparison of estimates. *Global Change Biology*, v.7, p.731-746, 2001.
- IVERSON, L. R. *et al.* Use of GIS for Estimating Potential and Actual Forest Biomass for Continental South and Southeast Asia. In: DALE, V. H. (Ed.). **Effects of land-use change on atmospheric CO₂ concentrations**: South and Southeast Asia as a case study. New York: Springer-Verlag, 1994. p. 67-116.
- HERRERO, C.; BRAVO, F. Can we get an operational indicator of forest carbon sequestration? A case study from two forest regions in Spain. **Ecological Indicators**, 2011.
- BARBOSA, L. M. Recuperação florestal de áreas degradadas no Estado de São Paulo: histórico, situação atual e projeções. In: _____ (Coord.). **Manual para recuperação de áreas degradadas do estado de São Paulo**: matas ciliares do interior paulista. Guaratinguetá: [s.n.], 2006, p. 04-25.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Diagnóstico da situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré** – Relatório Zero. São Paulo, 2000. CD-ROM.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo 2010**. 2010.
- OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H. **Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo**: quadrícula de São Carlos. II. Memorial descritivo. Campinas, Instituto Agrônomo, 1984. 188p.
- CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA - CEPAGRI. **Clima dos municípios paulistas**. 2012. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_549.html>. Acesso em: 18 nov. 2012.
- SOARES, J. J.; SILVA, D. W.; LIMA, M. I. S. Current state and projection of the probable original vegetation of the São Carlos Region of São Paulo State, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 63, n. 3, p.527–536, 2003.
- OLIVEIRA, C. H. **Planejamento ambiental na cidade de São Carlos (SP) com ênfase nas áreas públicas e áreas verdes: diagnóstico e propostas**. 1996. Dissertação (Mestrado) – Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996.
- MARTINS, O. S. *et al.* Estimativa da densidade de biomassa potencial com uso de SIG no Estado de São Paulo. **Cadernos da Mata Ciliar**, São Paulo, n. 2, 2009.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC. (ESRI). ArcGIS. **Professional GIS for the desktop**, versão 10 CA. 2013.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- MONTAÑO, M. **Os recursos hídricos e o zoneamento ambiental: o caso do município de São Carlos (SP)**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. Fixação de carbono em reflorestamentos de matas ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil. **Scientia Forestalis**, n. 71, p. 149-154, 2006.
- MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br>>. Acesso em: 14 nov. 2012.

WECK, J. An improved CVP-index for the delimitation of the potential productivity zones of forest lands of India. **Indian Forester**, v. 96, p. 565-572, 1970.

ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL. Recife: UFPE, 2000.

HIJMANS, R. *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 25, p. 1965–1978, 2005.

VOSE, R. S. *et al.* **The Global Historical Climatology Network**: Long-term monthly temperature, precipitation, sea level pressure, and station pressure data . Oak Ridge National Laboratory, Carbon Dioxide Information Analysis Center, 1992.

WMO. **Climatological Normals (Climo) for the Period 1961-1990**. Secretariat of World Meteorological Organization, 1996.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO – FAOCLIM 2.0 A World-Wide Agroclimatic Database. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, Roma, Itália, 2001.

JONES, P.G.; GLADKOV, A. **FloraMap**. A Computer Tool for Predicting the distribution of Plants and Other Organisms in the Wild. Version 1.02. Centro Internacional de Agricultura Tropical: Cali, Colômbia, 2003.

UNH. **R-Hydronet**: A Regional, Electronic Hydrometeorological Data Network for South America, Central America, And The Caribbean. Water Systems Analysis Group, Universidade de New Hampshire, 2007.

EGGLESTON, S. *et al.* (Ed.). Agriculture, Forestry and Other Land Use. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. **Intergovernmental Panel on Climate Change**, v. 4, 2006.

DIAS, R. M. *et al.* Identificação dos Níveis de Degradação de Matas Ripárias com o Uso de SIG. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 150-161, 2014.

SAATCHI, S. S. *et al.* Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. **Global Change Biology**, n. 13, p. 816–837, 2007.

MIRANDA, H. S., BUSTAMANTE, M. M. C.; MIRANDA, A. C. The fire factor. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (Eds) **The Cerrados of Brazil**: ecology and natural history of a neotropical savanna. New York: Columbia University Press, 2002. p 51–68.

MOREIRA, A. G. Effects of fire protection on savanna structure in Central Brazil. **Journal of Biogeography**. n. 27, p. 1021–1029, 2000.

BIRCH, J. C. Cost-effectiveness of dryland forest restoration evaluated by spatial analysis of ecosystem services. **PNAS**, v. 107, n. 50, p. 21925–21930, 2010.