

*UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM*

*INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA*

**BIBLIOTECA DO INPA**

**Mapeamento preditivo da vegetação: uso de SIG para modelar a  
distribuição espacial de espécies arbóreas na Amazônia Central**

Juliana Stropp Carneiro

Manaus – Amazonas  
2004

*UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM*

*INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA*

**BIBLIOTECA DO INPA**

**Mapeamento preditivo da vegetação: uso de SIG para modelar a distribuição espacial de espécies arbóreas na Amazônia Central**

Juliana Stropp Carneiro

Orientador: Dr. Eduardo Martins Venticinque

Apoio: LBA, PDBFF, WWF, CNPq

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais, convênio INPA/UFAM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Biológicas, área de concentração Ecologia.

Manaus – Amazonas

2004

T  
671  
9.229m  
4.92

## Agradecimentos

Ao Dr. Eduardo Martins Venticinque, querido Dadão, pela atenção, alegria e dedicação durante todos os momentos do processo de construção deste trabalho. Agradeço também a maneira maravilhosa como me apresentou a Amazônia.

A banca examinadora pelas sugestões e cuidado durante a correção deste trabalho: Dr. Bruce Nelson, Dr. Dalton Valeriano, Dr. David Clark, Dr. Willian Laurance.

Ao PDBFF, WWF, LBA e CNPq pelo apoio financeiro.

A Mil Madeireira Itacoatiara Ltda., em especial ao Josué e a Julimara, pela ajuda logística e disponibilização do banco de dados.

Ao Dalton Valeriano por começar a me ensinar geoprocessamento sem deixar de lado a ecologia e pela atenção de sempre.

Ao Jansen Zuanon e Dadão por me mostrarem que pesquisa é feita também com o coração. A MALOCA, laboratório de geoprocessamento, por me abrigar nessa grande casa onde compartilhamos tudo com muita alegria.

Aos atuais e antigos moradores dessa grande casa pela alegria durante o dia e a noite: meus queridos amigos Machu Picchu, Tito, Pinguela, Mina, Neto, Fernanda, Taise, Felipe, Neto, Marina e Dadão.

Aos mateiros, motoristas e funcionários do PDBFF por toda ajuda e por deixar meus dias mais divertidos.

A moçada que vive o vai-e-vem de Manaus e traz ainda mais energia pra essa floresta: Taise, Mano, Bogão, Marcio, Fernanda, Inês, Ju Schietti, Ju Leoni, Carlinha, Dani, Renata, Suzana, Jorge, toda turma do mestrado...

A Marina e Ana Andrade pelo companheirismo e amizade sincera tão importantes para mim.

As minhas irmãs da Amazônia Amanda e Maria Clara pela amizade verdadeira e sincera que construímos.

Ao Bruno pela energia que me deu na fase final desse trabalho e por deixar meus dias cheios de alegria.

As minhas queridas irmãs Ta e Jan pela alegria de quando estamos juntas e também pela saudade que me faz sempre querer estar mais perto.

A minha mãe, por viver e me ensinar a buscar, acreditar e encontrar as coisas mais bonitas que a vida tem.

*À minha mãe,  
com todo amor e admiração.*

### **Ficha Bibliográfica:**

Carneiro, J. S. 2004

Mapeamento Preditivo da Vegetação: uso de SIG para modelar distribuição espacial de espécies arbóreas na Amazônia Central. Manaus: INPA/UFAM.

2004.

64 p.

Dissertação de Mestrado

1. Mapeamento preditivo da vegetação 2. distribuição espacial 3. topografia 4. regressão logística 5. SIG 6. Amazônia Central.

### **SINOPSE:**

A relação entre a topografia e a distribuição espacial de 12 espécies arbóreas foi investigada para uma área da Amazônia Central. A partir daí, foram elaborados e validados os modelos preditivos de ocorrência dessas espécies. Os dados sobre a ocorrência das espécies foram coletados durante o inventário florestal realizado pela Mil Madeireira Itacoatiara, em uma área de aproximadamente 16.000ha. Já as informações sobre o relevo foram obtidas com imagem do radar SRTM.

Palavras-chaves: mapeamento preditivo da vegetação, distribuição espacial, topografia, regressão logística, SIG, Amazônia Central.

Keywords: predictive mapping of vegetation, spatial distribution, topography, logistic regression, GIS, Central Amazonia.

## Sumário

<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Tabelas.....</b>	<b>iv</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vi</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
Distribuição espacial de espécies arbóreas.....	1
Modelagem preditiva de distribuição espacial de espécies arbóreas.....	3
<b>Objetivos.....</b>	<b>6</b>
<b>Área de estudo.....</b>	<b>6</b>
<b>Métodos .....</b>	<b>8</b>
Aquisição e edição das informações das espécies arbóreas .....	8
Aquisição e edição dos dados sobre variáveis topográficas .....	11
Obtenção dos dados para análise estatística .....	16
Análise da relação entre ocorrência das espécies arbóreas e topografia .....	18
Predição espacial de ocorrência das espécies arbóreas.....	18
Capacidade preditiva do modelo .....	20
Validação.....	20
<b>Resultados .....</b>	<b>24</b>
Espécies arbóreas .....	24
Análise da relação entre ocorrência das espécies arbóreas e topografia .....	25
Predição espacial de ocorrência de espécies arbóreas.....	29

Capacidade preditiva do modelo.....	38
Validação.....	40
<b>Discussão .....</b>	<b>50</b>
Considerações sobre o delineamento, processamento dos dados e aplicação do método..	
.....	50
Eficiência do modelo preditivo em sua área de elaboração .....	51
Validação do modelo preditivo .....	54
<b>Bibliografia.....</b>	<b>59</b>

## Lista de Figuras

- Figura 1** – Área parcial de exploração da Mil Madeireira Itacoatiara com destaque para a área de elaboração e validação do modelo preditivo de ocorrência de espécies arbóreas. .... 7
- Figura 2** – Esquema de representação do mapeamento das árvores de um talhão realizado pela Mil Madeireira Itacoatiara ..... 11
- Figura 3** – Exemplo de um perfil topográfico realizado a partir dos dados originais do SRTM (a1) e após a aplicação do filtro da média pelo método do vizinho mais próximo (a2). No gráfico a linha pontilhada corresponde aos valores originais e a linha contínua aos valores filtrados.... 13
- Figura 4** – Mapas de altitude (A) e declividade (B) da área de elaboração do modelo preditivo de ocorrência de espécies obtidos a partir das imagens do radar SRTM. .... 14
- Figura 5** – Fluxograma das atividades realizadas para obtenção dos mapas de altitude e declividade do terreno da imagem do radar SRTM..... 15
- Figura 6** – Exemplo: tabela de atributos do arquivo formato GRID da variável dependente (presença e ausência de indivíduos arbóreos). Os pontos representam a localização dos indivíduos em formato vetorial o qual transformamos para GRID, obtendo assim o arquivo matricial representado em vermelho (células com pelo menos uma presença) e verde (células de ausência)..... 17
- Figura 7** – Representação das operações para obtenção dos valores das variáveis contínuas nas células de ausência e presença de indivíduos arbóreos . A e A1 são variáveis contínuas; B é a variável dicotômica com valor 1 para presença; B1 é a variável dicotômica com 1 para ausência; C são os valores das células da variável contínua com presença e C1 a mesma operação para as células com ausência. .... 17



- Figura 8** – Representação da espacialização da regressão logística. As três camadas superiores correspondem (da esquerda para a direita) a altitude, declividade e presença e ausência dos indivíduos arbóreos. A partir dos dados destas camadas e aplicação da regressão logística obteve-se a distribuição espacial das probabilidades estimadas.....19
- Figura 9** – Altitude (A) e declividade (B) da área de validação do modelo preditivo de ocorrência de indivíduos arbóreos obtidas a partir das imagens SRTM.. ..... 22
- Figura 10** – Probabilidade de ocorrência obtida em função da declividade e altitude do terreno a partir de regressão logística para as espécies *D. excelsa*, *A. rosaeodora* e *C. villosum*..... 27
- Figura 11** – Probabilidade de ocorrência obtida em função da declividade e altitude do terreno a partir de regressão logística para as espécies *C. micrantha*, *G. glabra*, *M. huberi*, *M. bidentata*, *P. multijuga*, *P. pendula* e *P. psilostachya*..... 28
- Figura 12**– Mapas da densidade de indivíduos e probabilidade de ocorrência de *A. rosaeodora* (a1, b1) e *P. pendula* (a2, b2) da área de elaboração do modelo preditivo. .... 31
- Figura 13** – Mapas da densidade de indivíduos e probabilidade de ocorrência de *D. excelsa* (a1, b1) da área de elaboração do modelo preditivo..... 32
- Figura 14** – Mapas da densidade de indivíduos e probabilidade de ocorrência de *C. micrantha* (a1, b1) e *M. bidentata* e *M. huberi* (a2, b2) da área de elaboração do modelo preditivo..... 34
- Figura 15** – Mapas da densidade de indivíduos e probabilidade de ocorrência de *P. psilostachya* (a1, b1) e *P. multijuga* (a2, b2) da área de elaboração do modelo preditivo..... 35
- Figura 16** – Mapas da densidade de indivíduos e probabilidade de ocorrência de *G. glabra* (a1, b1) e *C. villosum* (a2, b2) da área de elaboração do modelo preditivo.. ..... 36

- FIGURA 17** – Mapas da densidade de indivíduos e probabilidade de ocorrência de *D. odorata* (a1, b1) e *P. paniculata* (a2, b2) da área de elaboração do modelo preditivo.....37
- FIGURA 18** – Relação entre a probabilidade de acerto de presença ao acaso e acréscimo de acerto de presença de indivíduos das espécies estudadas para a área de elaboração do modelo preditivo.....39
- Figura 19** – Porcentagem de células nas diferentes cotas de altitude na área de elaboração do modelo e validação. A linha pontilhada corresponde à área de elaboração do modelo e a linha contínua à área de validação. A área em cinza claro representa a maior disponibilidade de ambientes em cotas mais baixas na área de validação e a área em cinza escuro representa a maior disponibilidade de ambientes em cotas mais elevadas na área de elaboração do modelo..... 40
- Figura 20** – Diagrama de dispersão entre a densidade de células referente à presença de indivíduos na área de elaboração do modelo preditivo e de validação. .... 43
- Figura 21** – Relação entre a densidade média observada e altitude na área de elaboração e validação do modelo preditivo..... 44
- Figura 22** – Mapa de probabilidade de ocorrência de *A. rosaeodora* (a), *D. excelsa* (b) e *P. pendula* (c) para a área de validação do modelo preditivo de ocorrência de espécies. ....46
- Figura 23** – Mapa de probabilidade de ocorrência de *C. micrantha* (a), *G. glabra* (b) e *M. bidentata* e *M. huberi* (c) e *P. multijuga* para a área de validação do modelo preditivo de ocorrência de espécies. .... 47
- Figura 24** – Mapa de probabilidade de ocorrência de *P. psilostachya* (a) e *C. villosum* (b) para a área de validação do modelo preditivo de ocorrência de espécies. .... 48
- Figura 25** – Relação entre a probabilidade de acerto de presença ao acaso e acréscimo de acerto de presença de indivíduos das espécies estudadas para a área de validação do modelo preditivo..... 49

### Lista de Tabelas

<b>Tabela 1</b> – Lista e características ecológicas das espécies estudadas.....	10
<b>Tabela 2</b> – Número e densidade de indivíduos existente na área de elaboração do modelo (n. ind. e n. ind./ha). Número e densidade das células de ocorrência de indivíduos após a conversão para o formato matricial (n. células e n. cel./ha) utilizados na análise da relação entre ocorrência dos indivíduos e topografia.....	24
<b>Tabela 3</b> – Resultados obtidos pelas regressões logísticas realizadas entre a ocorrência dos indivíduos das espécies estudadas e altitude e declividade do terreno. Nível de significância: $p \leq 0,05$ ; $N = 10.967$ ; Graus de liberdade =2 e (*) variável de maior influência sobre a ocorrência dos indivíduos da espécie.NS = Não significativo.....	26
<b>Tabela 4</b> – Valores máximos e mínimos das probabilidades de ocorrência dos indivíduos estimadas a partir da altitude e declividade do terreno. As informações estão ordenadas de acordo com o valor máximo encontrado para cada espécie.....	30
<b>Tabela 5</b> – Parâmetros utilizados para análise da capacidade preditiva dos modelos de probabilidade de ocorrência das espécies estudadas.....	38
<b>Tabela 6</b> – Número e densidade de indivíduos existente no banco de dados da Mil Madeireira Itacoatiara (n. ind. e n. ind/ha) para a área de validação. Número a densidade das células de ocorrência de indivíduos após a conversão para o formato matricial (n. células e n. cel./ha) utilizados na análise da relação entre ocorrência dos indivíduos e topografia e elaboração do modelo preditivo.....	42
<b>TABELA 7</b> – Análise de covariância ente densidade observada e altitude nas áreas de elaboração e validação do modelo preditivo de ocorrência de espécies. $N=20$ ; $GL=1$ ; $*p \leq 0,05$ .....	43
<b>TABELA 8</b> – Parâmetros utilizados para análise da capacidade preditiva dos modelos de probabilidade de ocorrência das espécies estudadas na área de validação.....	49

## RESUMO

A distribuição espacial das populações vegetais é abordada na ecologia como uma importante questão devido a sua contribuição ao entendimento de padrões e processos em florestas tropicais. A configuração espacial das populações vegetais é afetada pela interação dos fatores bióticos e abióticos do ambiente. Desta forma, a compreensão dos fatores que estruturam as populações vegetais possibilita a elaboração de modelos de distribuição de espécies. Assim, este trabalho teve como objetivo principal elaborar e validar modelos capazes de prever a probabilidade de ocorrência de *Aniba roseaodora*, *Cariniana micrantha*, *Caryocar villosum*, *Dinizia excelsa*, *Dipteryx odorata*, *Goupia glabra*, *Manilkara bidentata* e *Manilkara huberi*, *Parkia multijuga*, *Parkia pendula*, *Peltogyne paniculata*, *Pseudopiptadenia psilostachya* em função de variáveis topográficas. A probabilidade de ocorrência dessas 12 espécies arbóreas foi estimada a partir de regressão logística múltipla. Os parâmetros estimados foram incorporados a um SIG e com isso foi obtida a representação espacial das probabilidades de ocorrência estimadas para cada uma das espécies. Os modelos indicaram associação entre a ocorrência dos indivíduos em relação à topografia para 10 espécies. Os modelos estimaram de maneira acurada a ocorrência de 9 espécies. A densidade dos indivíduos variou entre as áreas do modelo e de validação. Para área onde o modelo foi validado houve sobreposição entre a distribuição observada e estimada para as 9 espécies citadas anteriormente. No entanto, houve grande variação entre o acréscimo de acerto de ocorrência para essas espécies. Desta forma, o trabalho aqui apresentado indica que modelos preditivos de distribuição de espécies arbóreas podem prever com acurácia ocorrência de espécies em determinada área, mas que a extrapolação para outras áreas deve considerar outros fatores, além da topografia.

## ABSTRACT

Spatial plant population distribution is an important question in ecology, since it helps understanding the patterns and process that maintain tropical forests. The plant population spatial arrangement is affected by biotic and abiotic factors in the environment, so knowledge of the factors structuring plant population can help establish models of species distribution. This study had the main objective to elaborate and validate models that can predict the occurrence probability of the tree species *Aniba rosaeodora*, *Cariniana micrantha*, *Caryocar villosum*, *Dinizia excelsa*, *Dipteryx odorata*, *Goupia glabra*, *Manilkara bidentata*, *Manilkara huberi*, *Parkia multijuga*, *Parkia pendula*, *Peltogyne paniculata* and *Pseudopiptadenia psilostachia* as a function of topographic variables. These 12 tree species had their probability of occurrence estimated from multiple logistic regression. The estimated parameters were incorporated in a GIS and the spatial representation of the occurrence in relation to topography for 10 species. The models correctly estimated the occurrence of nine species. The individual density varied between the areas of the model and the validation. In the plots where the model was suitable there was an overlap between the observed and estimated distribution for the nine species mentioned before. However, there was large variation in the accuracy of the model. This study indicated that predictive models of tree species distribution can correctly predict the species occurrence in an area, but extrapolation to larger areas should consider other factors besides topography.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Distribuição de espécies arbóreas

A atividade madeireira na Amazônia é um importante fator antrópico que afeta a regeneração e a composição da floresta ao longo do tempo. Assim, características ecológicas e econômicas das espécies podem determinar alterações nas populações locais de espécies florestais (Martini *et al.* 2001). Desta forma, estudos que visam a compreensão dos processos que interferem no estabelecimento e manutenção das espécies utilizadas pela atividade madeireira na Amazônia contribuem para a elaboração de medidas de conservação e manejo da floresta.

Neste contexto, insere-se a discussão sobre os fatores que determinam a variação da distribuição e abundância das espécies. Até o momento, as hipóteses levantadas para compreender esses processos podem ser divididas em dois grandes grupos: as que dão ênfase às interações bióticas e as que consideram o ambiente abiótico e as perturbações ambientais (Asquith 2002).

Dentre as interações bióticas que interferem no estabelecimento e manutenção de espécies em um dado local estão as interações inter e intraespecíficas como competição, predação, simbiose e mutualismo. Do ponto de vista de populações vegetais a composição, distribuição e abundância dos indivíduos podem ser influenciadas por fatores controladores de densidade, como por exemplo, alelopatia e competição intraespecífica e herbivoria (Connel *et al.*, 1984; Janzen 1970; Wright 2002), além das limitações impostas pela dispersão dos organismos (Tuomisto *et al.* 2003).

Com relação ao segundo grupo, se destacam os trabalhos que visam analisar a ocorrência, abundância, densidade e/ou biomassa em relação a gradientes ambientais. O

tipo de análise empregada nesses estudos pode ser definido como análise espécie-ambiente (Minte-Vera 1998). Numa escala global a análise espécie-ambiente revela, por exemplo, mudança no padrão do número de espécies da comunidade em relação à energia solar e a precipitação (Currie e Paquin 1987). Já na escala de paisagem (aproximadamente de 1 a 100 Km<sup>2</sup>) este padrão não se mantém. Nesta escala, torna-se perceptível a influência das múltiplas combinações de tipos de solos e perturbações sobre a composição e distribuição espacial das espécies, assim como sobre a organização e funcionamento das florestas tropicais (Clark, 2002). Com o intuito de avaliar a relação espécie-ambiente, principalmente em florestas neotropicais, foram realizados trabalhos por Gentry (1988); Tuomisto e Ruokolainen (1994); Ruokolainen *et al.* (1997); Clark *et al.* (1999); ter Steege *et al.* (2000); Terborg & Andresen (1998), (Tuomisto *et al.* 2003).

Muitas áreas da Amazônia são constituídas por um mosaico de habitats conspícuos, com diferentes conjuntos de espécies vegetais ocorrendo em áreas adjacentes sobre diferentes substratos (Gentry 1988). Assim, fatores edáficos como por exemplo, disponibilidade de nutrientes, aeração e inclinação da vertente podem influenciar a distribuição espacial das espécies ao longo da paisagem (Clark 2002).

Ao analisar trabalhos realizados em diferentes escalas Gentry (1988) concluiu que o processo que determina quais famílias, quantas e quais espécies compõe uma comunidade é em grande parte determinístico e predizível a partir de parâmetros ambientais. De maneira mais abrangente, pode-se dizer que a distribuição das espécies arbóreas tropicais pode ser devido à preferência de habitat e/ou à variação na história evolutiva de cada uma delas (Pitman *et al.*, 2001).

Segundo Gentry (1988) e Franklin, (1995), a partir de análises quantitativas da relação espécie-ambiente, é possível fazer um prognóstico da distribuição geográfica de

espécies arbóreas com base na distribuição das variáveis ambientais que condicionam sua ocorrência. Assim, a associação entre o tipo de vegetação ou ocorrência de espécies vegetais e o habitat ganha importância devido à sua capacidade preditiva. Logo, investigações sistemáticas e detalhadas desta associação tornará a capacidade de predição mais confiável. A busca desta predição adequada à realidade da natureza é relevante frente aos processos de alteração que a floresta está sofrendo (Matteucci e Colma 1982).

### **1.2 Modelagem preditiva de distribuição espacial de espécies arbóreas**

As relações entre a ocorrência de espécies e os fatores ambientais são geralmente baseadas em modelos estatísticos. Desta forma, a causa da relação não é estabelecida, mas uma relação funcional pode ser encontrada. Para Austin (1996) a estrutura da modelagem estatística pode ser definida a partir de três componentes: o modelo ecológico, o modelo de dados e o modelo estatístico. O modelo ecológico diz respeito ao conhecimento ou teoria ecológica a ser utilizada ou testada. O modelo de dados refere-se à decisão sobre a coleta, medidas ou estimativa dos dados a serem utilizados. E finalmente, o modelo estatístico engloba os métodos estatísticos a serem empregados no estudo. Assim, a formulação do modelo geralmente começa com uma conceituação ecológica.

A quantificação da relação espécie-ambiente representa o centro da modelagem preditiva geográfica em ecologia. Esses modelos são geralmente baseados na hipótese de que fatores ambientais controlam a distribuição das espécies e de comunidades (Guisan e Zimmermann, 2000). No contexto da ecologia vegetal, Franklin (1995) define mapeamento preditivo da vegetação como o prognóstico da distribuição da composição florística da vegetação em uma paisagem, a partir da distribuição de variáveis ambientais mapeadas que condicionam sua ocorrência. Para alcançar o objetivo de espacialização da informação, o



mapeamento preditivo inicia-se com o desenvolvimento do modelo e é seguido pela aplicação daquele modelo a um banco de dados geográficos com o intuito de produzir o mapa preditivo (Franklin 1995).

No mapeamento preditivo da vegetação a variável dependente pode ser contínua (abundância) ou categórica (presença e ausência de espécies, fitofisionomia); assim como a variável independente também pode ser contínua (pluviosidade, temperatura, elevação, inclinação da vertente, etc) ou categórica (tipo de solo, substrato geológico, etc). A modelagem preditiva derivada da utilização de diversas técnicas estatísticas que permitem a relação entre as variáveis acima citadas, pode ser definida também como modelagem ou mapeamento da distribuição potencial de espécies vegetais ou de comunidades (Guisan e Zimmermann 2000). Dentre os métodos utilizados pelos modelos preditivos encontrados na literatura pode-se citar os que utilizam regressão logística (Pereira e Itami, 1991), análise de gradientes (Westman 1991), análise hierárquica (Mortara 2000).

Os modelos preditivos da vegetação que tem como dados de entrada a variável dependente categórica (presença e ausência de espécies) e a variável independente podem estimar a probabilidade de ocorrência de espécies a partir da regressão logística (ter Braak e Looman, 1995). A vantagem do método probabilístico é que as probabilidades podem ser mapeadas, dando alguma quantificação da incerteza inerente ao processo analítico de mapeamento (Franklin 1995).

Quanto à aquisição de variáveis independentes contínuas disponíveis em contexto espacial, destacam-se aquelas derivadas a partir de uma carta topográfica (inclinação da vertente, aspecto, posição topográfica e distância da drenagem) (Barbosa 2003). Isto porque variáveis preditivas da vegetação variam ao longo de gradientes topográficos, além disso o erro associado a essas derivações são menos expressivos que aqueles gerados por

interpolação de dados coletados em campo (Guisan e Zimmermann 2000). Dado o contexto em que se insere a modelagem preditiva e a capacidade que os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm de armazenar e relacionar dados de diferentes origens e formatos, torna-se evidente a adequação do uso desses sistemas para elaboração de mapeamento da distribuição potencial de espécies vegetais.

## 2. OBJETIVOS

### Objetivo Geral

- Elaborar modelos capazes de prever a probabilidade de ocorrência de 12 espécies arbóreas em função de variáveis topográficas.

### Objetivos específicos

- Determinar se a probabilidade de ocorrência das espécies *Aniba roseaodora*, *Cariniana micrantha*, *Caryocar villosum*, *Dinizia excelsa*, *Dipteryx odorata*, *Goupia glabra*, *Manilkara bidentata* e *Manilkara huberi*, *Parkia multijuga*, *Parkia pendula*, *Peltogyne paniculata*, *Pseudopiptadenia psilostachya*, é estruturada por fatores topográficos (altitude e declividade);
- Elaborar modelos capazes de prever a probabilidade de ocorrência das doze espécies selecionadas em função de variáveis topográficas.

## 3. ÁREA DE ESTUDO

Realizei o trabalho na área da Mil Madeireira Itacoatiara Ltda., localizada a 250 Km de Manaus, AM (Figura 1). O clima desta área é classificado como Amw<sup>1</sup>i segundo Köppen, com temperatura média mensal acima de 18° C, estação seca entre agosto e outubro (menos de 60 mm de chuva), e média anual de chuva de 2200 mm (De Goederen 2000). O relevo é típico de floresta de terra firme da Amazônia Central, com áreas de platôs, vertentes e baixios. Os platôs são ambientes caracterizados por estarem nas áreas mais elevadas e possuem o solo argiloso e bem drenado. Já as vertentes se caracterizam por serem mais dissecadas e possuem solos argilosos nas áreas altas e arenosos nas áreas baixas. Finalmente, os baixios diferenciam-se por serem planícies

aluviais, com solos arenosos freqüentemente encharcados pelas chuvas com acúmulo de sedimentos (Ribeiro *et al.* 1999).

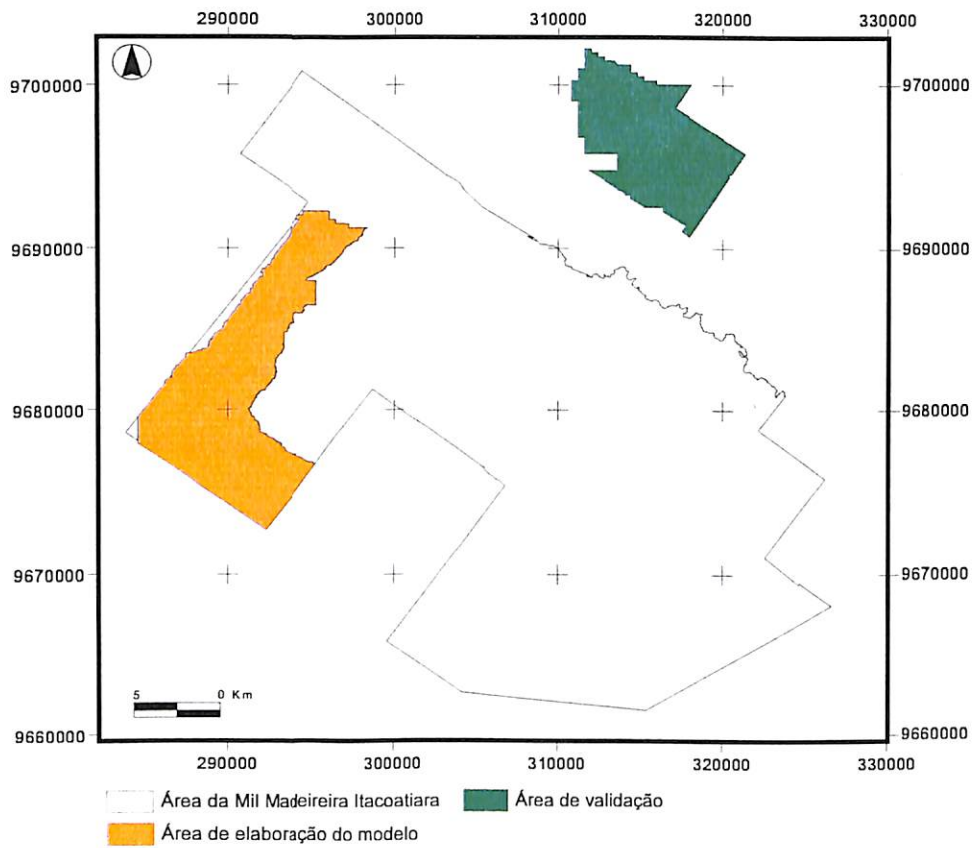


Figura 1. Área parcial de exploração da Mil Madeireira Itacoatiara com destaque para a área de elaboração e validação do modelo preditivo de ocorrência de espécies arbóreas.

## 4. MÉTODO

### 4.1 Aquisição e edição das informações das espécies arbóreas

As informações sobre ocorrência das árvores foram cedidas pela Mil Madeireira Itacoatiara Ltda.. Selecionei as espécies a serem estudadas com base na confiabilidade da identificação taxonômica realizada em campo (Hopkins com. pess. 2002) (Tabela 1). As espécies *Manilkara bidentata* e *Manilkara huberi* são identificadas como massaranduba, portanto as análises realizadas não as consideram separadamente.

Os dados sobre ocorrência dos indivíduos arbóreos foram coletados pela empresa durante a prospecção das árvores potencialmente exploráveis, que consiste na listagem e mapeamento das árvores com DAP  $\geq 40$  cm. A prospecção das árvores é realizada nas áreas referentes aos compartimentos da empresa. Os compartimentos são áreas geralmente delimitadas seguindo microbacias e variam de 1.000 a 5.000 ha. Para se fazer a prospecção e o mapeamento das árvores, essas áreas são divididas em unidades de 10ha (400X250m), chamadas de talhões. Cada talhão é prospectado e mapeado por uma equipe de 5 pessoas (4 técnicos e um líder). O levantamento das árvores é feito da seguinte maneira: o líder percorre a linha principal dois técnicos distantes entre si 12,5m do lado direito e dois técnicos distantes entre si 12,5m do lado esquerdo percorrem a distância de 250m no sentido sul-norte. Os técnicos ditam para o líder o código do nome vulgar da espécie (previamente estabelecido), o DAP e observações a respeito da qualidade da madeira para exploração. Ao final da trilha o mesmo procedimento é feito no sentido norte-sul (Figura 2). Essas informações são anotadas em uma ficha de campo e passadas para o pessoal do laboratório de geoprocessamento da empresa, que atualizam o banco de dados georreferenciados. Desta forma, para cada compartimento existe uma lista das espécies com a localização

de cada indivíduo associada, DAP, volume e qualidade do indivíduo para exploração. Durante o mapeamento de alguns compartimentos houve problemas da localização da linha base, assim entre os compartimentos existe um desvio na posição das informações, no entanto, a posição relativa da localização das árvores e igarapés é correta dentro de cada compartimento. Assim, optei por definir blocos de compartimentos com as posições relativas entre localização das árvores e igarapés corretas e analisá-los separadamente. Para a análise do padrão de distribuição das árvores e elaboração do modelo preditivo selecionei uma área de 9.552 ha (Figura 1). A informação sobre a ocorrência das árvores cedida pela empresa consiste em um arquivo do tipo pontos em formato shapefile com a lista das espécies e as coordenadas em UTM da localização dos indivíduos. Converti esse arquivo para o formato matricial, e obtive um arquivo do tipo GRID com células de 93m. Defini esta resolução espacial com base na resolução espacial dos dados do Modelo Digital do Terreno (MDT) (ver tópico 4.2).

Com o intuito de visualizar a distribuição espacial dos pontos de ocorrência dos indivíduos elaborei uma superfície de densidade pelo método de Kernel. Utilizei um raio de 93m para facilitar a comparação visual com os demais resultados gerados neste trabalho e causar o mínimo de distorção possível nos dados originais.

Tabela 1. Lista e características ecológicas das espécies estudadas.

Família	Espécie	Nome vulgar	Ambiente*	Fr	Dispersão	Referência
Lauraceae	<i>Aniba rosaeodora</i>	Pau rosa	Nascentes de igarapés* <sup>1</sup>	f	Zoo	a
Lecythidaceae	<i>Cariniana micrantha</i>	Tauari vermelho	Platô	f	Anemo	b
Caryocaraceae	<i>Caryocar villosum</i>	Piquiá	Platô e vertente	f	Zoo	b
Leguminosae- Mimosoideae	<i>Dinizia excelsa</i>	Angelim vermelho	Platô	f	Anemo	b
Leguminosae-Papilionoideae	<i>Dipteryx odorata</i>	Cumarú	Platô	f	Zoo	c
Celastraceae	<i>Goupia glabra</i>	Cupiuba	Platô, baixio e vertente	f	Zoo	c
Sapotaccac	<i>Manilkara bidentatai</i> , <i>M. huberi</i>	Massaranduba	Platô, baixio e vertente	f	Zoo	b
Leguminosae-Mimosoideae	<i>Parkia multijuga</i>	Paricarana	Campinarana	o	Zoo	d
Leguminosae-Caesalpinioideae	<i>Peltogyne paniculata</i>	Escorrega macaco	Vertente	f	Anemo	c
Leguminosae-Mimosoideae	<i>Parkia pendula</i>	Angelim fava	Platô	o	Zoo	c
Leguminosae-Mimosoideae	<i>Pseudopiptadenia psilostachya</i>	Favinha	Platô	f	Anemo	d

Ribeiro et al. (1999) e \*<sup>1</sup> Spironello et al. (2003)

Zoo=zoocoria; Anemo=anemofilia

a= Spironello et al. (2003); b=www.embrapa.br; c=www.rbgekew.org.uk d= Ribeiro et al. (1999)

Fr=Freqüência\* (f=freqüente; o=ocasional)

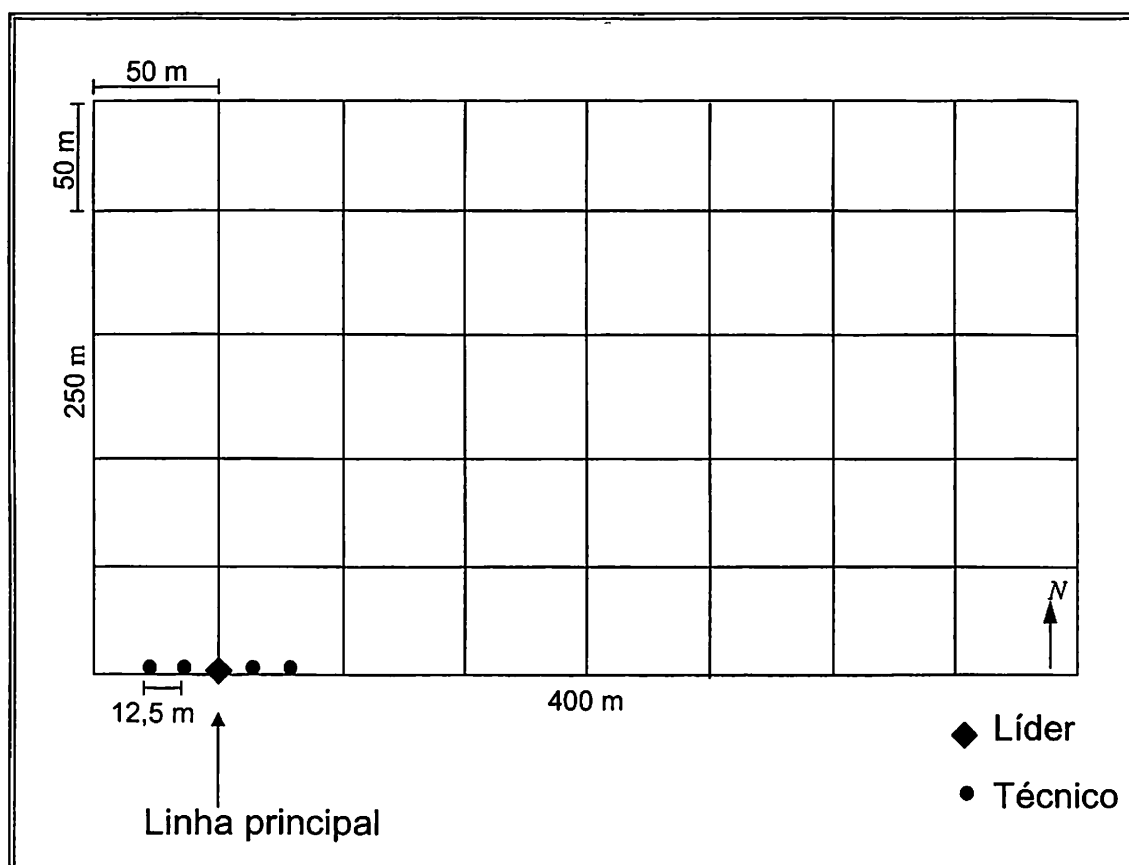


Figura 2: Esquema de representação do mapeamento das árvores de um talhão realizado pela Mil Madeireira Itacoatiara.

#### 4.2 Aquisição e edição dos dados sobre variáveis topográficas

Além das informações referentes aos indivíduos arbóreos, foi cedida pela Mil Madeireira Itacoatiara Ltda. a base de dados com a hidrografia digitalizada. O mapeamento desses igarapés foi feito a partir de interpretação visual de imagem do satélite Landsat e atualização em campo.

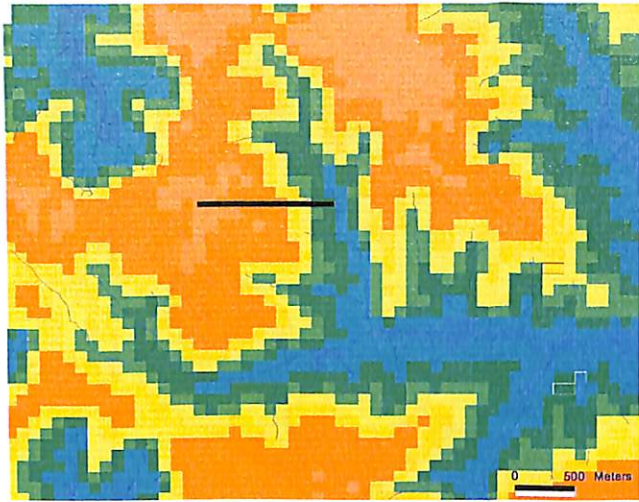
Elaborei o Modelo Digital do Terreno a partir dos dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Adquiri os dados sobre altitude no site <http://seamless.usg.gov> em formato .bil. Para a correção geométrica utilizei como base uma imagem Landsat TM 7 (órbita/ponto 230/62) georreferenciada (projeção UTM –



zona 21; datum WGS 84). Neste procedimento, coletei 26 pontos de controle (GCP - Ground Control Points) e utilizei o modelo geométrico polinomial e o método de reamostragem do vizinho mais próximo. Obtive RMS (Root Mean Squared) de 0,0025. Salvei este arquivo georeferenciado no formato .img.

Posteriormente, com o objetivo de co-registrar a imagem SRTM com a base dos igarapés digitalizados correspondentes às áreas dos compartimentos de interesse fiz um recorte da imagem SRTM correspondente à área de interesse. Para esse registro, utilizei como base o arquivo vetorial em formato .shp referente aos igarapés. Coletei 37 pontos de controle, utilizei o modelo geométrico polinomial e o método de reamostragem de interpolação bilinear. Neste caso, o RMS foi de 108,977. Salvei o arquivo co-registrado em formato .img e posteriormente em GRID Stack (\*.stk). Realizei os registros no software Erdas Imagine (ERDAS 1999) versão 8.4. Importei o arquivo \*.stk para o software ArcView versão 3.2 (ESRI 1996) e então o converti para GRID. Com base neste arquivo elaborei perfis topográficos e verifiquei discontinuidades nos dados. Assim, apliquei o filtro da média pelo método do vizinho mais próximo com uma janela de 3X3 pixels. Gerei perfis também a partir do arquivo obtido pelo filtro da média e constatei menores discontinuidades (Figura 3) e portanto, optei por trabalhar a partir desses dados (Figura 4a). Realizei os perfis topográficos com a extensão PE 6.0 for Spatial Analyst (<http://arcscripts.esri.com>). Desta forma, obtive o GRID de altitude com resolução espacial de 93m (Figura 4a). A partir desse arquivo gerei o mapa de declividade em graus também com resolução de 93m (Figura 4b). As etapas desses procedimentos estão representadas na Figura 5.

a1)



a2)

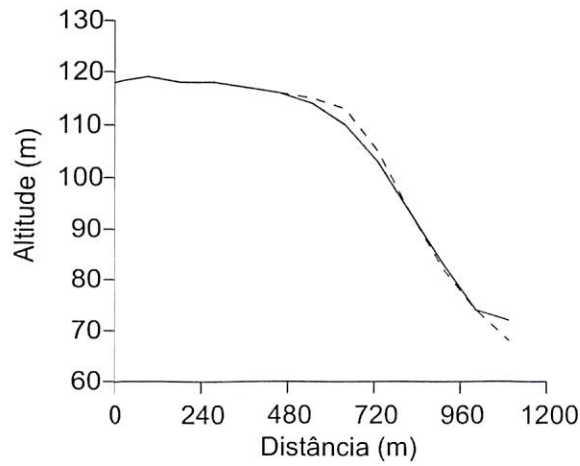
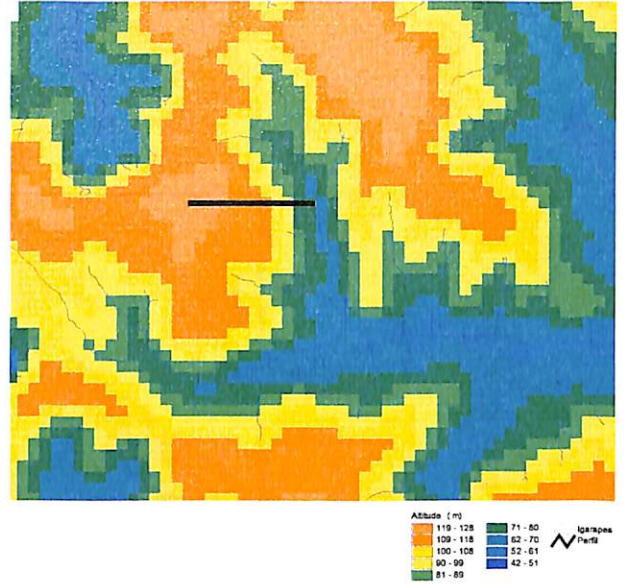


Figura 3. Exemplo de um perfil topográfico determinado a partir dos dados originais do SRTM (a1) e após a aplicação do filtro da média pelo método do vizinho mais próximo (a2). No gráfico a linha pontilhada corresponde aos valores originais e a linha contínua aos valores filtrados.

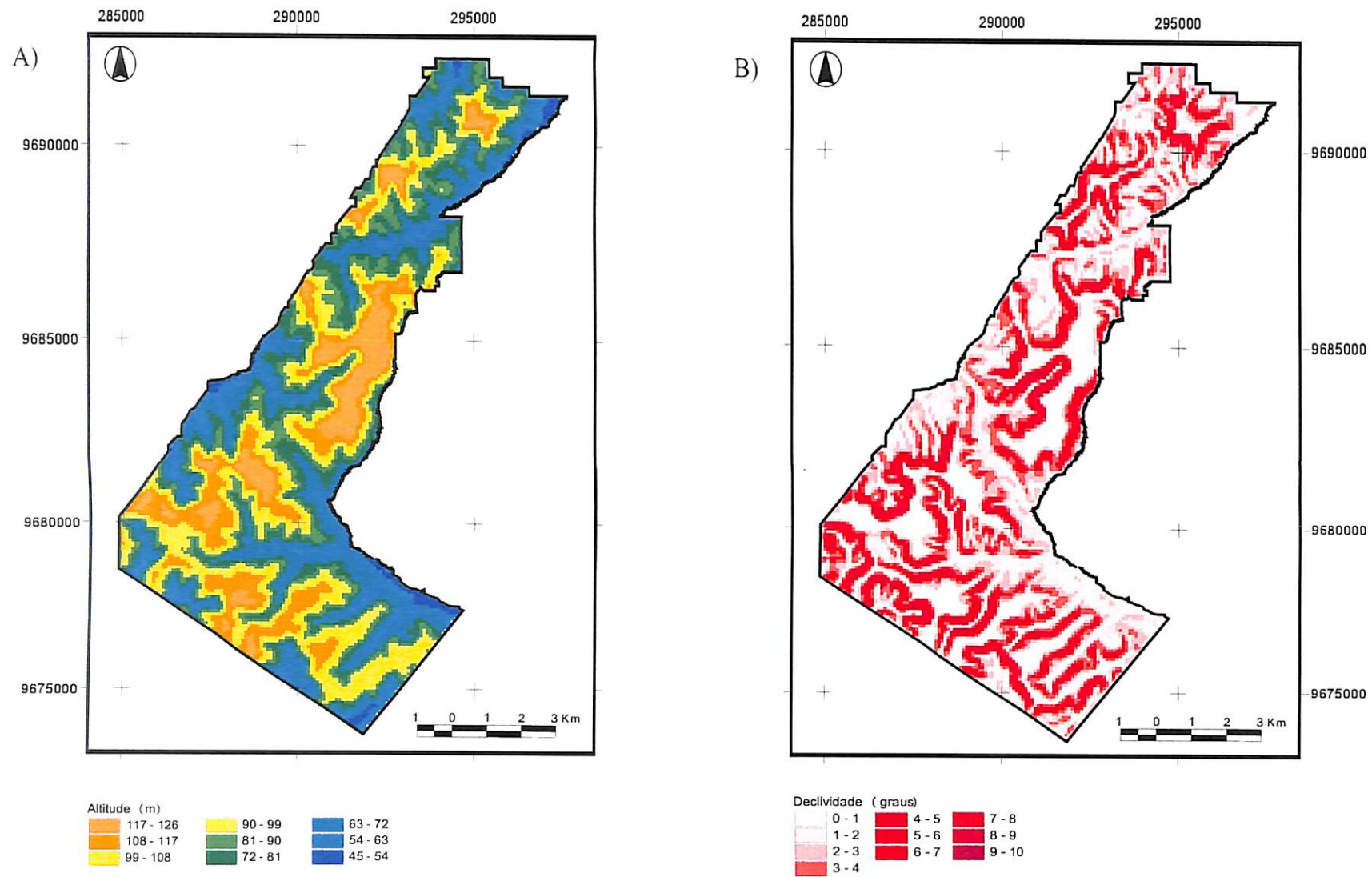


Figura 4. Mapas de altitude (A) e declividade (B) da área de elaboração do modelo preditivo de ocorrência de espécies obtidos a partir das imagens do radar SRTM.

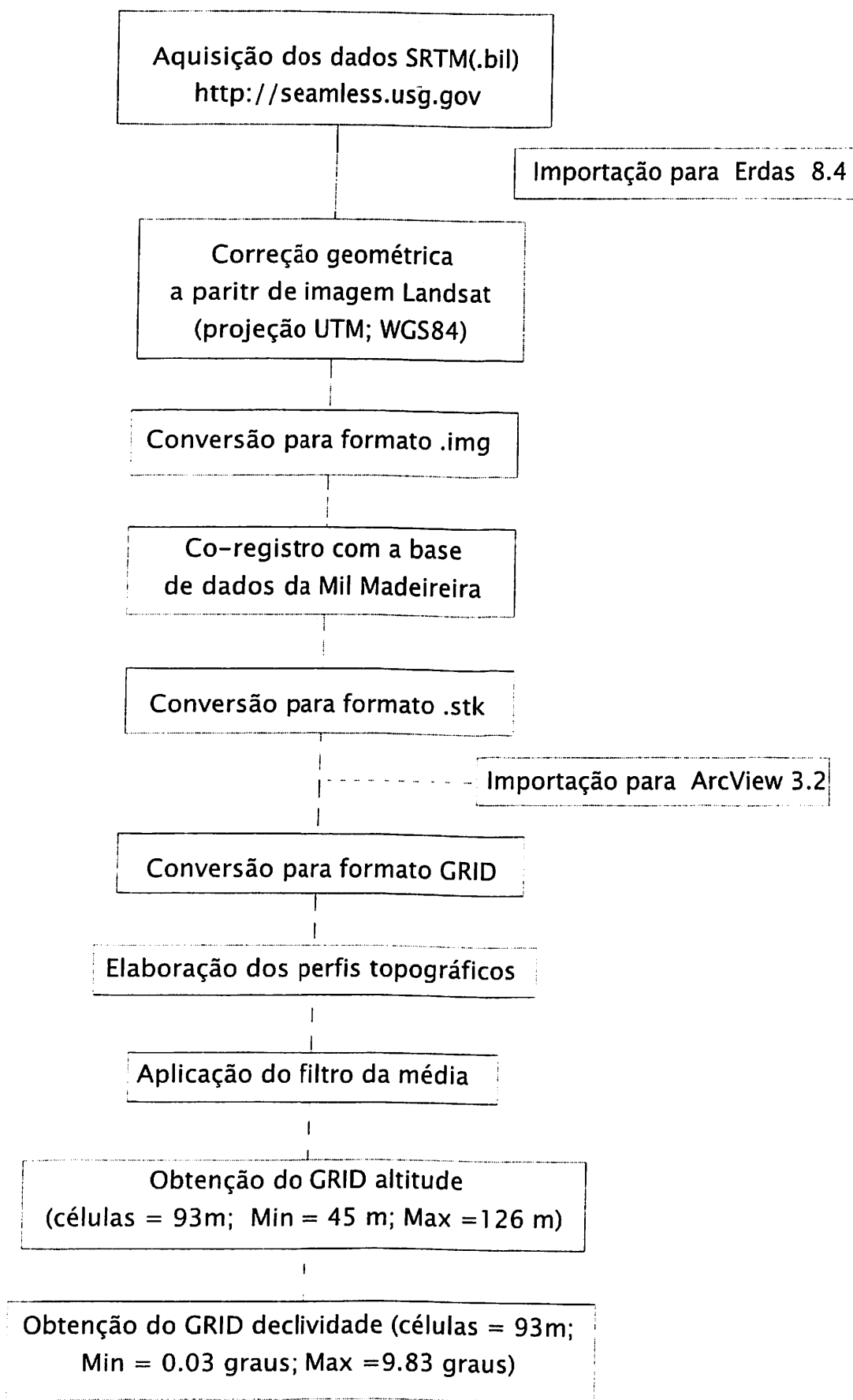


Figura 5. Fluxograma das atividades realizadas para obtenção dos mapas de altitude e declividade do terreno da imagem do radar SRTM.

### 4.3 Obtenção dos dados para análise estatística

Para realizar as análises estatísticas exportei os dados do SIG e os analisei em um pacote estatístico (Systat 8.0). Para isso, realizei algumas operações com o tema referente à localização dos indivíduos. Primeiramente, para cada espécie atribuí os valores 1 e 0 às células de presença e ausência dos indivíduos respectivamente. Logo depois, inseri um novo campo na tabela associada a este tema onde foi atribuído o valor 1 para ausência e 0 para presença (Figura 6). A partir deste arquivo realizei as operações com o objetivo de obter os valores das variáveis contínuas (altitude e declividade) nas células de presença e ausência dos indivíduos. Realizei essas operações com a função MAP CALCULATOR do ArcView 3.2. Segue abaixo a seqüência das operações realizadas.

- Obtenção dos valores da variável altitude nas células de presença de indivíduos arbóreos

$$\frac{(GRID\ altitude)}{(GRID\ localização\ dos\ indivíduos\ "campo\ presença" = 1)}$$

- Obtenção dos valores da variável altitude nas células de ausência de indivíduos arbóreos:

$$\frac{(GRID\ altitude)}{(GRID\ localização\ dos\ indivíduos\ "campo\ ausência" = 1)}$$

Apliquei o mesmo procedimento para extração dos valores de declividade.

Os GRIDs gerados dessas operações (Figura 7) foram exportados no formato ASCII Raster. As planilhas obtidas contêm os valores das variáveis contínuas (altitude e

declividade) nas células referentes à presença e à ausência dos indivíduos. Essas planilhas foram editadas e exportadas para o Systat 8.0.

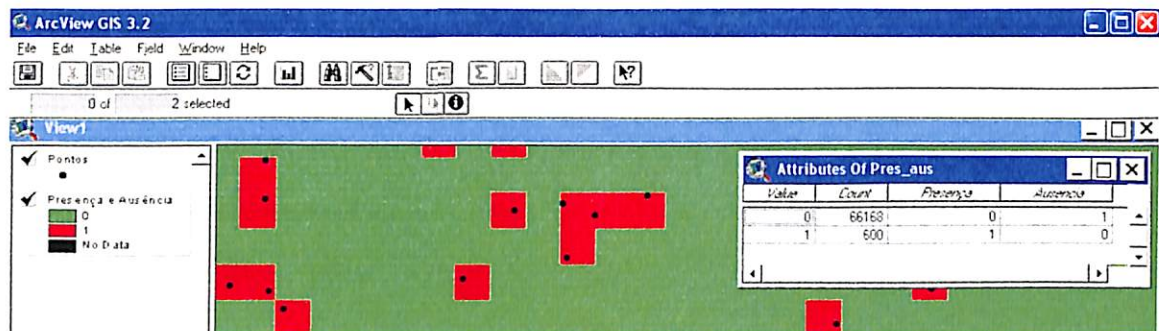


Figura 6 – Exemplo da tabela de atributos do arquivo formato GRID da variável dependente (presença e ausência de indivíduos arbóreos). Os pontos representam a localização dos indivíduos em formato vetorial o qual transformamos para GRID, obtendo assim o arquivo matricial representado em vermelho (células com pelo menos uma presença) e verde (células de ausência).

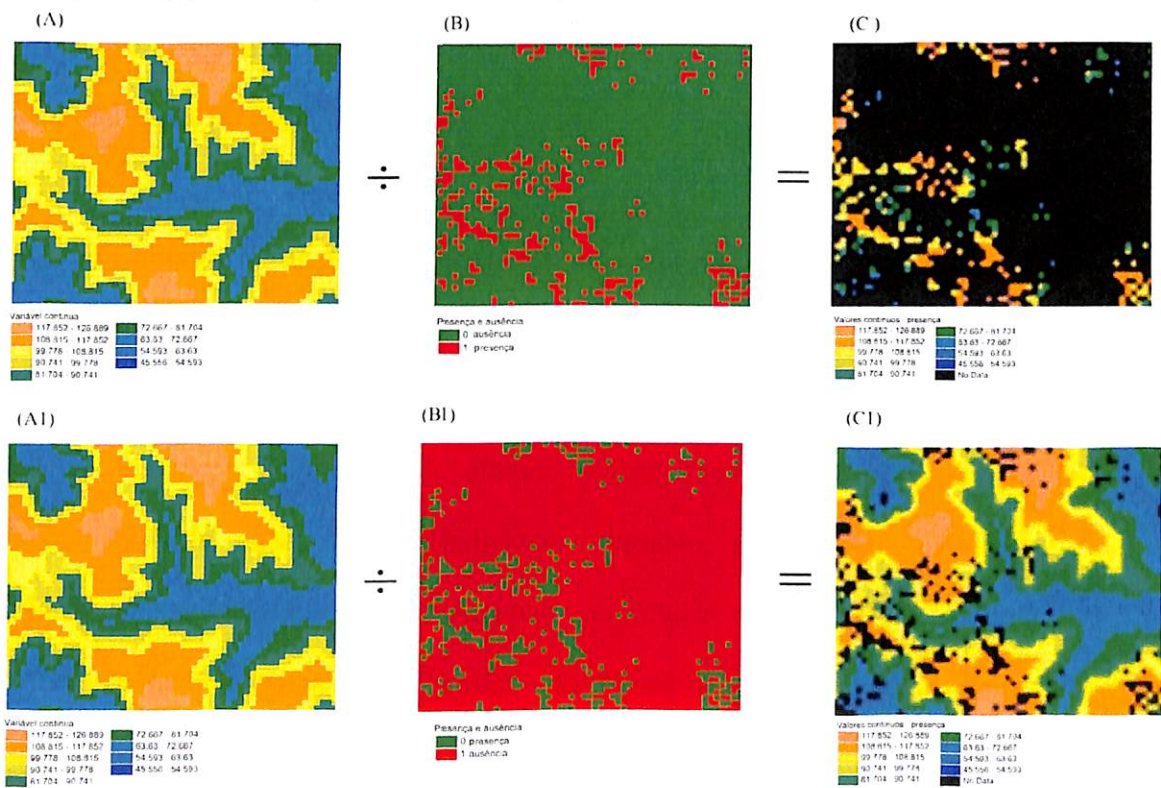


Figura 7. Representação das operações para obtenção dos valores das variáveis contínuas nas células de ausência e presença de indivíduos arbóreos . A e A1 são variáveis contínuas; B é a variável dicotômica com valor 1 para presença; B1 é a variável dicotômica com 1 para ausência; C são os valores das células da variável contínua com presença e C1 a mesma operação para as células com ausência.

#### 4.4 Análise da relação entre ocorrência das espécies arbóreas e topografia

Determinei a relação entre ocorrência dos indivíduos arbóreos e as variáveis topográficas para cada uma das espécies a partir de regressão logística múltipla. Assim, estimei as probabilidades de ocorrência dos indivíduos em função da altitude e declividade do terreno. O modelo logístico utilizado foi:

$$Z = \frac{e^{(\alpha + (\beta_1 * X_1) + (\beta_2 * X_2))}}{1 + e^{(\alpha + (\beta_1 * X_1) + (\beta_2 * X_2))}} ;$$

onde  $Z$  é a probabilidade de ocorrência dos indivíduos de uma dada espécie,  $\alpha$  é a constante,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são os coeficientes e  $X_1$  e  $X_2$  são as matrizes das variáveis preditoras, no caso altitude e declividade do terreno. Para uma revisão sobre regressão logística consultar Hosmer e Lemeshow (1989). As análises foram realizadas no Systat 8.0.

#### 4.5 Predição espacial de ocorrência das espécies arbóreas

Para prever a distribuição das árvores espacializei as probabilidades de ocorrência dos indivíduos das 12 espécies estudadas. Apliquei as equações obtidas nos modelos logísticos aos temas de altitude e declividade e obtive os mapas de probabilidade de ocorrência de indivíduos. Portanto, esses mapas expressam a probabilidade de ocorrência dos indivíduos em células de 93m, dada a altitude e declividade daquela célula. Segue abaixo a seqüência de equações aplicada para cada uma das espécies estudadas.

- $(GRID\ declividade) * (\beta_{declividade}) + (GRID\ altitude) * (\beta_{altitude}) = (GRID\ A);$
- $(GRID\ A) + \alpha = (GRID\ B);$
- $(GRID\ B.exp) = (GRID\ C);$

$$\triangleright (GRID C) + 1 = (GRID D);$$

$$\triangleright \frac{(GRID C)}{(GRID D)} = (GRID E) = Z;$$

onde  $\beta_{declividade}$  e  $\beta_{declividade}$  são os coeficientes,  $\alpha$  é a constante e  $Z$  é a matriz de probabilidades de ocorrência dos indivíduos de uma dada espécie (Figura 8). Essas operações foram realizadas com a função MAP CALCULATOR do ArcView 3.2.

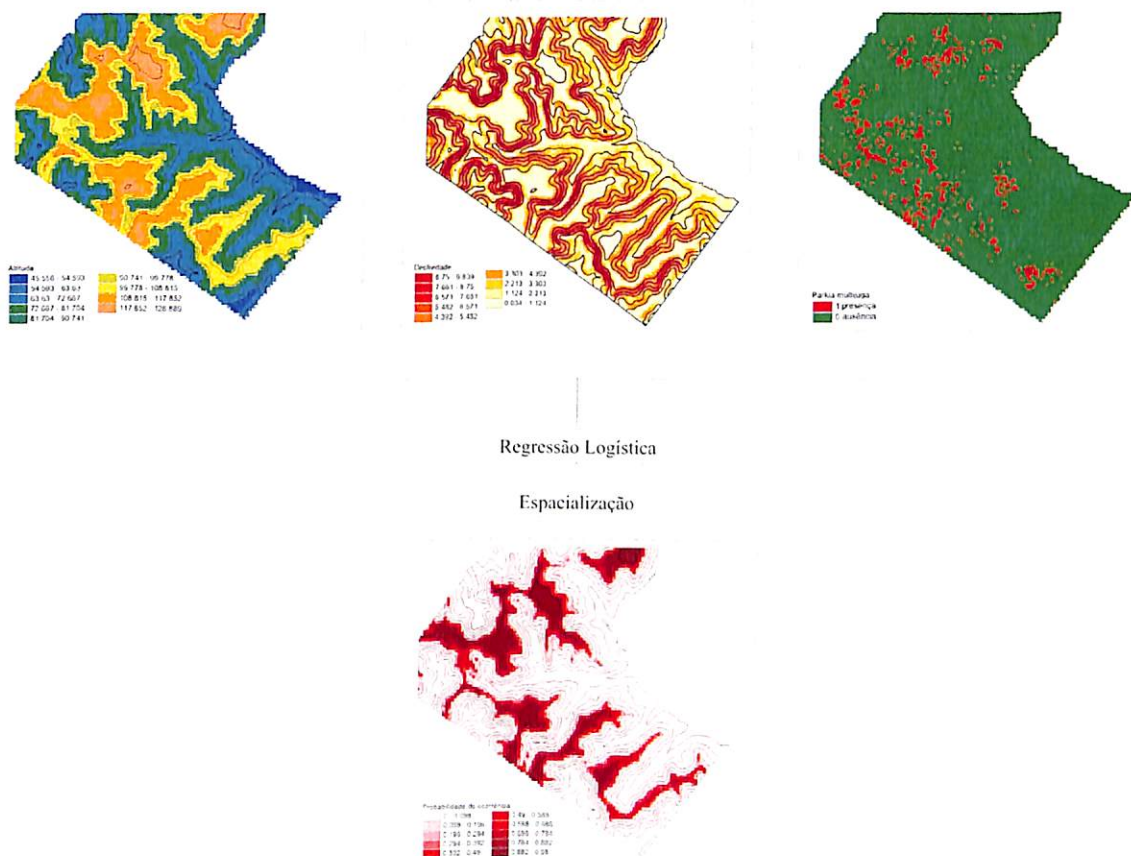


Figura 8. Representação da espacialização da regressão logística. As três camadas superiores correspondem (da esquerda para a direita) a altitude, declividade e presença e ausência dos indivíduos arbóreos. A partir dos dados destas camadas e aplicação da regressão logística obteve-se a distribuição espacial das probabilidades estimadas.



#### 4.6 Capacidade preditiva do modelo

Obtive a tabela de sucesso de predição para cada um dos modelos gerados. Esta tabela é composta pelas variáveis expressas abaixo:

$resposta = \sum P_i$  ;  $P_i$  é a probabilidades estimada para as células de presença

$referência = \sum P_j$  ;  $P_j$  é a probabilidades estimada para as células de ausência

$\acute{I}ndice\ de\ acerto\ de\ presen\c{c}a = \frac{resposta}{N_i}$  ;  $N_i$  é o número de células de presença

$\acute{I}ndice\ de\ acerto\ de\ aus\ência = \frac{refer\ência}{N_j}$  ;  $N_j$  é o número de células de ausência

As variáveis *Índice de acerto de presença*, *Índice de acerto de ausência* e *Índice de acerto total* refletem a relação entre a distribuição observada e a esperada, indicando o nível de acerto do modelo.

Ainda com o objetivo de determinar o quanto melhora a predição em relação ao acaso estimei o acréscimo de acerto de ocorrência das espécies da seguinte forma:

$P = \frac{N.\ c\acute{e}lulas\ de\ presen\c{c}a}{N.\ c\acute{e}lulas\ total}$  ;  $P$  é a probabilidade de ocorrência de indivíduos ao acaso

#### 4.7 Validação

Validei os modelos para determinar sua capacidade em predizer a ocorrência de indivíduos das espécies estudadas em uma área distinta da qual foram elaborados. Para realizar a validação foi necessário escolher uma área que tivesse os mesmos tipos de dados sobre a ocorrência dos indivíduos arbóreos e drenagem que a área de elaboração do modelo, já que posteriormente seria necessário comparar a distribuição das probabilidades estimadas com a ocorrência dos indivíduos. Por isso, selecionei a área de validação com base na consistência das posições relativas entre a localização das árvores e igarapés e na extensão da área de mapeamento. Assim, escolhi uma área da

Mil Madeireira com 6 mil hectares mapeados e localizada a aproximadamente 14 km da área de construção do modelo, sendo esta a segunda maior área de mapeamento contínuo da empresa (Figura 1).

Obtive as informações sobre as variáveis do terreno da mesma forma que a utilizada para a área de elaboração do modelo (Figura 9). Fiz um recorte da imagem SRTM georreferenciada citada anteriormente e a co-registrei com os dados dos igarapés desta área. Coletei, nesta etapa do trabalho 39 pontos de controle e obtive o RMS de 97,14.

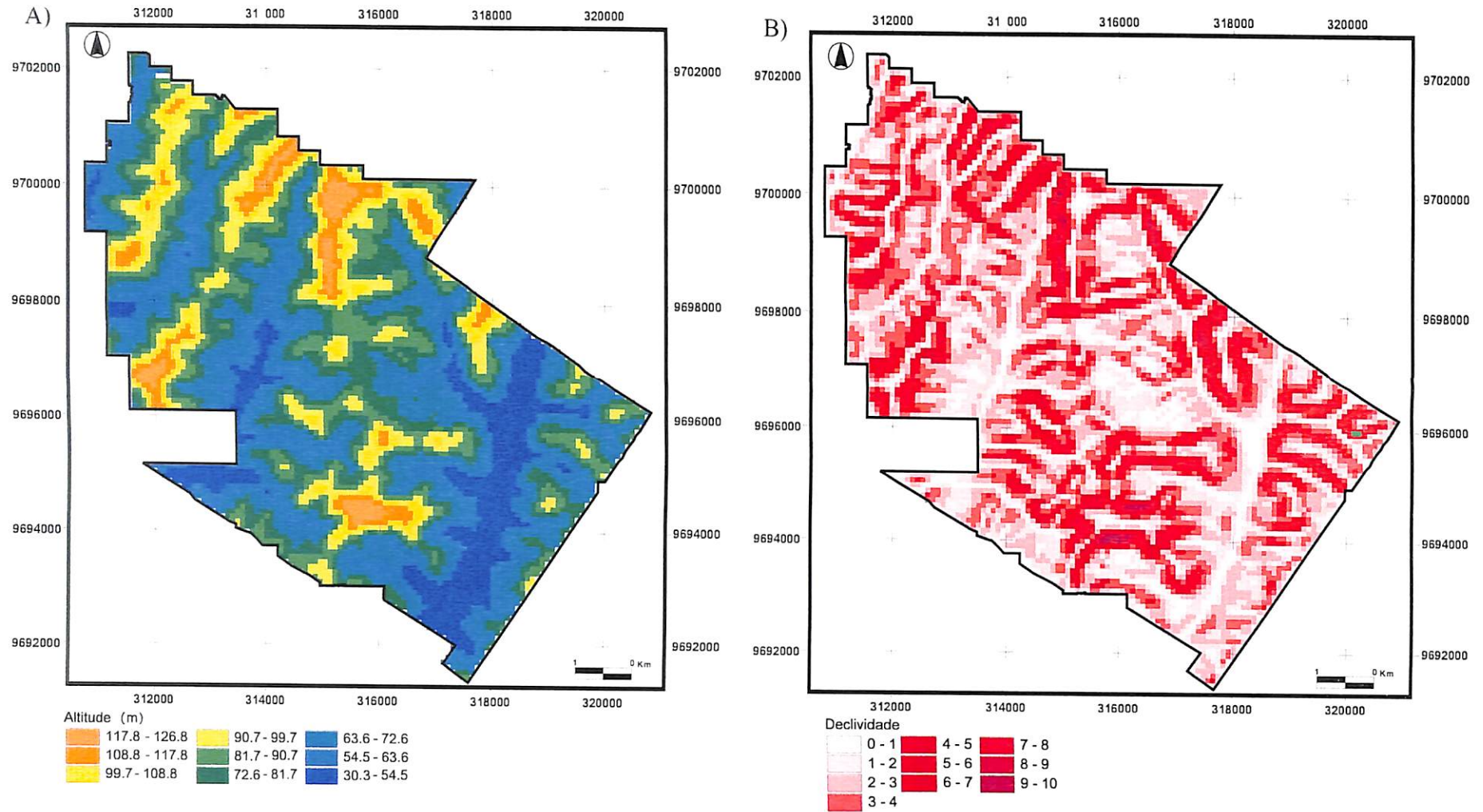


Figura 9. Altitude (A) e declividade (B) da área de validação do modelo preditivo de ocorrência de indivíduos arbóreos obtidas a partir das imagens SRTM.

Com o objetivo de verificar as diferenças entre a distribuição espacial dos indivíduos nessas duas áreas calculei a densidade de células de presença (n. células de presença/Km<sup>2</sup>) por cota de altitude tanto para a área do modelo quanto para a área de validação e realizei a análise de covariância. Para determinar a superfície de distribuição espacial das probabilidades estimadas apliquei as equações obtidas nos modelos logísticos aos temas de altitude e declividade da área de validação do modelo.

Defini a capacidade preditiva dos modelos nessa nova área com base nos parâmetros obtidos na tabela de sucesso de predição e no valor de acréscimo de acerto de presença de indivíduos. Determinei o valor das variáveis *resposta* e *referência* a partir da soma das probabilidades nas células de presença e ausência respectivamente. Extraí os valores de probabilidade das células de presença e ausência dos indivíduos da seguinte maneira:

- Obtenção dos valores da probabilidade estimada nas células de presença de indivíduos

$$\frac{(GRID \text{ probabilidade})}{(GRID \text{ localização dos indivíduos "campo presença" = 1})}$$

- Obtenção dos valores da probabilidade estimada nas células de ausência de indivíduos

$$\frac{(GRID \text{ probabilidade})}{(GRID \text{ localização dos indivíduos "campo ausência" = 1})}$$

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Espécies arbóreas

Para elaboração do modelo preditivo, utilizei o registro de ocorrência de 28.700 indivíduos de 12 espécies em uma área de 9.552 ha. A espécie mais abundante foi *G. glabra* com 8.891 indivíduos e densidade de 0.94 ind./ha enquanto que a mais rara foi *A. roseaodora* com 517 indivíduos e 0.05 ind./ha. A conversão da representação vetorial para o formato matricial do arquivo de localização dos indivíduos fez o número de células referentes à presença se tornar menor que o número real de ocorrência dos indivíduos (Tabela 2).

Tabela 2: Número e densidade de indivíduos existente na área de elaboração do modelo (n. ind. e n. ind./ha). Número e densidade das células de ocorrência de indivíduos após a conversão para o formato matricial (n. células e n. cel./ha) utilizados na análise da relação entre ocorrência dos indivíduos e topografia.

Espécie	n. de ind.	Densidade (n. ind./ha)	n. células	Densidade (n. cel./ha)
<i>A. roseaodora</i>	518	0.05	467	0.04
<i>C. micrantha</i>	4632	0.48	3365	0.35
<i>C. villosum</i>	901	0.09	813	0.08
<i>D. excelsa</i>	1715	0.18	1357	0.14
<i>D. odorata</i>	2582	0.27	2218	0.23
<i>G. glabra</i>	8991	0.94	5444	0.56
<i>M. huberi, M. bidentata</i>	3881	0.40	2126	0.22
<i>P. multijuga</i>	1211	0.12	981	0.10
<i>P. pendula</i>	622	0.06	594	0.06
<i>P. paniculada</i>	1149	0.12	981	0.10
<i>P. psilostachya</i>	2498	0.26	1956	0.20

As espécies que sofreram maior redução do número ocorrência foram as mais abundantes, isto porque a resolução espacial do arquivo matricial é de 93m. Com isso, indivíduos com distância menor que 93m entre si são representados por somente uma célula de ocorrência.

## 5.2 Análise da relação entre ocorrência das espécies arbóreas e topografia

A análise de regressão logística indicou associação entre a ocorrência dos indivíduos em relação à topografia para 10 espécies (Tabela 3). As espécies *D. excelsa*, *A. rosaeodora* e *C. villosum* tiveram o padrão de distribuição distinto das demais, em relação a topografia. *D. excelsa* teve relação positiva tanto com a declividade quanto com a altitude, sugerindo que a probabilidade de encontrar indivíduos dessa espécie é maior em lugares altos e íngremes, ou seja, no início dos platôs. *A. rosaeodora* mostrou-se negativamente relacionada com as variáveis topográficas analisadas, ocorrendo em locais de altitude e declividade baixas, estando assim associada às regiões de baixio. Já a ocorrência de *C. villosum* teve relação positiva com a declividade e negativa com a altitude, sugerindo que esta espécie ocorre nas vertentes e em baixas altitudes (Figura 10). Entretanto, as espécies *C. micrantha*, *G. glabra*, *M. huberi* e *M. bidentata*, *P. multijuga*, *P. pendula* e *P. psilostachya* evidenciaram semelhanças na maneira em que se distribuem ao longo da toposequência (Figura 11). Essas espécies mostraram-se associadas a locais de altitude elevada e baixa declividade, características que definem os ambientes de platô. As espécies *D. odorata* e *P. paniculata* não tiveram a distribuição estruturada pela topografia.

Tabela 3: Resultados obtidos pelas regressões logísticas realizadas entre a ocorrência dos indivíduos das espécies estudadas e altitude e declividade do terreno. Nível de siginificância:  $p \leq 0,05$ ;  $N = 10.967$ ; Graus de liberdade =2 e (\*) variável de maior influência sobre a ocorrência dos indivíduos da espécie.NS = Não significativo.

Nome vulgar	$\alpha$	$\beta$ altitude	$\beta$ declividade	G	p
<i>A. rosaeodora</i>	-0,3	-0,031*	-0,071	155,0	$p \leq 0,05$
<i>C. micrantha</i>	-9,76	0,140*	-1,220	3755,5	$p \leq 0,05$
<i>C. villosum</i>	-1,62	-0,018	0,213*	28,6	$p \leq 0,05$
<i>D. excelsa</i>	-3,34	0,014	0,039*	89,1	$p \leq 0,05$
<i>D. odorata</i>	-1,56	0,002	-0,005	4,2	NS
<i>G. glabra</i>	-2,04	0,030*	-0,188	402,9	$p \leq 0,05$
<i>M. huberi, M.bidentata</i>	-14,70	0,201*	-1,642	5416,4	$p \leq 0,05$
<i>P. multijuga</i>	-9,81	0,110*	-0,837	1237,9	$p \leq 0,05$
<i>P. paniculata</i>	-1,94	-0,004	-0,002	5,7	NS
<i>P. pendula</i>	-4,17	0,020*	-0,140	23,0	$p \leq 0,05$
<i>P. psilostachya</i>	-12,45	0,161*	-1,208	3523,4	$p \leq 0,05$

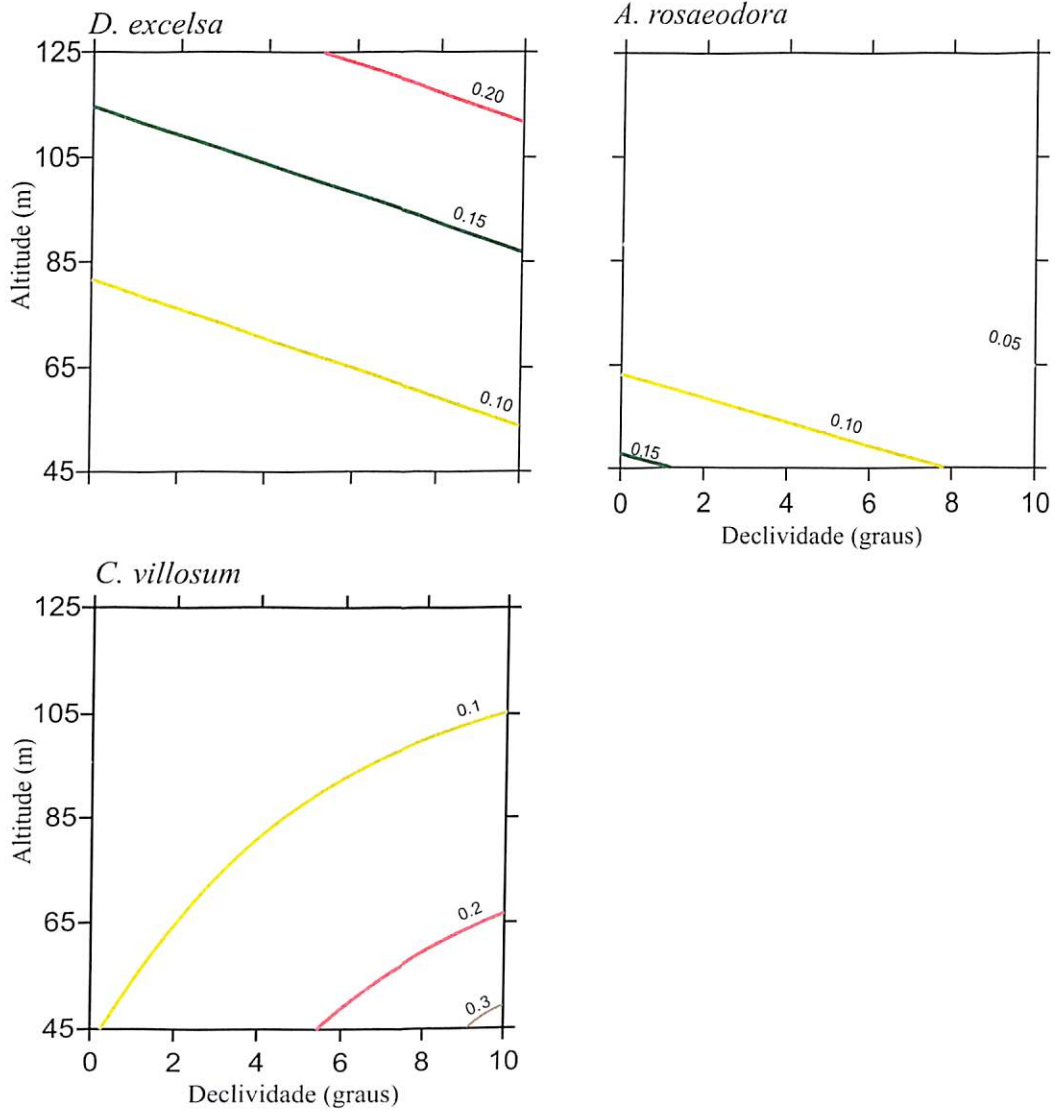


Figura 10. Probabilidade de ocorrência obtida em função da declividade e altitude do terreno a partir de regressão logística para as espécies *D. excelsa*, *A. rosaeodora* e *C. villosum*.



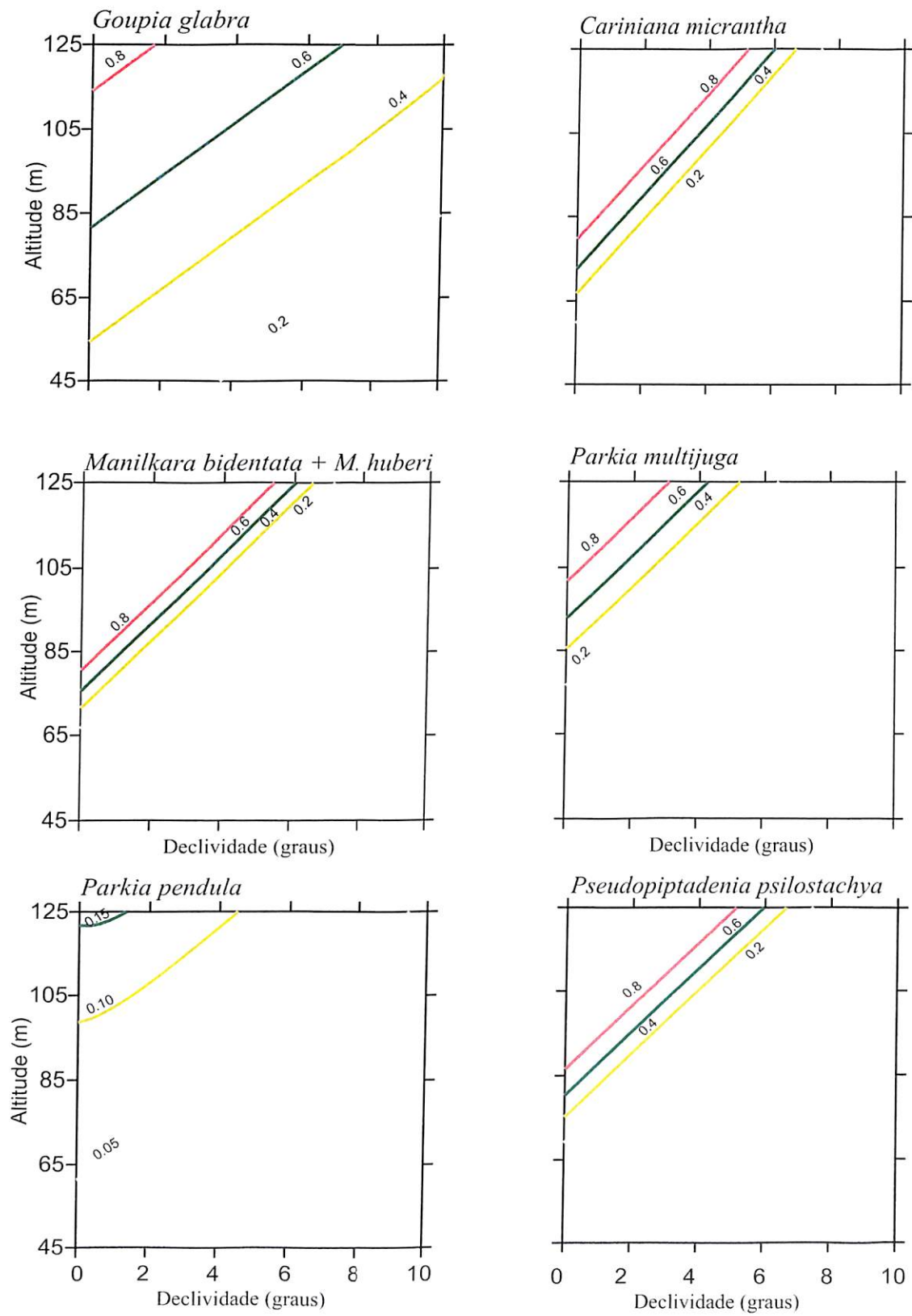


Figura 11. Probabilidade de ocorrência obtida em função da declividade e altitude do terreno a partir de regressão logística para as espécies *C. micrantha*, *G. glabra*, *M. huberi*, *M. bidentata*, *P. multijuga*, *P. pendula* e *P. psilostachya*.

### 5.3 Predição espacial de ocorrência das espécies vegetais

Os mapas de probabilidade de ocorrência das espécies estudadas representam a configuração espacial da distribuição prevista para cada espécie. É possível visualizar nos mapas das espécies que têm sua ocorrência influenciada pela topografia, concordância entre as probabilidades mapeadas e a variável topográfica de maior influência sobre a distribuição de seus indivíduos. Em geral, os valores máximos de probabilidade de ocorrência estimados para as espécies raras são menores que os obtidos para as espécies abundantes.

Os mapas da distribuição espacial da densidade obtida pelo método de Kernel para *A. rosaeodora*, *D. excelsa* e *P. pendula*, evidenciam amplas áreas de baixa densidade. Os valores máximos de probabilidade de ocorrência obtidos para essas espécies estão entre 0 e 0,15 (Tabela 4). A menor amplitude da probabilidade de ocorrência dessas espécies faz com que a superfície de probabilidade seja mais homogênea que as demais. No entanto, mesmo com essa pequena variação existe um gradiente de aumento da probabilidade em função da posição topográfica. No caso, de *P. pendula* há um aumento gradual da probabilidade de ocorrência em direção a locais mais elevados, e para *A. rosaeodora* em direção a locais mais baixos (Figura 12). A superfície encontrada para *D. excelsa* (Figura 13) tem os maiores valores de probabilidade localizados a partir das vertentes, o que é explicado devido à sua maior dependência com a declividade que com a altitude.

Tabela 4: Valores máximos e mínimos das probabilidades de ocorrência dos indivíduos estimadas a partir da altitude e declividade do terreno. As informações estão ordenadas de acordo com o valor máximo encontrado para cada espécie.

<b>Espécie</b>	<b>Valor máx. probabilidade</b>	<b>Valor min. Probabilidade</b>
<i>C. micrantha</i>	1	0
<i>M. bidentata</i> e <i>M. huberi</i>	1	0
<i>P. psilostachya</i>	0,99	0
<i>P. multijuga</i>	0,98	0
<i>G. glabra</i>	0,82	0
<i>C. villosum</i>	0,39	0,05
<i>P. pendula</i>	0,15	0,01
<i>A. rosaeodora</i>	0,15	0
<i>D. excelsa</i>	0,12	0,05

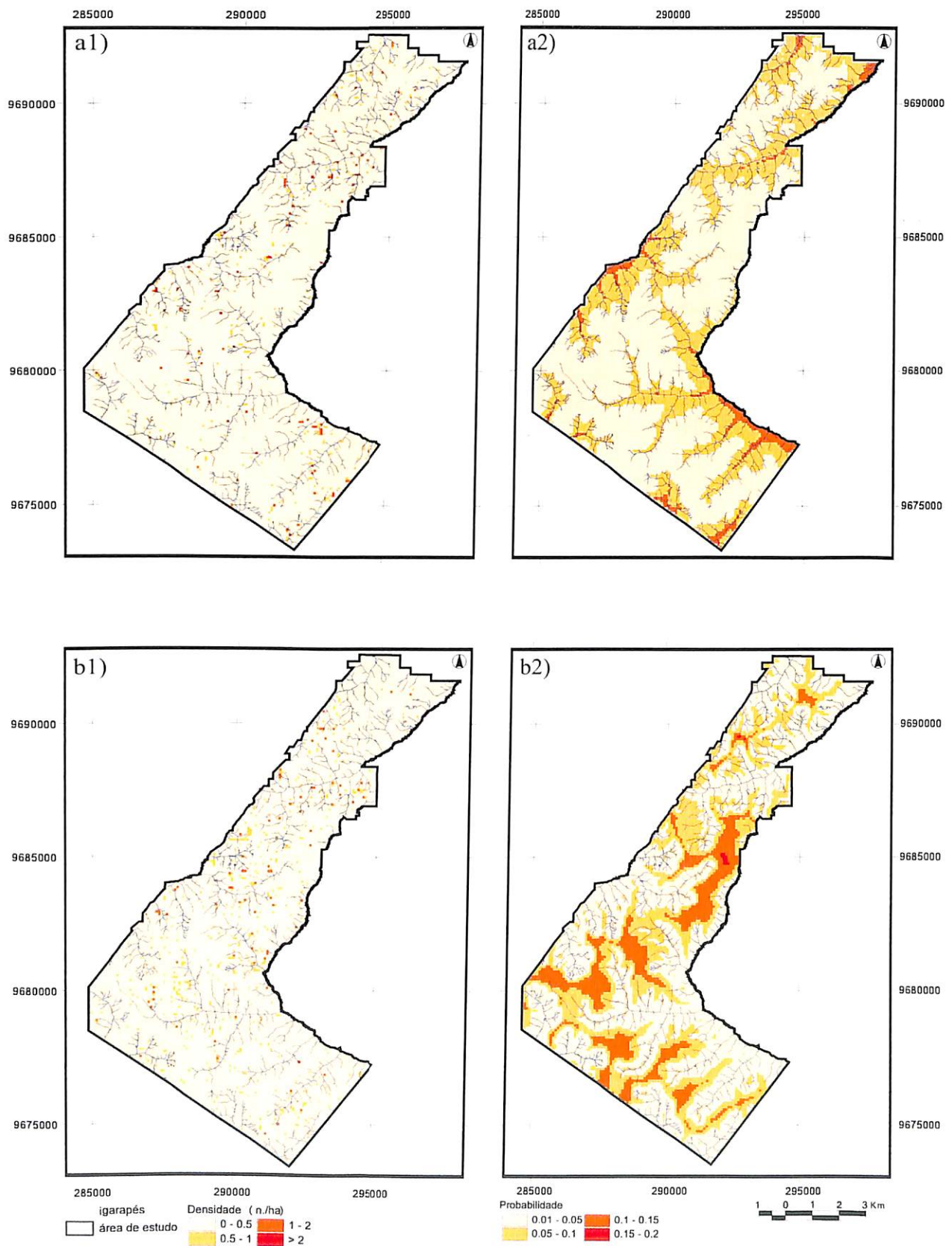


Figura 12. Mapas da densidade de indivíduos e probabilidade de ocorrência de *A. roasaedora* (a1, a2) e *P. pendula* (b1, b2) da área de elaboração do modelo preditivo.

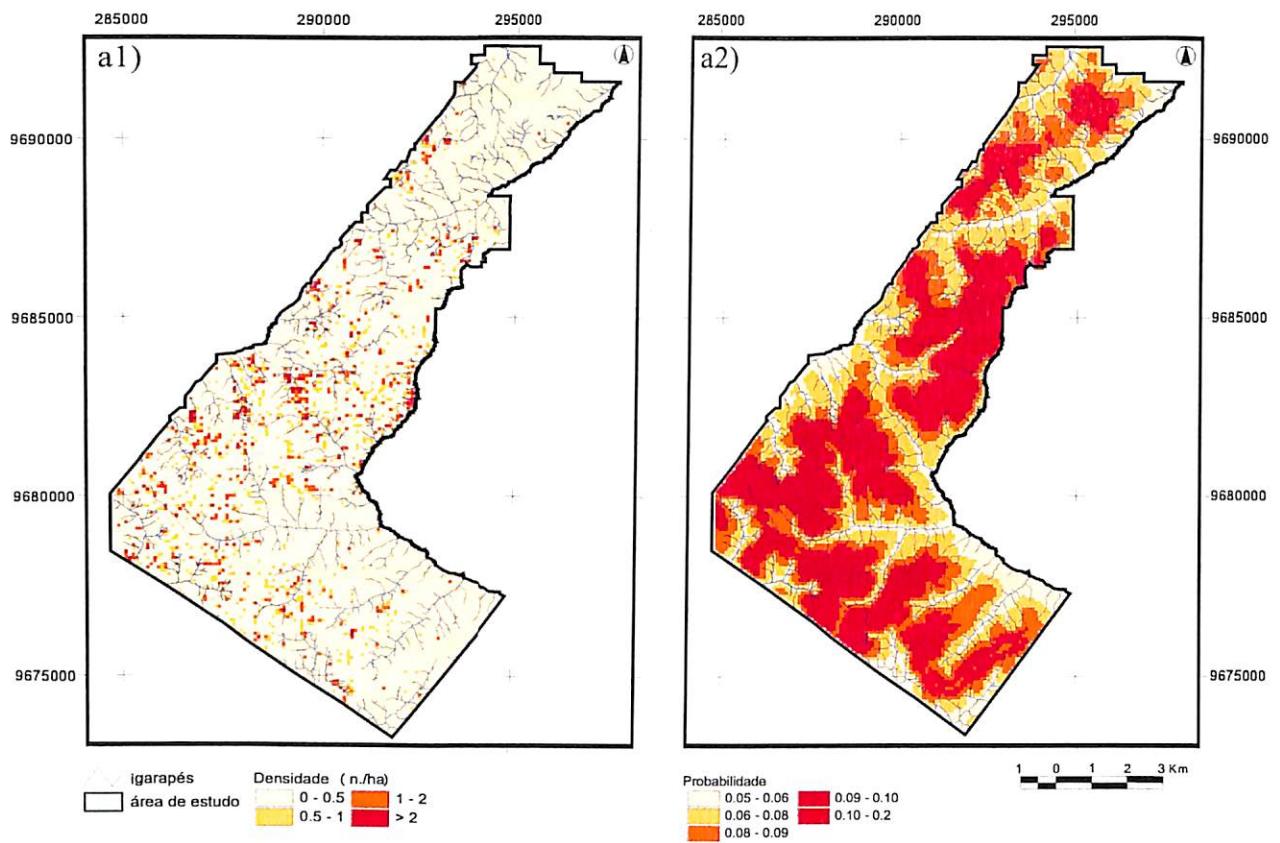


Figura 13. Mapas da densidade de indivíduos e probabilidade de ocorrência de *D. excelsa* (a1, a2) da área de elaboração do modelo preditivo

A probabilidade de ocorrência estimada para ocorrência das espécies *C. micrantha*, *M. huberi* e *M. bidentata*, *P. multijuga* e *P. psilostachya* variaram entre 0 e 1 (Tabela 4). A configuração espacial destas probabilidades acompanha estrutura de dependência dessas espécies com a topografia, estando as menores em locais de baixa altitude e as maiores em ambientes de platô. As densidades de *C. micrantha*, *M. huberi* e *M. bidentata* (Figura 14) e *P. multijuga* e *P. psilostachya* (Figura 15) foram elevadas nas áreas identificadas como áreas de alta probabilidade de ocorrência da área de elaboração do modelo preditivo. Já para *G. glabra* podemos observar tanto no mapa de probabilidade quanto no mapa de densidade que sua distribuição ocorre ao longo de toda toposequência, embora seja perceptível um aumento gradual de sua probabilidade de ocorrência em direção a locais mais altos (Figura 16). O mapa de probabilidade de ocorrência de *C. villosum* evidencia valores homogêneos na área estudada com um pequeno aumento em regiões de maior declividade e baixa altitude (Figura 16). A comparação visual entre os mapas de probabilidade de ocorrência e densidade para essa espécie evidencia congruência entre a distribuição estimada e a observada. Finalmente, os mapas de probabilidade de ocorrência de *D. odorata* e *P. paniculata* exibem valores homogêneos em toda a área de estudo, evidenciando que a topografia não estrutura a distribuição espacial destas espécies (Figura 17).

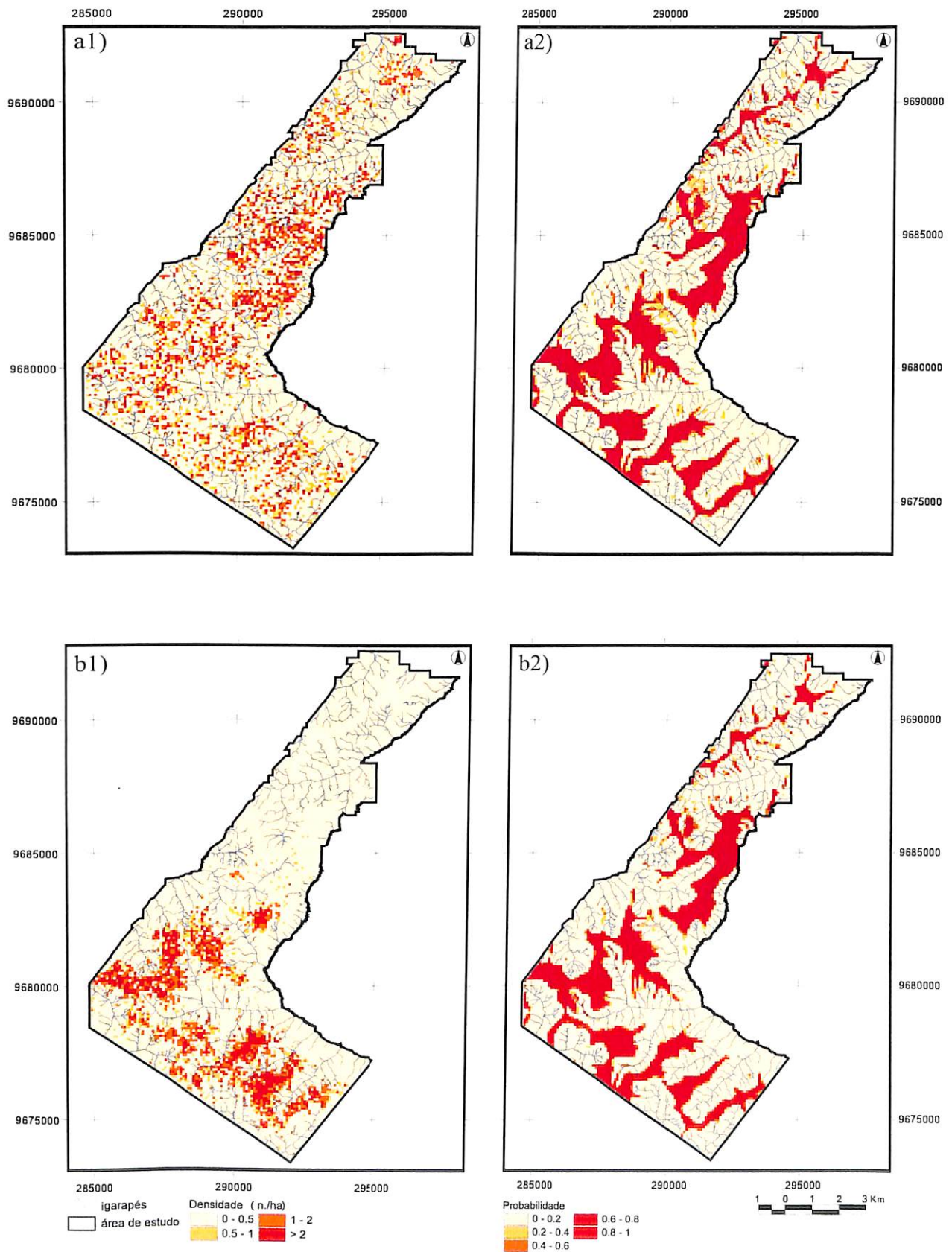


Figura 14 Mapas da densidade de indivíduos e probabilidade de ocorrência de *C. micrantha* (a1, a2) e *M. bidetata* e *M. huberi* (b1, b2) da área de elaboração do modelo preditivo.

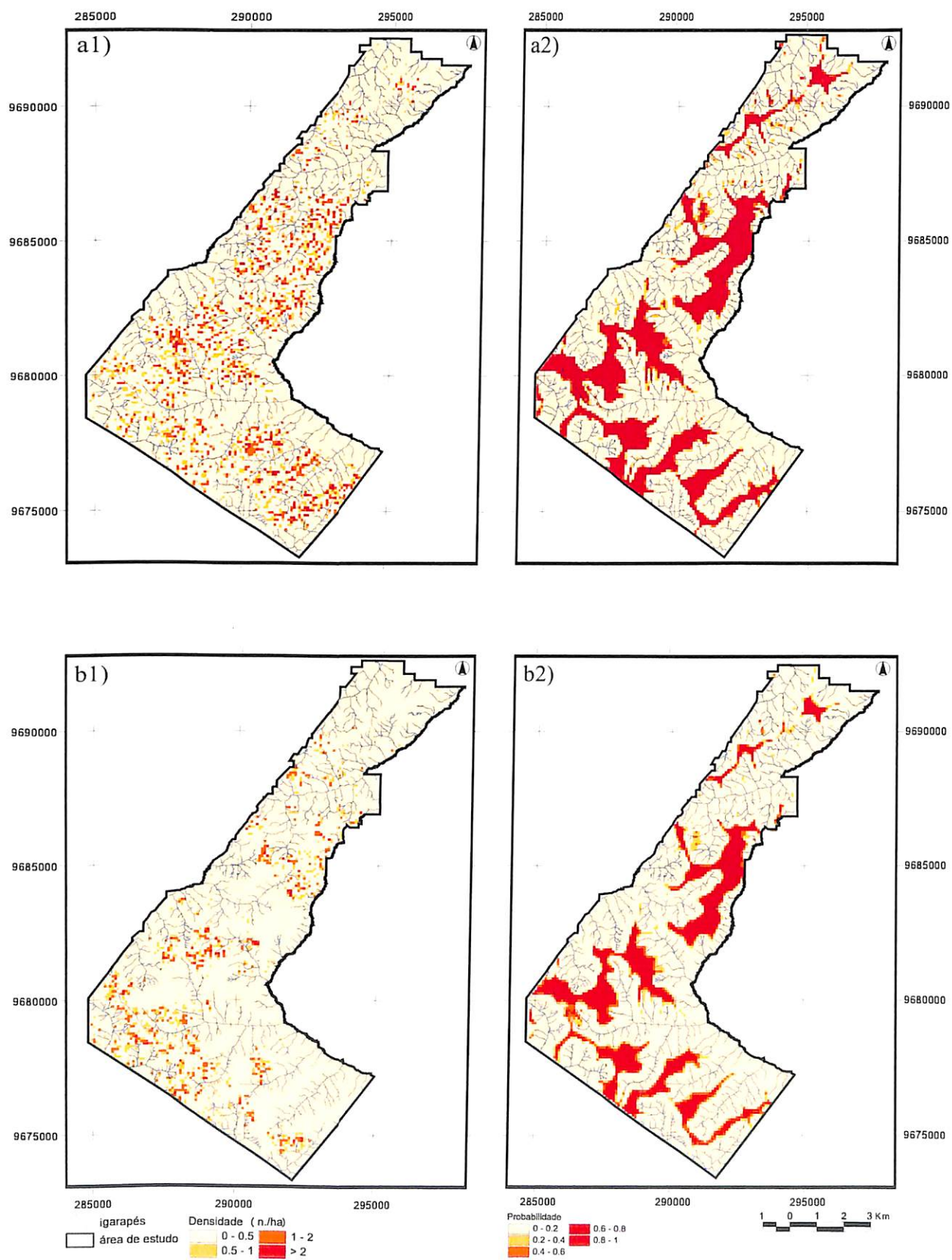


Figura 15 Mapas da densidade de indivíduos e probabilidade de ocorrência de *P. psilostachya* (a1, a2) e *P. multijuga* (b1, b2) da área de elaboração do modelo preditivo.



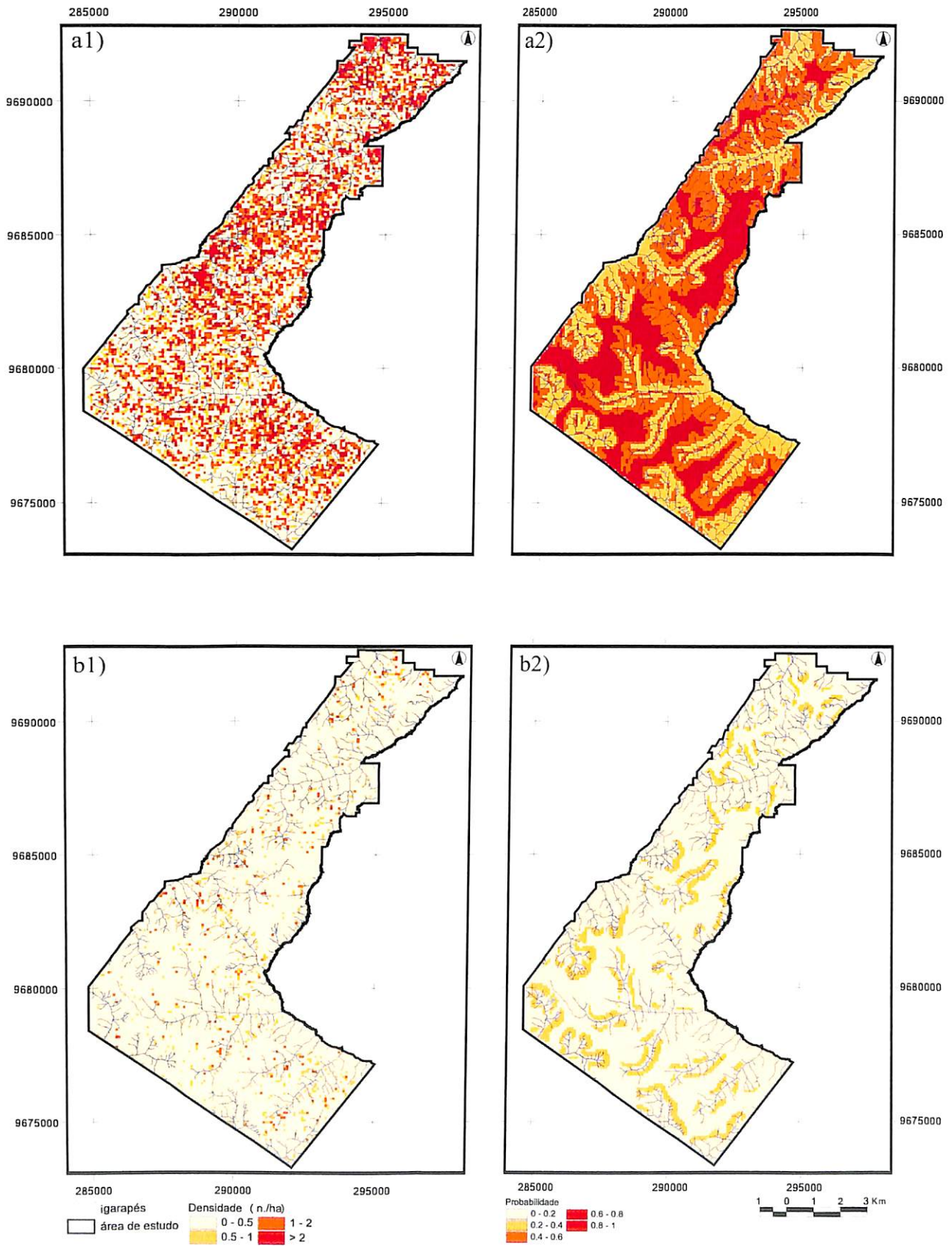


Figura 16. Mapas da densidade de indivíduos e probabilidade de ocorrência de *G. glabra* (a1, a2) e *C. villosum* (b1, b2) da área de elaboração do modelo preditivo.

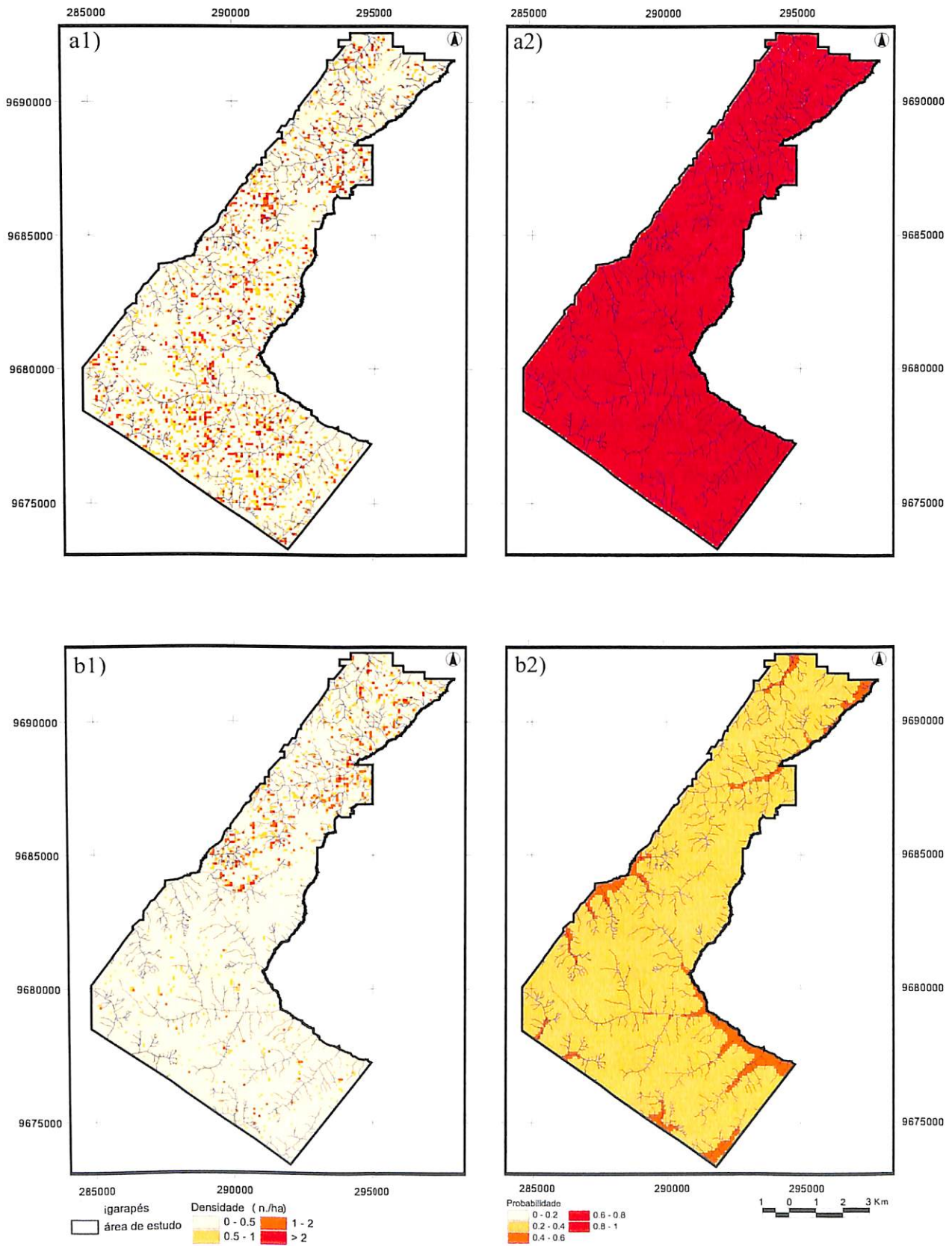


Figura 17. Mapas da densidade de indivíduos e probabilidade de ocorrência de *D. odorata* (a1, a2) e *P. paniculata* (b1, b2) da área de elaboração do modelo preditivo.

#### 5.4 Capacidade preditiva dos modelos

O índice de acerto de presença foi maior que a probabilidade de encontrar indivíduos ao acaso para *A. rosaeodora*, *C. micrantha*, *C. villosum*, *D. excelsa*, *P. pendula*, *M. bidentata* e *M. huberi*, *P. multijuga*, e *P. psilostachya*, indicando que o modelo é capaz de prever a distribuição dessas espécies na área onde foi elaborado. Já para as espécies *G. glabra*, *D. odorata* e *P. paniculata* o índice de acerto de presença foi igual a probabilidade de encontrar indivíduos ao acaso (Tabela 5). É importante ressaltar que o aumento da capacidade preditiva não se relaciona com a densidade de indivíduos, já que o acréscimo no acerto de ocorrência indivíduos de *A. rosaeodora*, espécie de baixa densidade, é maior que o acréscimo encontrado para *G. glabra*, espécie estudada de maior densidade (Figura 19).

Tabela 5. Parâmetros utilizados para análise da capacidade preditiva dos modelos de probabilidade de ocorrência das espécies estudadas.

Espécie	Índice de acerto de presença	Prob. acerto de presença ao acaso	Índice de acerto de ausência	Prob. acerto de ausência ao acaso	Acréscimo de acerto de presença
<i>A. rosaeodora</i>	0,06	0,04	0,96	0,96	0,50
<i>C. micrantha</i>	0,54	0,31	0,80	0,69	0,74
<i>C. villosum</i>	0,08	0,07	0,93	0,93	0,14
<i>D. excelsa</i>	0,13	0,12	0,88	0,88	0,08
<i>D. odorata</i>	0,20	0,20	0,80	0,80	0
<i>G. glabra</i>	0,51	0,50	0,52	0,50	0,02
<i>M. huberi</i> e <i>M. bidentata</i>	0,63	0,19	0,91	0,81	2,32
<i>P. multijuga</i>	0,25	0,09	0,93	0,91	1,78
<i>P. paniculata</i>	0,09	0,09	0,91	0,91	0
<i>P. pendula</i>	0,06	0,05	0,95	0,95	0,20
<i>P. psilostachya</i>	0,48	0,18	0,89	0,82	1,67

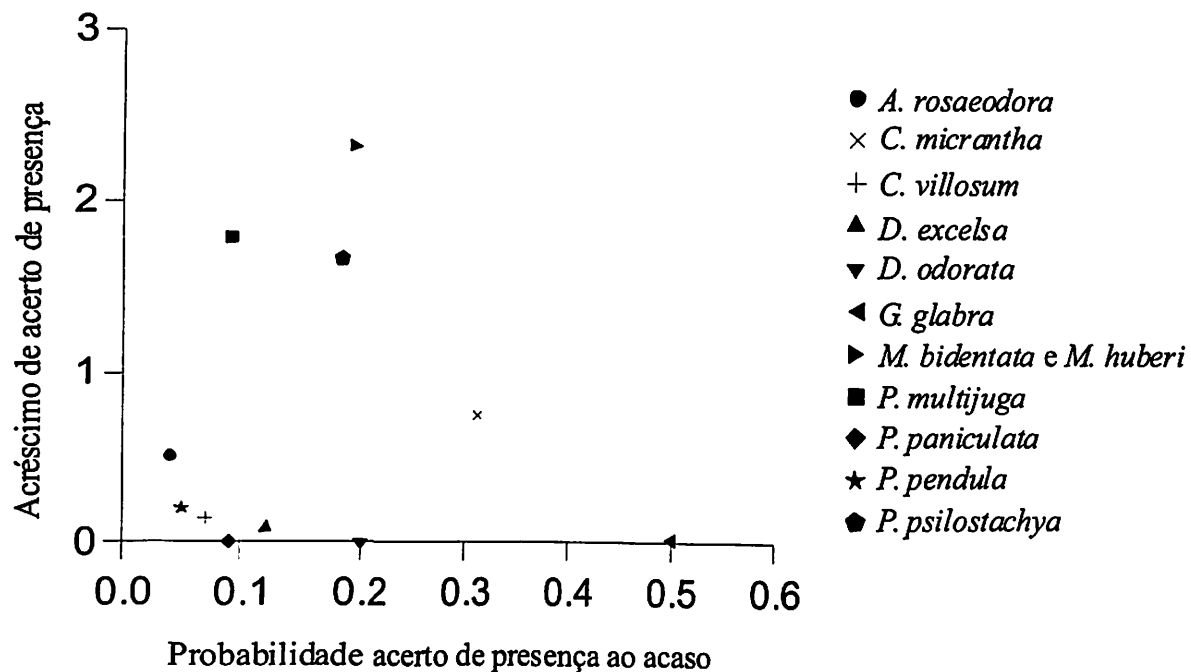


Figura 18. Relação entre a probabilidade de acerto de presença ao acaso e acréscimo de acerto de presença de indivíduos das espécies estudadas para a área de elaboração do modelo preditivo.

## 5.5 Validação

A área onde validei o modelo preditivo é composta por uma maior proporção de ambientes com cotas altitude mais baixa que a área onde o modelo foi elaborado (Figura 19).

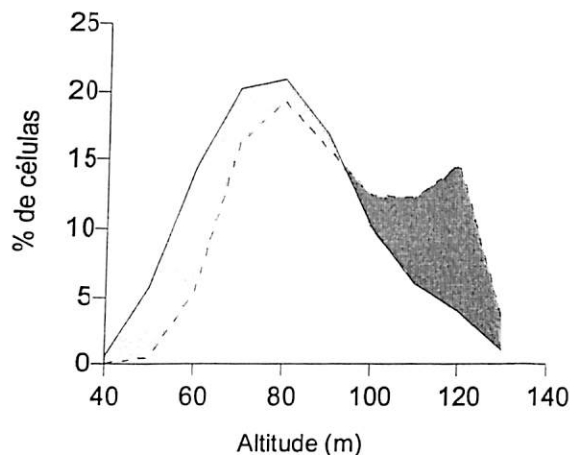


Figura 19. Porcentagem de células nas diferentes cotas de altitude na área de elaboração do modelo e validação. A linha pontilhada corresponde à área de elaboração do modelo e a linha contínua à área de validação. A área em cinza claro representa a maior disponibilidade de ambientes em cotas mais baixas na área de validação e a área em cinza escuro representa a maior disponibilidade de ambientes em cotas mais elevadas na área de elaboração do modelo.

O número total de indivíduos das 12 espécies encontrado na área de validação foi 14.737. A espécie mais abundante na área de validação foi *G. glabra* com 6.539 indivíduos e densidade de 1,05 ind./ha enquanto que a mais rara *M. huberi* e *M. bidentata* 155 indivíduos e 0.02 ind./ha (Tabela 6). A diferença entre as densidades totais encontradas na área de validação e do modelo variou entre as espécies (Figura 20).

Os resíduos da análise de covariância indicaram que a densidade de *C. villosum* não tem comportamento linear em relação a altitude tanto na área do modelo quanto na área de

validação, o que impossibilitou a continuidade dessa análise. Para *A. rosaeodora*, relação negativa entre altitude e densidade nas duas áreas. Já para *D. excelsa*, *P. pendula* e *P. multijuga* houve relação positiva entre altitude e densidade nas duas áreas. Assim, pode-se dizer que, para estas espécies, não ocorreu efeito de local, ou seja a altitude condiciona a ocorrência destas espécies em uma local e regional de paisagem. Já as espécies *C. micrantha*, *G. glabra*, *M. huberi* e *M. bidentata* e *P. psilostachya* apresentaram interação significativa entre local e altitude, ou seja, respondem positivamente à altitude mas de modo diferente entre as áreas. Em todos os casos, com exceção da *G. glabra*, a relação entre densidade e altitude foi mais acentuada na área de elaboração do modelo que na área de validação, embora a relação tenha se mantida significativa nas duas áreas. Já para *G. glabra* a relação entre altitude e densidade foi inversa nas duas áreas, sendo positiva na área do modelo e negativa na área de validação. Duas espécies, *D. odorata* e *P. paniculata*, não tiveram suas densidades relacionadas com a altitude, no entanto ocorreu efeito de local, sendo *P. paniculata* mais densa na área de validação e *D. odorata* na área do modelo. Esse fato pode ter causado distorções na construção dos modelos preditivos para tanto para *D. odorata* tanto para *G. glabra* (Tabela 7, Figura 21).

Tabela 6: Número e densidade de indivíduos existente no banco de dados da Mil Madeireira Itacoatiara (n. ind. e n. ind/ha) para a área de validação. Número a densidade das células de ocorrência de indivíduos após a conversão para o formato matricial (n. células e n. cel./ha) utilizados na análise da relação entre ocorrência dos indivíduos e topografia e elaboração do modelo preditivo.

espécie	n. de ind.	Densidade (n. ind./ha)	n. células presença	Densidade (n. cel./ha)
<i>P. pendula</i>	527	0.09	491	0.08
<i>D. excelsa</i>	1358	0.22	960	0.15
<i>D. odorata</i>	1397	0.23	1231	0.20
<i>G. glabra</i>	6539	1.06	3645	0.59
<i>P. paniculata</i>	1562	0.25	1354	0.22
<i>P. psilostachya</i>	166	0.03	145	0.02
<i>M. huberi e M. bidentata</i>	155	0.03	131	0.02
<i>P. multijuga</i>	499	0.08	367	0.06
<i>A. rosaeodora</i>	586	0.09	211	0.03
<i>C. villosum</i>	1041	0.17	890	0.14
<i>C. micrantha</i>	907	0.15	801	0.13

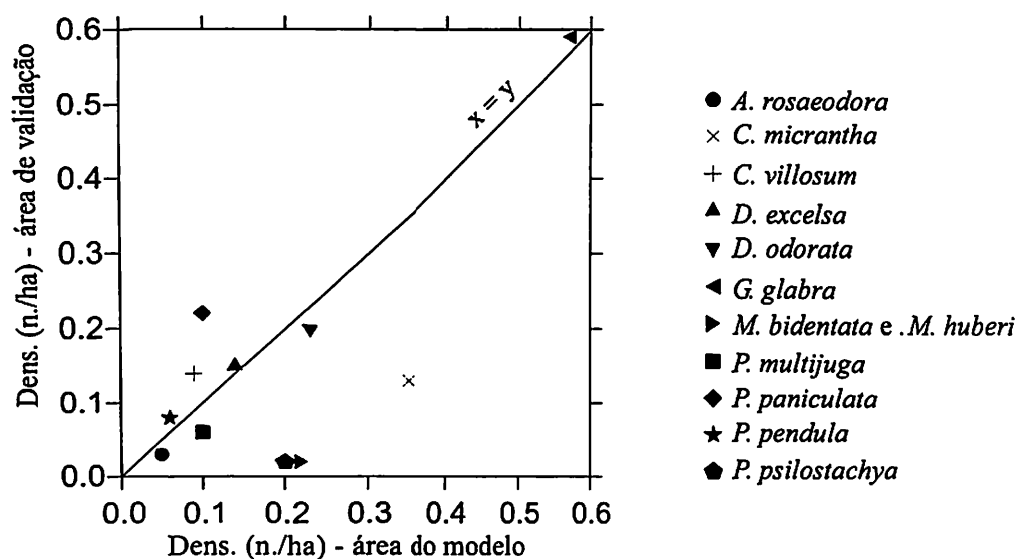


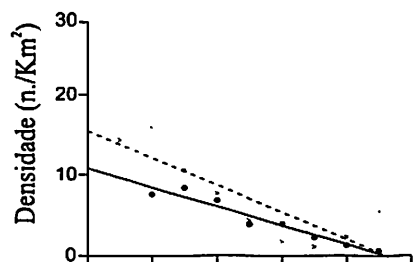
Figura 20. Diagrama de dispersão entre a densidade de células referente à presença de indivíduos na área de elaboração do modelo preditivo e de validação.

Tabela 7. Análise de covariância ente densidade observada e altitude nas áreas de elaboração e validação do modelo preditivo de ocorrência de espécies. N=20; GL=1; \*p<0,05

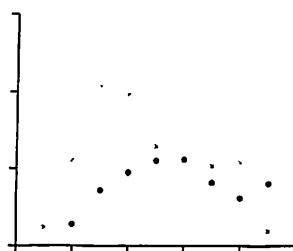
Espécie	r <sup>2</sup>	F <sub>altitude</sub>	F <sub>área</sub>	F <sub>altitude</sub> * F <sub>área</sub>
<i>P. pendula</i>	0.704	20.323*	16.352	-
<i>D. excelsa</i>	0.602	20.241*	2.066	-
<i>D. odorata</i>	0.379	0.597	7.447*	-
<i>G. glabra</i>	0.661	1.763	20.175*	24.012*
<i>P. paniculata</i>	0.834	2.000	65.409*	-
<i>P. psilostachya</i>	0.976	198.199*	77.335*	161.444*
<i>M. bidentata e M. huberi</i>	0.786	20.066*	5.278*	11.859*
<i>P. multijuga</i>	0.655	26.496*	0.659	-
<i>A. rosaeodora</i>	0.760	38.876*	2.860	-
<i>C. villosum</i>	0.109	0.126	1.485	-
<i>C. micrantha</i>	0.980	324.355*	41.830*	107.059*



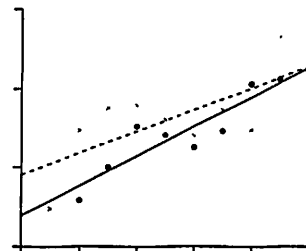
*A. rosaeodora*



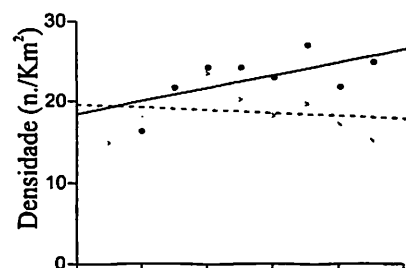
*C. villosum*



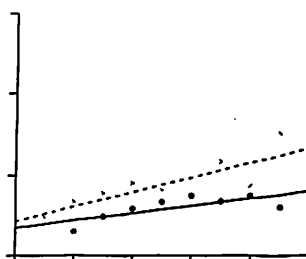
*D. excelsa*



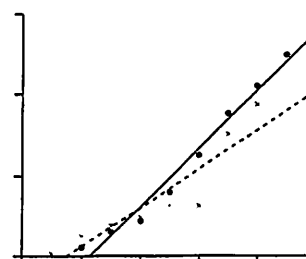
*D. odorata*



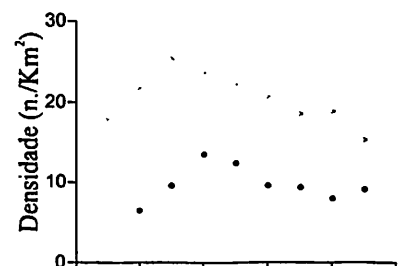
*P. pendula*



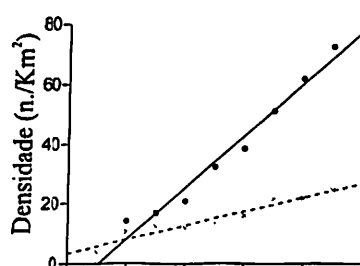
*P. multijuga*



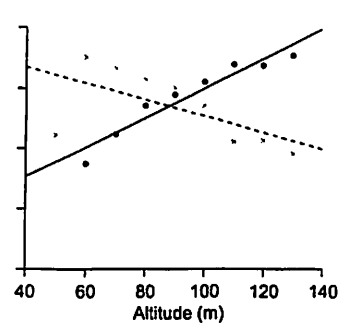
*P. paniculata*



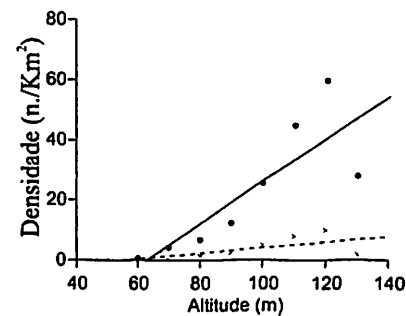
*C. micrantha*



*G. glabra*



*M. bidentata e M. huberi*



*P. psilostachya*

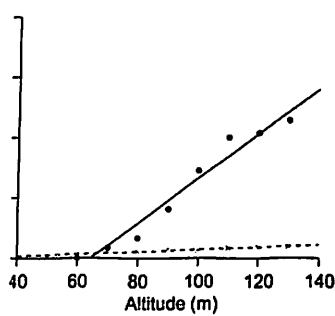


Figura 21. Relação entre a densidade média observada e altitude na área de elaboração e validação do modelo preditivo.

Legenda

- — Modelo
- × ..... Validação

Os mapas de probabilidade de ocorrência obtidos para a área de validação representam a distribuição esperada das espécies obtida a partir da relação entre ocorrência das espécies e topografia estabelecida na área onde o modelo preditivo foi elaborado. Observei nos mapas de *D. excelsa* e *P. pendula* uma maior proporção da área preenchida com baixos valores de probabilidade de ocorrência comparados aos observados nos mapas da área onde o modelo foi elaborado (Figura 22b e 22c). O inverso pôde ser observado no mapa obtido para *A. rosaeodora* (Figura 22a), que tem uma porção maior da área preenchida com valores mais elevados de probabilidade na área de validação que na área de elaboração do modelo. Já para os mapas de probabilidade de ocorrência da área de validação dos modelos de *C. micrantha*, *G. glabra*, *M. bidentata* e *M. huberi*, *P. multijuga* (Figura 23a, 23b, 23c e 23d) e *P. psilostachya* (Figura 24a) evidenciaram áreas restritas com valores elevados de probabilidade. Para *C. villosum* (Figura 24b) a distribuição das probabilidades estimadas foi semelhante nas áreas do modelo e validação.

A probabilidade de acertar a ocorrência de indivíduos, utilizando o modelo preditivo, foi 15 vezes maior que a probabilidade de encontrar indivíduos ao acaso para *M. bidentata* e *M. huberi*, oito vezes para *P. psilostachya* e duas vezes para *P. multijuga*. Para as espécies *A. rosaeodora*, *C. micrantha* e *C. villosum* o acréscimo no acerto de ocorrência ficou entre 0,1 e 0,9. Entretanto, o modelo não providenciou acréscimo no acerto de ocorrência dos indivíduos de *D. excelsa*, *G. glabra*, *P. multijuga* e *P. pendula*, ou seja, para estas espécies a probabilidade de acertar a ocorrência ao acaso é maior que a providenciada pelo modelo (Tabela 8, Figura 25).

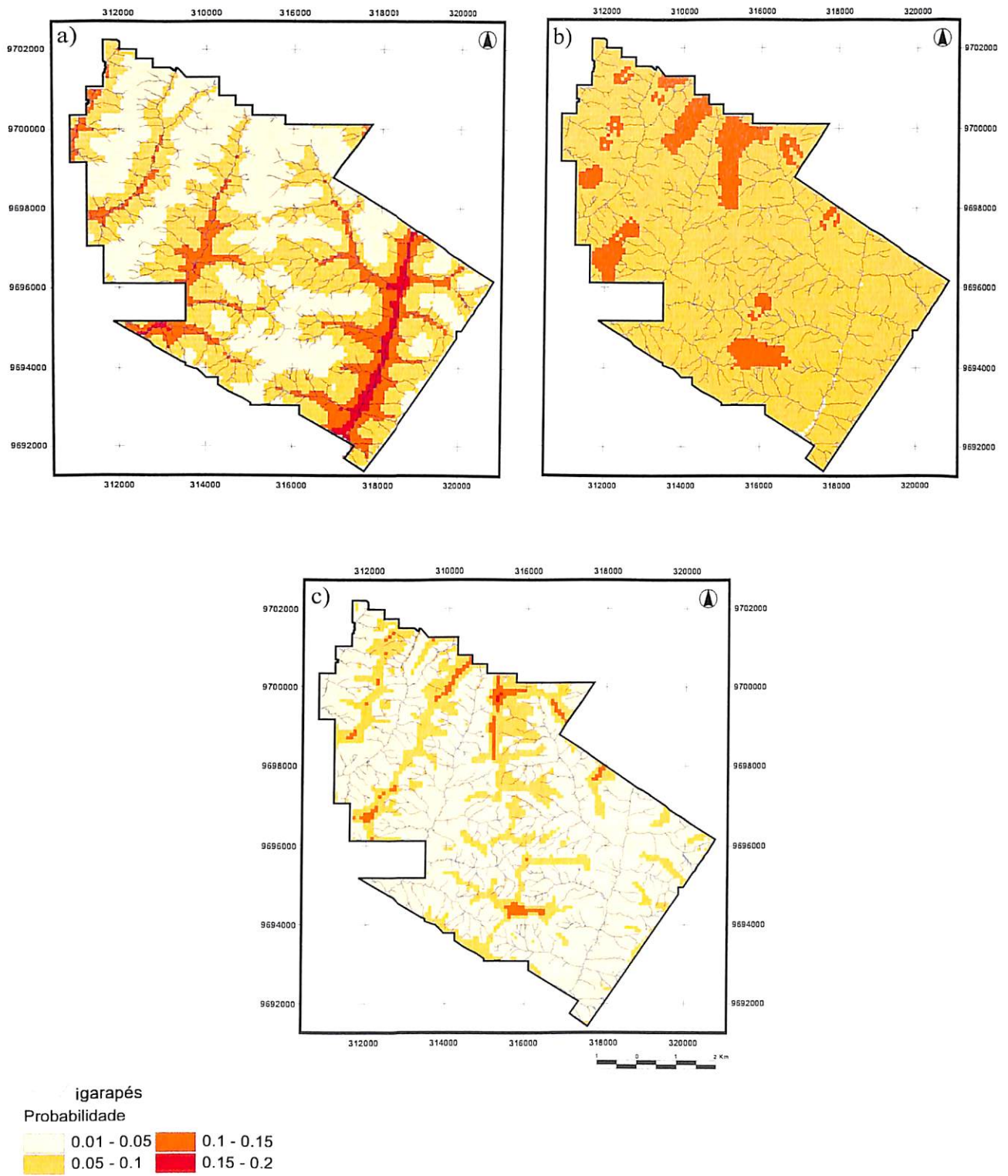


Figura 22. Mapa de probabilidade de ocorrência de *A. rosaeodora* (a), *D. excelsa* (b) e *P. pendula* (c) para a área de validação do modelo preditivo de ocorrência de espécies.

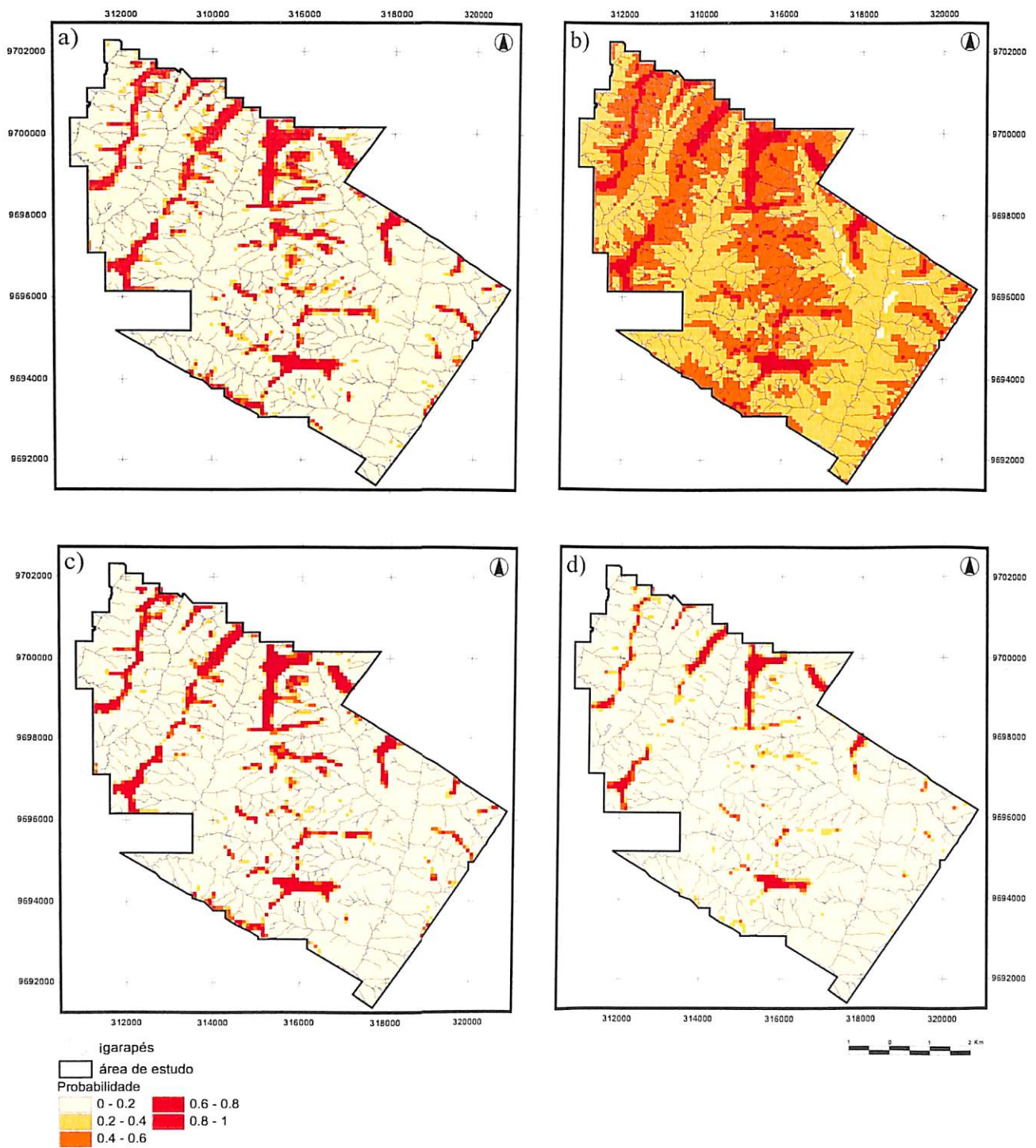


Figura 23. Mapa de probabilidade de ocorrência de *C. micrantha* (a), *G. glabra* (b) e *M. bidentata* e *M. huberi* (c) e *P. multijuga* para a área de validação do modelo preditivo de ocorrência de espécies.

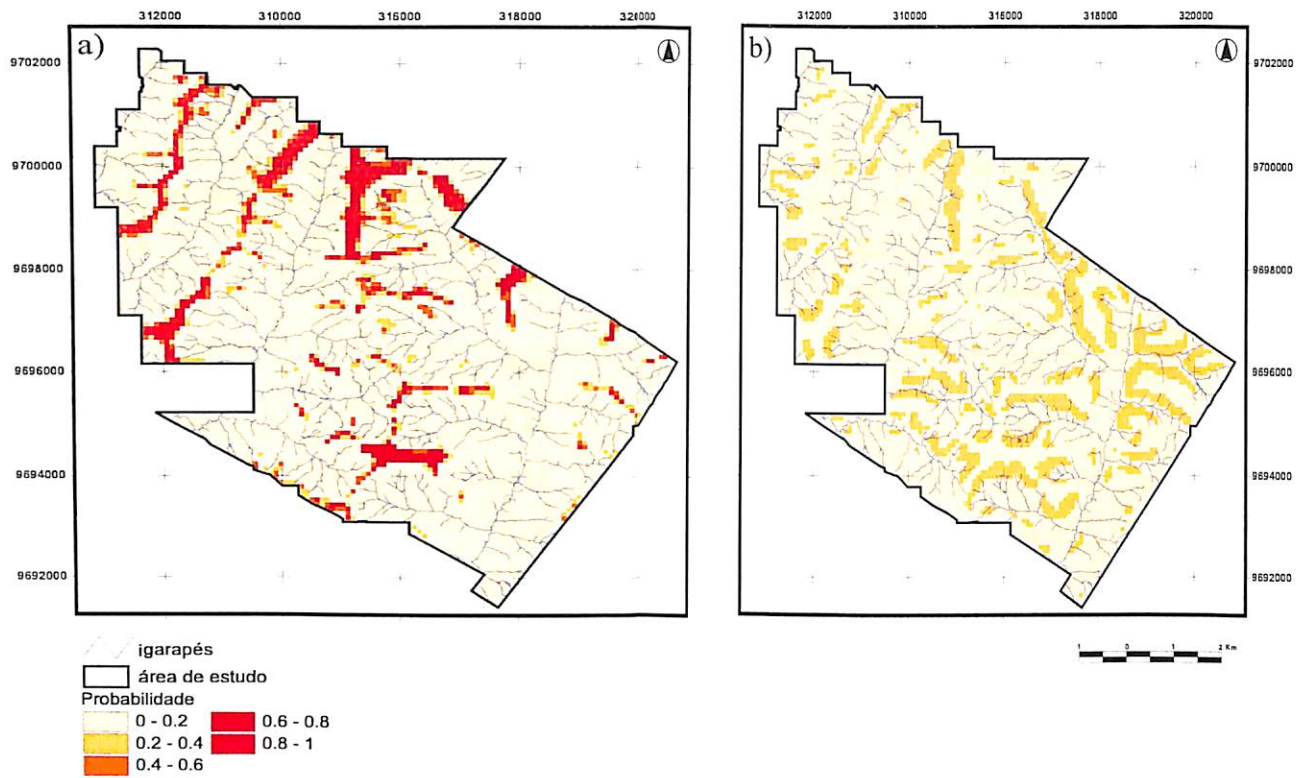


Figura 24. Mapa de probabilidade de ocorrência de *P. psilostachya* (a), *C. villosum* (b) para a área de validação do modelo preditivo de ocorrência de espécies.

Tabela 8: Parâmetros utilizados para análise da capacidade preditiva dos modelos de probabilidade de ocorrência das espécies estudadas na área de validação.

Espécie	Índice de acerto de presença	Prob. acerto de presença ao acaso	Índice de acerto de ausência	Prob. acerto de ausência ao acaso	Acréscimo de acerto de presença
<i>A. rosaeodora</i>	0.08	0,07	0.06	0,93	0,14
<i>C. micrantha</i>	0.21	0,11	0.14	0,89	0,91
<i>C. villosum</i>	0.17	0,12	0.16	0,88	0,42
<i>D. excelsa</i>	0.08	0,13	0.08	0,87	-0,38
<i>D. odorata</i>	0.19	0,17	0.19	0,83	0,12
<i>G. glabra</i>	0.31	0,51	0.42	0,49	-0,39
<i>M. huberi e M. bidentata</i>	0.32	0,02	0.11	0,98	15,00
<i>P. multijuga</i>	0.15	0,05	0.06	0,95	2
<i>P. paniculata</i>	0.10	0,19	0.10	0,81	-0,47
<i>P. pendula</i>	0.05	0,07	0.04	0,93	-0,29
<i>P. psilostachya</i>	0.18	0,02	0.10	0,98	8

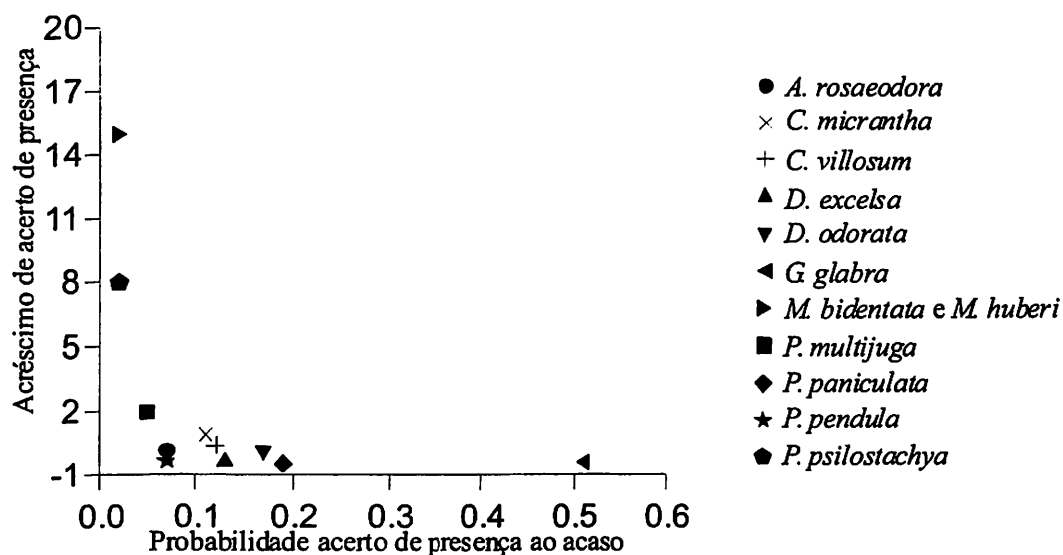


Figura 25. Relação entre a probabilidade de acerto de presença ao acaso e acréscimo de acerto de presença de indivíduos das espécies estudadas para a área de validação do modelo preditivo.

## **6. DISCUSSÃO**

### **6.1 Considerações sobre o delineamento, processamento dos dados e aplicação do método**

Uma das dificuldades dos estudos de distribuição espacial de árvores nas regiões tropicais é a baixa densidade encontrada para a maioria das espécies, o que exige amostragem de grandes áreas para obter dados suficientes (Tuomisto e Ruokolainen 1994). Os dados sobre a distribuição das 12 de espécies arbóreas analisadas neste trabalho foram coletados para manejo e exploração madeireira, por este motivo a área amostrada compreende mais de 10.000 ha. Esse tipo de dado, embora não tenha o refinamento das amostragens da vegetação realizadas para estudos ecológicos, pode contribuir para o entendimento da estrutura espacial da floresta. Isto porque dificilmente levantamentos de cunho puramente ecológico amostram áreas tão extensas. Outra etapa bastante importante e pouco presente em trabalhos ecológicos é a validação do modelo. Neste estudo foi reservada uma área de aproximadamente 6.000 ha para este fim. Essa etapa permitiu discutir sobre as vantagens e limitações de se aplicar o modelo em uma área distinta daquela onde foi elaborado.

As imagens do radar SRTM foram disponibilizadas na Internet em julho de 2002 ([http://srtm.usgs.gov/data/signed\\_mou.pdf](http://srtm.usgs.gov/data/signed_mou.pdf)), e ainda que existam limitações sobre a utilização desses dados, como por exemplo a baixa resolução espacial e as discontinuidades entre os pixels adjacentes, esses dados foram fundamentais para a realização deste trabalho. Os dados sobre relevo disponíveis para a maior parte da Amazônia são cartas topográficas na escala de 1:100.000. Para o tipo de estudo aqui apresentado as imagens SRTM são mais adequadas que as cartas topográficas pois fornecem informações sobre altitude como variável contínua ao longo da área de

interesse e têm resolução vertical de 1m, já as cartas topográficas representam áreas de altitude uniforme com diferenças altimétricas de 50m. É importante ressaltar que a baixa resolução espacial do Modelo Digital do Terreno (MDT) interfere na exatidão do mapeamento da declividade. Isto porque esta variável apresenta alta variabilidade a curtas distâncias e pequena frequência de valores altos, portanto seu mapeamento requer alta resolução espacial para uma representação adequada de sua variação (Valeriano 2003). Portanto, é importante que sejam realizadas validações em campo e com isso minimizar os erros associados ao MDT. Para a América do Norte já existem imagens disponíveis do SRTM com resolução de 30 metros e em breve é provável que teremos acesso a esta informação para a região amazônica. Caso isso ocorra, poderemos fazer modelos ainda mais precisos baseados na topografia. Outro fato importante é a ausência de custo para se trabalhar com estas imagens. Se conseguirmos gerar bons modelos preditivos sobre a distribuição de espécies arbóreas com dados provenientes do SRTM, passaremos a ter uma ferramenta eficiente e de baixo custo para modelar a distribuição destas espécies. Dado o contexto em que se insere a análise da configuração espacial da vegetação, a integração e análise dos dados sobre variáveis ambientais e ocorrência de espécies pode ser proveitosa para a compreensão da distribuição da diversidade na Amazônia. Desta forma, é importante que sejam realizados mais estudos com os dados disponibilizados pelas madeireiras certificadas de diferentes regiões para que possamos entender melhor os problemas de escala relacionados ao mapeamento preditivo na floresta de terra firme da Amazônia.

## **6.2 Eficiência do modelo preditivo na área de elaboração do modelo**

O modelo preditivo foi capaz de prever corretamente a ocorrência de *A. rosaeodora*, *C. micrantha*, *C. villosum*, *D. excelsa*, *G. glabra*, *M. huberi*, *M. bidentata*,



*P. multijuga*, *P. pendula* e *P. psilostachya* na área onde foi elaborado. Esse resultado indica que em determinados compartimentos da paisagem a topografia pode condicionar a distribuição de algumas espécies. Em geral, as características edáficas das florestas de terra firme da Amazônia central se alteram ao longo do gradiente de altitude. Nos ambientes de platô os solos são argilosos, com sedimentos mais antigos, já nos baixios os solos têm maior concentração de areia (Ferraz *et al.* 1998, Ribeiro *et al.* 1999). Desta forma, a topografia é uma medida indireta das mudanças do ambiente na paisagem (Tuomisto e Ruokolainen 1994) e portanto, as diferentes respostas das espécies frente às posição topográficas refletem a influencia que a variação ambiental pode ter sobre a estrutura espacial das dessas espécies.

Dentre as espécies aqui estudadas, foram encontradas descrição na literatura sobre a relação entre ocorrência e tipo de solo de para 5 espécies. *A. rosaedora* ocorre em latossolos amarelos e vermelhos, bem como em solos arenosos, preferindo áreas próximas às nascentes dos igarapés (Spironello *et al.* 2003). A relação encontrada entre a distribuição desta espécie e a posição topográfica coincide com a descrita por Spironello *et al.* (2003), já que no presente estudo a probabilidade de ocorrência de *A. rosaedora* foi maior em baixa altitude e declividade. Clement (2000) e Sampaio (2000,a) descrevem que *C. villosum* e *M. bidentata* e *M. huberi* adaptam-se bem a solos argilosos pesados, pobres em nutrientes, mas bem estruturados e bem drenados (Oxisolos e Ultisolos), sendo estes solos típicos de ambientes de platô. Os dados aqui analisados indicam que a distribuição de *C. villosum* é associada à alta declividade. Vale lembrar que, as vertentes são caracterizadas por serem a transição entre os ambientes de baixio e de platô, sendo fisionomicamente mais semelhantes aos platôs nas partes mais altas e aos baixios e campinaranas nas partes mais baixas. Desta forma a associação de *C. villosum* com a declividade encontrada pode tanto ocorrer devido a variação edáfica

quanto à variações ambientais ocorrem neste tipo de ambiente. Para *M. bidentata* e *M. huberi* há concordância entre resultados apresentados e a descrição encontrada na literatura. Para *D. odorata* é registrada associação a solos que variam de moderadamente arenosos a muito argilosos, desde que sejam bem drenados, e tanto a solos pobres e ácidos tanto a ricos em nutrientes (Sampaio 2000,b). Esta informação confirma a não estruturação da distribuição espacial desta espécie pela topografia. As informações sobre a ecologia das espécies estudadas estão, em sua maioria, disponíveis em forma de publicação não convencional como notas técnicas ou resumos apresentados em congressos. Este fato dificultou a contraposição dos resultados aqui obtidos com a descrição já existente para estas espécies. Uma busca mais exaustiva e a organização dessas informações ecológicas sobre cada uma das espécies enriqueceriam a interpretação dos padrões observados. No entanto, é importante lembrar que para outras regiões tropicais é encontrada relação entre a posição topográfica e a composição de espécies arbóreas (Clark *et al.* 1995, Clark *et al.* 1999).

A interpretação isolada dos valores máximos de probabilidades indica que espécies como *A. rosaeodora*, *P. pendula* e *D. excelsa* teriam uma relação de dependência com a topografia mais fraca que as demais espécies. Porém, ao analisar a relação desses valores com a densidade dos indivíduos verifiquei que os maiores valores de probabilidade estimada foram encontrados para as espécies mais densas. Os baixos valores de probabilidade máxima encontrados para as espécies raras expressam o fato de que é realmente difícil definir áreas com alta probabilidade de ocorrência dessas espécies . Por exemplo, os valores máximos de probabilidade de ocorrência de *A. rosaeodora* (Tabela 4) estão localizados em áreas de baixo, isso não indica que *A. rosaeodora* ocorre em outros tipos de ambientes e que por isso sua probabilidade de

ocorrência é baixa. Mas sim que, é raro encontrar indivíduos de *A. rosaeodora* e que a maioria dos que são encontrados estão localizados em baixo.

O índice de acerto de presença dos indivíduos é influenciado pela densidade, pois ele é estimado a partir da razão entre a soma das probabilidades de ocorrência nas células de presença e o número de células de presença. Desta forma, espécies densas têm índices de acerto de presença mais elevados que espécies raras. Por esse motivo, é importante analisar os índices de acerto de presença em associação com a probabilidade de se encontrar indivíduos ao acaso, pois dessa forma é possível estabelecer qual a magnitude de acréscimo de acerto de ocorrência de indivíduos providenciado pelo modelo. A não relação entre o acréscimo de acerto de ocorrência dos indivíduos e a densidade sugere que os modelos foram capazes de identificar corretamente regiões de ocorrência tanto de espécies raras, como *A. rosaeodora*, quanto para espécies densas como *M. bidentata* e *M. huberi* e *P. psilostachya*. No entanto, para *G. glabra* o acréscimo de acerto de ocorrência foi próximo de zero, isto possivelmente porque esta espécie ocorre em densidades elevadas em todas as cotas de altitude.

### **6.3 Validação do modelo**

A diferença na abundância e densidade das espécies entre a área do modelo e de validação (Figura 20) indica que os processos que regulam a composição, abundância e distribuição de árvores variam com a escala espacial em que são analisados (Terborg *et al.* 2002). Desta forma, a diferença da densidade de indivíduos observada nas áreas estudadas pode ser causada pela variabilidade de disponibilidade de ambiente, ou por efeitos locais que covariam com a topografia. Até o momento existe pouca informação sobre a importância da geomorfologia na estruturação de comunidades de árvores na Amazônia Central. No entanto, um estudo sobre distribuição espacial de 22 espécies de

palmeiras, realizado por Garcia (2000) ao norte de Manaus, detectou associação entre a ocorrência de indivíduos e os compartimentos geomorfológicos estabelecidos.

A dispersão também é um importante mecanismo que causa variação entre a distribuição local e regional de árvores. Tuomisto *et al.* (2003) encontram relação negativa entre a similaridade de espécies de Melastomataceae e Pteridofita e distância ambiental. Contudo, a relação entre similaridade e distância geográfica para Melastomataceae foi mais forte que a encontrada para Pteridofita. Os autores sugerem então que a diferença de síndrome de dispersão pode causar alterações na abundância dos organismos em diferentes locais já que as Pteridófitas são dispersas pelo vento e assim podem colonizar áreas distantes, enquanto que as espécies de Melastomataceae são principalmente zoocóricas e por isso são menos abundantes regionalmente. No entanto, para as espécies aqui estudadas não foi possível estabelecer uma relação entre o tipo de dispersão e a diferença entre as abundâncias dos indivíduos na área do modelo e de validação.

A variação das densidades entre as áreas do modelo e de validação ao longo do gradiente topográfico (Figura 21), teve comportamentos distintos para as espécies estudadas. Para *A. rosaeodora*, *D. excelsa*, *D. pendula* e *P. multijuga* houve relação entre altitude e densidade nas duas áreas. Neste caso, podemos dizer que a densidade é maior onde ocorre a combinação de variáveis ambientais que correspondem aos requerimentos dessas espécies. Brown (1984) argumenta que se a variação ambiental é espacialmente correlacionada, o aumento da distância dos lugares adequados para a ocorrência da espécie explica o declínio de sua abundância, já que as condições ambientais adequadas se tornarão menos frequentes. Desta forma, a variação espacial da densidade depende da estrutura espacial dos fatores ambientais que afetam a ocorrência da espécie (Franklin 1995). Clark *et al.* (1999) com o objetivo de avaliar a distribuição

de espécies arbóreas e sua relação com fatores edáficos na escala de paisagem, amostraram árvores, palmeiras e características edáficas nos 573 ha da Estação de La Selva, Costa Rica. Os autores encontraram que aproximadamente 30% das 132 espécies de palmeiras e árvores mais comuns apresentaram distribuição não aleatória em relação ao tipo de solo e posição topográfica. Assim, fatores edáficos e topográficos podem influenciar tanto o padrão de ocorrência de espécies arbóreas tanto a distribuição espacial das densidades das populações vegetais.

A análise de covariância não detectou relação entre a densidade de *C. villosum* e *P. paniculata* com altitude. Muito embora os modelos de regressão logística e análise de covariância não tenham detectado uma relação entre altitude e densidade para *P. paniculata*, é evidente que essa relação existe e não é linear tão pouco monotônica, o que impossibilita esses modelos captarem este padrão. Dados de distribuição espacial com esta estrutura necessitam de outro tipo de modelagem. Desta forma, a curva de resposta da espécie em relação ao gradiente ambiental é uma consideração fundamental na modelagem de distribuição de espécies (Austin 2002).

Para as espécies *C. micrantha*, *M. huberi* e *M. bidentata* e *P. psilostachya* verificamos diferença na magnitude da relação entre a densidade de indivíduos e altitude nas áreas do modelo e de validação. Este fato pode ser explicado pela menor densidade dessas espécies na área de validação que na área do modelo em todas as cotas de altitude (Figura 21). Assim, possivelmente há variação em uma escala regional na abundância desses indivíduos. Possivelmente, a menor abundância de indivíduos dessas espécies na área de validação é causada pela menor disponibilidade de ambientes de platôs nessa região, já que essas espécies tiveram sua distribuição associada positivamente com a altitude e negativamente com a declividade. É importante lembrar

que este trabalho analisa somente os indivíduos com  $DAP \geq 40\text{cm}$ , assim pode ser que na área de validação um menor número de indivíduos alcancem essa classe de DAP.

O modelo de regressão logística detectou relação entre a posição topográfica e a ocorrência de *G. glabra*, já a análise de covariância detectou que a altitude estrutura a distribuição espacial dessa espécie de forma inversa nas duas áreas.. Isso fez com que o modelo logístico não previsse corretamente as densidades na área de validação. Sendo *G. glabra* uma das espécies mais abundantes nas duas áreas, a ocorrência de um comportamento completamente inverso em relação ao relevo evidencia a importância de se considerar informações sobre escalas locais e regionais para a construção de modelos preditivos a serem aplicados em escala regional. Neste caso, o ajuste local dos modelos foi altamente satisfatório, porém a extrapolação dos resultados de uma área para outra gera estimativas espúrias. Considerando este fato, o uso de grandes áreas contínuas (10.000 ha) para construção de modelos preditivos, pode não levar em conta as variações que ocorrem em uma escala regional de paisagem.

O índice de acerto de presença na área de validação foi maior que a probabilidade de encontrar indivíduos ao acaso para *A. rosaeodora*, *C. micrantha*, *C. villosum*, *D. odorata*, *M. bidentata* e *M. huberi*, *P. multijuga*, e *P. psilostachya* (Tabela 7, Figura 25). Este resultado significa que para essas espécies é possível indicar regiões de provável ocorrência de indivíduos com uma margem de acerto maior que a esperada ao acaso. Pitman *et al.* (2001) sugerem que modelos baseados em oligarquias de espécies têm potencial para prever a ocorrência de 34 a 59% das espécies presentes em uma área não visitada da floresta de terra firme da Amazônia peruana. No entanto, a extrapolação de inventários locais para áreas ainda não amostradas deve ser feita com grande precaução, pois existem diferenças reais entre as áreas, mesmo que a floresta aparente ser similar (Tuomisto *et al.* 2003). A variação do acréscimo de acerto entre as

espécies, aqui verificada, indica que modelos preditivos de distribuição de espécies arbóreas podem prever corretamente a ocorrência de espécies em determinada área, mas que a extrapolação para outras áreas deve considerar, dentre outros fatores, a variação na abundância regional dos indivíduos.

Sempre, em algum grau, os mapas da distribuição de espécies contêm erros, porque as predições são baseadas em modelos estatísticos, sendo que a precisão nas predições pode ser quantificada a partir da espacialização dos resíduos (Elith 2002). Avaliar a qualidade das predições é importante em qualquer processo de modelagem. Assim, a validação é fundamental na avaliação e interpretação dos modelos (Lehmann *et al.* 2002). O termo validação, neste trabalho, não é utilizado no sentido de provar se a distribuição de espécies prevista pelo modelo é verdadeira ou falsa. Isso seria perigoso porque sabemos *a priori* que em algum grau de certeza a predição está incorreta. Desta forma, não foram aplicados testes estatísticos para determinar se esses valores eram estatisticamente diferentes. O aumento do poder de predição providenciado pelo modelo é influenciado pelos fatores que estruturam espacialmente as espécies. Assim, se o modelo contempla os fatores preponderantes na ocorrência das espécies o poder de predição é maior. Assim, a compreensão dos fatores que interferem na distribuição espacial das espécies e sua incorporação aos modelos preditivos podem providenciar modelos mais próximos da realidade. Portanto, a incorporação de informações refinadas da variação ambiental, estudos aprofundados da relação espécie-ambiente (Pitman *et al.* 2001), análise da distribuição das árvores em escala regional e a aplicação de ferramentas como sistemas de informações geográficas e sensoriamento remoto (Franklin 1995) podem contribuir para a modelagem da distribuição espacial das árvores.

## 7 Bibliografía

- Asquith, N. M. 2002. **La dinámica del bosque y la diversidad arbórea**. In: Guariguata, M. R., Catan, G. H. ed. *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. Catargo: Ediciones LUR, pp. 377-406.
- Austin, M. P. 1996. **Predictive species spatial distribution: an interface between theory ecological and statistic modeling**. In: Goodchild, M. F., Steyaert, L. T., Parks, B. O., Johnston, C., Maidment, D., Orane, M., Glendinning, S. ed. *GIS an environmental medeling: progress and research issues*. New York: Wiley, pp. 11-15.
- Barbosa, C. C. 2003. **Modelagem**. [On line] <[www.dpi.inpe.br/teses/claudio/CAP3.html](http://www.dpi.inpe.br/teses/claudio/CAP3.html)> fev. 2003.
- Brown, J. H. 1984. On the relationship between abundance and distribution os species. *The American Naturalist* 124(2): 255-279.
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A. 1998. **Principles of Gepgraphical Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics**. New York: Oxford University, 333p.
- Cherrill, A. J., McClean C., Watson, P., Rushton, S. P., Sanderson, R. 1995. Predictinhg the distribution of plant species at regional scale: a hierarchical matrix model. *Landscape Ecology* 10(4): 197-207.
- Clark, D. B. 2002. **Los fatores edáficos y la distribución de las plantas**. In: Guariguata, M. R., Catan, G. H. ed. *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. Catargo: Ediciones LUR, pp. 193-222.
- Clark, D. B., Palmer, M. W., Clark, D. A. 1999. Edaphic factors and the landscape-scale distributions of tropical rain forest trees. *Ecology* (80)8: 2662-2675.



- Clement, C. H. **Piquiá: *Cariocar villosum***. In: Biodiversidade Amazônica: exemplos e estratégias de utilização. Ed.: Clay, J. W., Sampaio, P. T. B., Clement, C. R. Manaus: INPA, SEBRAE. pp.227-232.
- Connel, J. H., Tracey, J. G., Werr, L. J. 1984. Compensatory recruitment, growth, and mortality as factors maintaining rain- forest tree diversity. **Ecological Monographs** 54 (2): 141-164.
- Currie, D. J., Paquin, V. 1987. Large-scale biogeographical patterns of species richness of trees. **Nature** 329 (24): 326-327.
- Elith, J. 2002. Predicting the distribution of plants. Ph.D. thesis (unpublished). School of Botany, The University of Melbourne, Australia.
- ESRI. 1996. Arcview GIS. Redlands, CA, USA, **Environment Systems Research Institute**.
- ERDAS. 1999. **Erdas Field Guide**, 5th. edn. Erdas Inc., Atlanta, GA.
- Franklin, J. 1995. Predictive vegetation mapping: geographic modeling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. **Progress in Physical Geography** 19(4): 474-499.
- Garcia, J. P. M. 2000. **A geomorfologia como instrumento de identificação de unidades físico naturais em florestas úmidas: o exemplo da Reserva Km 41 (1501) Manaus – AM**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Guisan, A., Zimmermann, N. E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. **Ecological Modelling** 135:147-186.
- Gentry, A. H. 1988. Tree species richness of upper Amazonian forests. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the States of America** 85 (1): 156-159.

- DeGoerden, D. 2000. **First Analysis of Silvicultural Field Experiment in a Central Amazonian Moist Forest**. Msc thesis. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Hosmer, D.W. & Lemeshow, S. 1989. **Applied Logistic Regression**. New York: John Wiley & Sons, 307p.
- Janzen, D. H. 1970. Herbivores and number of tree species in tropical forests. **American Naturalist** 104 (940): 501- 515.
- Lehmann, A., Overton, J. M., leathwick, J. R. 2002. GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction. **Ecological Modelling** 157:189-207.
- Martini, A., Rosa N. A., Uhl, C. 2001. **Espécies de árvores potencialmente ameaçadas pela atividade madeireira na Amazônia**. In: Capobianco, J. P. *et al.* ed. Biodiversidade na Amazônia brasileira: avaliação e ações prioritárias para a conservação, uso sustentável e repartição de benefícios. São Paulo: Estação Liberdade, Instituto Sócio Ambiental. pp. 338-347.
- Matteucci, S. D., Colma, A. **Metodología para el estudio de la vegetacion**. 1982. Washington: Eva V. Chesneau. 163p.
- Minte-Vera, C. V. Métodos de análise espécie ambiente. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ictiologia**. 54: 17-19. 1998.
- Moreira, M. A. 2001. Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação. São José dos Campos: INPE. 250 pp.
- Mortara, M. O. 2000. **Modelagem da distribuição potencial do palmitheiro (*Euterpe edulis* Martius) em região montanhosa a partir de variáveis topográficas**. Instituto

- Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao José dos Campos, SP. INPE-8857-TDI/805. 157 pp.
- Pereira, J. M., Itami, R. M. 1991. GIS-Based habitat modelling using logistic multiple regression: a study of the Mt. Graham red squirrel. **Photogrametric Engineering & Remote Sensing** 57 (11): 1475-1486.
- Pitman, N. C. A., Terborg, J. W., Silvan, S. R., Núñez, P. V., Neill, D. A., Cerón, C. E., Palacios, W. A., Aulestia, M. 2001. Dominance and distribution of tree species in upper Amazonian terra firme forests. **Ecology** 82(8): 2101-2117.
- Ribeiro, J. E. L. S., Hopkins, M. J. G., Vicentini, A., Sothers, C. A., Costa, M.A. da S., Brito, J. M., Souza, M. A. D., Martins, L. P., Lohmann, L. G., Assunção, P. A. C. L., Pereira, E. da C., Silva, C. F. da, Mesquita, M, R., Procópio, L.C. 1999. **Flora da Reserva Ducke: Guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra-firme na Amazônia Central**. Manaus: INPA. 794p.
- Ruokolainen, K., Linna, A., Tuomisto, H. 1997. Use of *Melastomatacea* and *pteridophyte* for releasing phytogeographical patterns in Amazonian rain forests. **Journal of Tropical Ecology** 13:243-256.
- Sampaio, P. T. B. **Cumarú: *Dipteryx odorata***. In: Biodiversidade Amazônica: exemplos e estratégias de utilização. Ed.: Clay, J. W., Sampaio, P. T. B., Clement, C. R. Manaus: INPA, SEBRAE. pp.281-289.
- Sampaio, P. T. B. **Maçaranduba: *Manilkara huberi***. In: Biodiversidade Amazônica: exemplos e estratégias de utilização. Ed.: Clay, J. W., Sampaio, P. T. B., Clement, C. R. Manaus: INPA, SEBRAE. pp.227-232.

- Siegel, S. **Estatística não-paramétrica para ciências do comportamento**. 1975. São Paulo: Mc Graw-Hill, 350p.
- Spironello, W. R., Sampaio, P. T. B., Vieira, G., Barbosa, A. P. 2003. **Ecologia reprodutiva do Pau-rosa (*Aniba rosaeodora* Ducke, Lauraceae) em uma mata de terra firme na Amazônia Central**. In: Projeto Jacaranda Fase II: Pesquisas Florestais na Amazônia Central. Eds.: Higushi, N., Santos, J., Sampaio, P. T. B., Marengo, R. A., Ferraz, J., Sales, P. C., Saito, M., M, S. Manaus: INPA. pp. 69-85
- Terborg, J., Pitman, N., Silman, M., Shichter, H., Núñez, P. 2000. **Maintenance of tree diversity in tropical forests**. In: Seed dispersal and frugivory: ecology, evolution and conservation. Ed.: levey, D., J., Silva, W. R., Galetti, M. IV Simpósio internacional de frugivoria e dispersao de sementes 3. São Paulo: São Paulo.. pp. 1-17.
- Terborgh, J., Andrensen, E. 1998. The composition of Amazonian forests: patterns at local and regional scales. **Journal of Tropical Ecology** 14: 645-664.
- ter Braak, C. J. F., Looman, C. W. N. 1995. **Regression**. In: Jogman, R. H. G., ter Braak, C. J. F., van Tongeren, O. F. R ed. Data analysis in community and landscape ecology. New York: University of Cambridge, pp. 29-75.
- ter Steege, H., Sebatier, D., Castellano, H., van Andel, T., Duivenvoorden, J., Oliveira, A. A., EK, R., Lilwah, R., Maas, P., Mori, S. 2000. An analysis of the floristic composition and diversity of Amazonian forests including those of the Guiana Shield. **Journal of Tropical Ecology** 16: 801-828.
- Tuomisto, H. Ruokolainen, K., Yli-Halla, M. 2003. Dispersal, environment, and floristic variation of western Amazonian forests. **Science** 299 (5604): 241-244.

- Tuomisto, H., Ruokolainen, K. Distribution of Pteridophyta and Melastomataceae along an edaphic gradient in an Amazonian rain forest. 1994. *Journal of Vegetation Science* 5: 25-34.
- Ustin, S. L., Smith, M. O., Jacquemond, S., Verstraete, M., Govaerts, Y. 1999. **Geobotany: vegetation mapping in earth sciences**. In: Rencz, A. N. ed. *Remote Sensing for the Earth Sciences*. New York: John Wiley & Sons. pp.189-248.
- Valeriano, M. M. 2003. Mapeamento da declividade em microbacias com sistemas de informação geográfica. *Revista Brasileira de Engenharia agrícola e Ambiental* 7(2): 1-8.
- Wright, S. J. P. Plant diversity in tropical forests: a review of mechanisms of coexistence. *Oecologia* 130 (1): 1-4. 2002.