



HAL
open science

Paysage des systèmes de production agropastoraux de l'État du Rondônia - Amazonie brésilienne

Claudio Aparecido de Almeida

► **To cite this version:**

Claudio Aparecido de Almeida. Paysage des systèmes de production agropastoraux de l'État du Rondônia - Amazonie brésilienne. Sciences de la Terre. Université Montpellier, 2016. Français. NNT : 2016MONTT123 . tel-01646443

HAL Id: tel-01646443

<https://theses.hal.science/tel-01646443>

Submitted on 23 Nov 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivrée par l'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

Préparée au sein de l'école doctorale GAIA (N°584)
et de l'UMR ESPACE-DEV

Spécialité : SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'EAU (STE)

Présentée par Cláudio Aparecido DE ALMEIDA

**Paysage des systèmes de production
agropastoraux de l'État du Rondônia -
Amazonie brésilienne**

Soutenue le 09/12/2016 devant le jury composé de

Mme Frédérique SEYLER, Directeur de recherche IRD

Directeur de
thèse

M. Vincent DUBREUIL, Professeur, Un. Rennes 2

Rapporteur

M. Laurent POLIDORI, Directeur de recherche, CNRS

Rapporteur

Mme Agnès BÉGUÉ, Chercheur CIRAD

Examineur

M. Damien ARVOR, Chargé de recherche, Un. Rennes 2

Examineur

Mme Nadine DESSAY, Ingénieur de recherche, IRD

Co-Encadrant
de thèse



Thèse partiellement prise en charge par :



**Programa Ciência Sem Fronteiras
de Bolsa de Estudos para
Doutorado Pleno no Exterior**

Réalisée au sein de :

Unité Mixte de Recherche ESPACE-DEV
Équipe Observation Spatiale de l'Environnement (OSE)
Maison de la télédétection - Montpellier, France



Supportée par :



Décembre 2016

Montpellier, France

“La difficulté n’est pas de voir ce que personne n’a jamais vu, mais de penser comme personne n’a jamais pensé au sujet de quelque chose que tous voient”.

“Importante não é ver o que ninguém viu, mas sim, pensar o que ninguém pensou sobre algo que todo mundo vê”.

Arthur Schopenhauer

Dedico este trabalho a flor da minha vida, Nancy. Companheira, apoiadora e grande incentivadora dos meus progressos.

Aos meus filhos, para que nele encontrem inspiração para vencer suas próprias batalhas.

Aos meus pais, por reconhecimento e gratidão.

REMERCIEMENTS

L'élaboration d'une thèse de doctorat n'est pas un travail que l'on peut réaliser seul. C'est un processus auquel contribuent de nombreuses personnes, parfois de façon claire et directe, parfois fortuitement aux différentes étapes de notre développement professionnel. Ainsi en faisant ici mes remerciements, je ne prétends pas (ce serait impossible) de citer tous ceux qui d'une façon ou d'une autre ont contribué à ce projet; mais, même en courant le risque d'oublier quelqu'un, je me dois de remercier ceux qui ont été les plus proches de moi pendant cette importante étape de ma vie professionnelle.

Merci tout d'abord aux membres du jury de cette thèse:

- à M. Laurent Polidori, directeur du Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO) à Toulouse et directeur de recherche au CNRS, et à M. Vincent Dubreuil professeur à l'Université de Rennes et chercheur à l'UMR 6554 LETG (Littoral-Environnement-Téledétection-Géomatique) à Rennes pour avoir accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs ;
à
- à Mme Agnès Bégué, responsable de l'équipe Acquisition et Traitement de données en Téledétection et d'Observations Spatialisées (ATTOS) de l'UMR Territoires, Environnement, Téledétection et Information Spatiale (TETIS) et M. Damien Arvor, chargé de recherche au CNRS et membre également du LETG pour avoir examiné mon travail avec attention.
- , à Mme Frédérique Seyler directrice de l'UMR ESPACE-DEV, unité de l'Institut de Recherche pour le Développement pour m'avoir fait l'honneur d'être ma directrice de thèse et m'avoir accueilli dans son laboratoire localisé à Montpellier à la Maison de la Téledétection.
- à Mme Nadine Dessay, responsable de l'équipe Observation Spatiale de l'Environnement/UMR ESPACE-DEV co-encadrante de thèse, pour le temps qu'elle m'a consacré, pour ces remarques toujours constructives et pour son accueil.

-
- à Mme Helen Gurgel professeur adjoint à l'Université de Brasilia responsable du laboratoire de Géographie Environnement et Santé (LAGAS) et au docteur Laurent Durieux de l'UMR ESPACE-DEV, pour m'avoir invité à rejoindre le groupe de recherche de l'UMR ESPACE-DEV et m'avoir apporté un regard éclairé sur ce travail de thèse.

Ensuite je tiens à remercier l'Institut National de Recherches Spatiales (INPE) qui, bien plus que mon employeur est le lieu où j'ai construit ma carrière et où, jour après jour, j'ai œuvré pour un monde meilleur. À l'INPE toute ma trajectoire est liée au Programme Amazonie, dont je suis un des collaborateurs avec M. Dalton Valeriano et M. Luis Maurano.

Je remercie mes camarades de la Division de traitement des images (DPI), du Centre régional d'Amazonie (CRA), et ceux du projet TerraClass (de l'INPE et de l'EMBRAPA), dont l'aide et le soutien ont été fondamentaux pour la réalisation de ce travail. Tout au long de ces trois années, j'ai compté sur leur sollicitude sous forme de conseils, d'informations et d'encouragements.

Je remercie l'Institut brésilien de l'environnement (IBAMA) et en particulier son surintendant pour l'État du Rondônia M. Renê Luiz de Oliveira de son appui fondamental pendant mes enquêtes de terrain et sans lequel je n'aurais pas eu la chance de connaître aussi bien l'État du Rondônia et de valider mes recherches.

Je remercie également la Coordination de perfectionnement du personnel de niveau supérieur (CAPES) de m'avoir octroyé une bourse d'études issue du programme Science sans frontières (BEX 6083/13-3), une aide financière fondamentale pour la construction des connaissances scientifiques.

Je remercie l'Institut de la Recherche pour le Développement (IRD), qui contribue de façon notoire à la recherche et au développement des pays du Sud tout en resserrant les liens d'un partenariat durable.

Un remerciement spécial au Centre National d'Études Spatiales (CNES) qui à travers l'appel "TOSCA" a permis ma participation au projet AGRIZONE. Ce projet a mis en place des échanges méthodologiques avec d'autres groupes de recherche français et a ouvert de nouvelles aires d'étude.

En la personne de M. Frédéric Huynh, représentant de l'IRD au Brésil, je remercie toute l'équipe de l'IRD à Brasilia de leur appui. Je tiens également à remercier, par l'intermédiaire de M. Philippe Martineau, l'Ambassade de France au Brésil qui a apporté son appui à ce projet. Le soutien de l'Ambassade à des projets de coopération scientifique développe des échanges entre groupes de recherches brésiliens et français où tous sont gagnants.

Je remercie ma grande amie Mme Alessandra Gomes, Responsable du Centre Régional d'Amazonie (CRA) de l'INPE à Belém pour avoir partagé avec moi le travail pour le CRA et l'Amazonie.

Je remercie Thérèse Libourel, ancienne directrice de l'UMR Espace-Dev qui a mon arrivée à Montpellier est intervenue à plusieurs reprises pour m'expliquer les méandres de l'école doctorale.

Je remercie Gilbert David, responsable de l'équipe Approche Intégrée Milieux et Sociétés (AIMS) pour ces remarques pertinentes sur les territoires et pour m'avoir permis de découvrir de l'arrière-pays viticole Montpelliérain.

Je remercie également Mme Anne Elizabeth Laques, Directeur de recherche à l'UMR ESPACE-Dev en poste à Brasilia pour avoir partagé avec moi ses connaissances et sa vision sur les paysages amazonien.

Je suis également reconnaissant aux différents chercheurs de l'UMR ESPACE-DEV qui m'ont apporté aux travers de leurs suggestions et de leurs contributions une vision interdisciplinaire : Mme. Danielle Mitja chercheur écologue spécialiste du babaçu amazonien ; M Jean-François Faure, ingénieur, porteur IRD du projet GEOSUD ("GEOinformation for SUsustainable Development » ; M Benoit Mertens chercheur spécialisé sur les forêts tropicales et coordinateur du projet GEOAFRI ; M. Eric Delaitre ingénieur de recherche de l'équipe OSE spécialiste des milieux arides et tropicaux ; M. Emmanuel Roux et M. Morgan Mangeas chercheur de l'équipe Modélisation-Ingénierie des Connaissances-Analyses des Données Spatiales (MICADO) pour leurs suggestions et leurs contributions dans le domaine des mathématiques et des statistiques spatiales.

Je tiens à remercier M. Eric Bourland, détaché à l'UMR ESPACE DEV de l'ambassade de France à Brasilia pour ses agréables discussions sur les politiques françaises et brésiliennes et Espérance Cillauren pour son aide toujours précieuse.

Je voudrais remercier également les collègues doctorants et post-doctorants Alexandre Wiefels, YI Moua, Alessio Moreira, Eudes Bomfim, Leandro Da Silva Gregorio, Fany, Savio Barros de Mendonça, Zhichao LI, Eleneide Doff Sotta, Thibault Catry avec qui j'ai eu le plaisir de partager le bureau et de très bons moments au café et aux repas, et avec qui les conversations et apprentissages sont allés bien au-delà des questions techniques. Cette ambiance conviviale et fraternelle m'a beaucoup appris sur la diversité.

Mes remerciements vont aussi à Agnès, Véronique et Sylvie, toujours si disponibles, qui m'ont aidé de nombreuses fois à résoudre les questions administratives et même personnelles.

Enfin, je remercie surtout ma famille qui a été à mes côtés pendant ce parcours, et surtout à ma chère Nancy, fleur de ma vie, qui est, et sera toujours ma compagne de batailles et de joies.

Mes remerciements et ma gratitude à tous ceux qui m'ont appuyé, et mes excuses à ceux qui n'ont pas été expressément cités ici, mais qui ont d'une façon ou d'une autre collaboré à la réalisation de cette thèse.

Résumé

Les accords mondiaux parrainés par l'ONU pour le développement durable et la réduction des émissions de gaz d'effet de serre, proposent la réduction de la déforestation et l'augmentation de la productivité des zones occupées par les systèmes de production agropastoraux. En Amazonie brésilienne, la déforestation couvre une zone de 760,305.5 km² en 2014. Les différents usages de la zone déforestée ont des impacts environnementaux et des rendements financiers et sociaux spécifiques. Connaître l'occupation et l'usage des terres ainsi que les systèmes de production prédominants dans cet espace est une condition de base de la planification des actions dédiées au développement durable. Cette étude propose des méthodologies destinées à la cartographie détaillée de l'occupation et de l'usage des terres (LULC), et à l'identification de la régionalisation des systèmes de production agropastoraux. La cartographie LULC de l'Amazonie brésilienne a confirmé les résultats des études antérieures montrant que la plupart des surfaces déboisées sont utilisées principalement pour l'élevage (environ 60%), qu'environ 20% sont couvertes par une végétation secondaire et 5% par l'agriculture annuelle de large échelle. La régionalisation des systèmes de production agropastoraux a été réalisée en deux étapes. La première étape a été effectuée au niveau des divisions administratives municipales, en utilisant des données spatialement explicites de LULC et de déforestation, analysées conjointement avec des données socio-économiques spatialisées au niveau du municipe. Les résultats de cette première étape de traitement ont permis d'identifier cinq systèmes de production agropastoraux à l'échelle de l'Etat. La configuration territoriale a ainsi montré que chaque système de production crée différents types de paysages. La deuxième étape a été menée sur des cellules de 10x10 km avec des données spatialement explicites de LULC, de déforestation et une matrice de distance aux infrastructures, et en utilisant des métriques paysagères. Il est alors possible de classer le système de production prédominant dans chaque cellule, et d'identifier l'effet de chaque système de production sur le paysage. Neuf systèmes de production agropastoraux ont été mis en évidence : deux dans les forêts (domaine forestier, phase initiale), trois dans l'agriculture (agriculture stricte, agriculture dominante et aires de coexistence) et quatre dans l'élevage (élevage intensifié pour la viande, élevage non intensifié pour la viande, élevage intensifié pour la viande et le lait et élevage non intensifié pour la viande et le lait). Les méthodologies qui résultent de cette thèse permettront la création d'un système opérationnel de surveillance continu et à faible coût de LULC et des systèmes de production agropastoraux dans les territoires déboisés. Grâce à ce système de surveillance, il sera possible de suivre les impacts des politiques publiques qui visent à un développement durable de la région.

Mots-Clefs: Amazonie, Occupation et Usage des terres, Systèmes de production agropastoraux, Télédétection, Analyse de paysage, TerraClass.

Abstract

Recent global agreements sponsored by UN to sustainable development and reduction of greenhouse gases emission, undergo by the reduction of deforestation and an increase of productivity of the areas occupied by agricultural production systems. In 2014 the Brazilian Amazon deforestation reached 760.305,5 km². This area has different land uses with different financial and social returns and different environmental impacts. To know the land use and land cover (LULC) and the predominant production systems in this deforested area is a basic condition for planning actions and public policies for sustainable development. This study developed methodologies for detailed LULC mapping, and to regionalization of agricultural production systems. The mapping of LULC of Brazilian Amazon confirmed previous studies, showing that most of the deforested area is used for livestock activity (about 60%), followed by secondary vegetation (about 20%) and annual crops (about 5%). Regionalization of agricultural production systems was carried out in two stages. The first one was carried out at local administrative boundary, using spatially explicit data of LULC and deforestation, analyzed in conjunction with municipal socioeconomic data spatialized at local level. Based on these results we identified, among five agricultural production systems at the state level. The dimension of territorial configuration showed that each agricultural production system form different types of landscapes. The second stage was conducted with cells of 10 X 10 Km, with LULC spatially explicit data, deforestation and a matrix of distance to infrastructure elements, and using landscape metrics. Was possible to classify the predominant agricultural production system in each cell, and identify the effect of these systems on the landscape. Nine agricultural production systems were found: two in forest domains (Forest Domain, Initial Front), three in agriculture domain (Strict Agriculture, Dominant Agriculture and Coexistence Area) and four in livestock domain (Intensified Beef, Not Intensified Beef, Intensified Beef-Milk and Not Intensified Beef-Milk). The methodologies resulted from this thesis will enable the creation of an operational monitoring system of LULC, continuous and at low cost, and also of the prevailing agricultural production system in each of the deforested territory. With this monitoring system, it will be possible to follow up the effect of public policies in the region, looking for sustainable development.

Key words: Amazon, Land Use and Land Cover, Agricultural production system, Remote sensing, Landscape analyses, TerraClass

Resumo

Os acordos globais patrocinados pela ONU, voltados para o desenvolvimento sustentável e a redução das emissões de gases de efeito estufa, passam por uma redução do desflorestamento e o aumento da produtividade das áreas ocupadas em sistemas produtivos agropastoris. Na Amazônia legal brasileira em 2014 o desflorestamento atingiu 760.305,5 km². Esta área apresenta diferentes formas de utilização, com diferentes retornos financeiros, sociais e ambientais. Conhecer o Uso e ocupação e os sistemas de produção predominantes nesta superfície é condição básica para o planejamento de ações dedicadas ao desenvolvimento sustentável. Este estudo desenvolveu metodologias para a realização do mapeamento do uso e cobertura da terra (LULC) de maneira detalhada, e para a identificação e regionalização dos sistemas produtivos agropastoris. O mapeamento do LULC na Amazônia brasileira confirmou estudos anteriores, mostrando que a maior parte da superfície desflorestada é utilizada para atividade pecuária (cerca de 60%), seguida por áreas cobertas por vegetação secundária (cerca de 20%) e por agricultura anual de larga escala (cerca de 5%). A regionalização dos sistemas produtivos agropastoris foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa foi realizada no nível da divisão administrativa municipal, utilizando dados espacialmente explícitos de LULC e de desflorestamento, analisados em conjunto com dados socioeconômicos espacializados a nível municipal. Com os resultados desta etapa foi possível identificar, dentre cinco sistemas produtivos agropastoris, o predominante em cada município. A dimensão da configuração territorial mostrou que cada sistema de produção forma diferentes tipos de paisagens. A segunda fase foi realizada com células de 10 x 10 km e dados espacialmente explícitos de LULC, desflorestamento e uma matriz de distância para elementos de infraestrutura. Utilizando métricas de paisagem foi possível classificar o sistema produtivo predominante em cada célula, e identificar o efeito de cada sistema produtivo sobre a paisagem. Foram encontrados nove sistemas produtivos agropastoris: dois em domínios florestais (Forest Domain, Initial Fase), três no domínio da agricultura (Strict Agriculture, Dominant Agriculture e Coexistence Area) e quatro no domínio da pecuária (Intensified Beef, Not Intensified Beef, Intensified Beef Milk e Not Intensified Beef Milk). As metodologias resultantes desta tese vão permitir a criação de um sistema de monitoramento operacional, contínuo e de baixo custo do LULC e também do sistema de produção agropastoril predominante em cada parte do território desflorestado. Com este sistema de monitoramento será possível acompanhar os efeitos de políticas públicas na região, buscando o desenvolvimento sustentável.

Palavras-Chave: Amazonia, Uso e ocupação da Terra, Sistemas de produção agropastoris, Sensoriamento Remoto, Análise de paisagem, TerraClass

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	7
Résumé.....	11
Abstract	13
Resumo.....	15
SOMMAIRE	17
Liste des Acronymes	19
Liste des Figures.....	21
Liste des Tableaux	23
AVANT-PROPOS	25
Contexte historique et politique de la thèse	25
Cadre scientifique de la thèse.....	27
Hypothèses et objectifs.....	30
Organisation du document.....	31
1 ÉTAT DE L'ART	33
1.1 Historique de l'occupation et de la déforestation de Amazonie brésilienne	33
1.2 Téledétection appliquée à la surveillance des forêts et à l'usage des terres.....	37
1.2.1 Cartographie des forêts tropicales	38
1.2.2 Cartographie de l'occupation et de l'usage des terres.....	39
1.3 Apport du paysage dans la compréhension de l'occupation du sol	44
2 CARACTERISATION PAR TELEDETECTION DE L'OCCUPATION ET DE L'USAGE DES SOLS DES ZONES DEBOISEES AVANT 2008 DE L'AMAZONIE LEGALE.....	47
2.1 High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat/Tm5 and MODIS data	51
3 TYPOLOGIE ET SPATIALISATION MUNICIPALE DES SYSTEMES DE PRODUCTION AGROPASTORAUX DOMINANTS DE L'ETAT DU RONDONIA	65
3.1 Typologies and spatialization of agricultural production systems in Rondônia, Brazil: Linking land use, socioeconomics and territorial configuration	73
4 DETERMINATION DE L'EMPRENTE PAYSAGERE DES SYSTEMES DE PRODUCTION AGROPASTORAUX DE L'ETAD DU RONDONIA	95

4.1	LULC footprints to identification of crop, intensified and not intensified cattle raising production systems in the Brazilian Amazon: A case study in Rondônia.....	104
	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	135
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	141

Liste des Acronymes

ACP	Analyse en Composante Principale
ANOVA	Analysis of Variance
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CESBIO	Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CNES	Centre National D'Etudes Spatiales
CNRS	Centre National dela Recherche Scientifique
CRA	Centro Regional da Amazônia
DEGRAD	Mapeamento da Degradação Florestal na Amazônia Brasileira
DETER	Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real
DETEX	Detecção da Exploração Seletiva de Madeira
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESA	European Space Agency
SPACE-DEV	Espace au Service du Développement
EU	Union Européenne
Eurostat	Statistical Office of the European Union
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDARON	Agência de Defesa Sanitária Agrosilvopastoril do Estado de Rondônia
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
LANDSAT	Landsat Program is a series of Earth-observing satellite missions jointly managed by NASA and the U.S. Geological Survey
LULC	Land Use Land Cover
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MERIS	MEdium Resolution Imaging Spectrometer

MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer,
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
ONU	Organisation des Nations Unies
OSE	Observation spatiale de l'environnement
PDA	Plano de Desenvolvimento da Amazônia
PIN	Plano de Integração Nacional
PPCDAM	Plano de Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal
PPG7	Programa Piloto para a Proteção das Florestas Tropicais do Brasil
PRODES	Projeto de Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite
RELAIS	Système d'information régional des paysages épidémiologiques Amazoniens
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SPVEA	Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia
TerraClass	Projeto de Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra
TETIS	Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale
TOSCA	Terre, Océans, Surfaces Continentales, Atmosphère ((comité d'expertise visant à financer les propositions de Recherche issues de l'APR CNES)
UMR	Unité Mixte de Recherche

Liste des Figures

	<u>Pag.</u>
FIGURA 1 – LIGNE DU TEMPS DE L'EVOLUTION DE LA THESE.	32
FIGURE 2 – LOCALISATION DE L'AMAZONIE LEGALE ET DES 9 ETATS FEDERAUX ASSOCIES.	33
FIGURE 3 – TAUX ANNUEL DE DEFORESTATION DE L'AMAZONIE LEGALE. .	36
FIGURE 4 – IMPORTANCE DE L'INTERRELATION HOMME ESPACE NATUREL DANS LA CONSTRUCTION DES PAYSAGES.	45
FIGURE 5 - CARTE DETAILLEE DE L'OCCUPATION ET DE L'USAGE DES SOLS DE L'ÉTAT DE RONDONIA EN 2010.	66
FIGURE 6 - ARBRE DE DECISION POUR L'IDENTIFICATION DES SYSTEMES PRODUCTIFS AGROPASTORAUX DU RONDONIA. SOURCE: ADAPTE DE ALMEIDA ET AL. 2016B.	69
FIGURE 7 – DISTRIBUTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION AGROPASTORAUX DU RONDONIA.	70
FIGURE 8 – ARBRE DE DECISION POUR L'IDENTIFICATION DES SYSTEMES PRODUCTIFS AGROPASTORAUX DU RONDONIA AU NIVEAU CELLULAIRE.	97
FIGURE 9 – RESULTAT DE LA SPATIALISATION DES SYSTEMES PRODUCTIFS DANS L'ESPACE CELLULAIRE DU RONDONIA.	98
FIGURE 10 – ITINERAIRE ET ECHANTILLONS DE TERRAIN.	99

Liste des Tableaux

	<u>Pag.</u>
TABLEAU 1 – THEMES REPRESENTANT LES PRINCIPAUX TYPES D'OCCUPATION ET D'USAGE DES TERRES DANS LES ZONES DEFORESTEEES DE L'AMAZONIE BRESILIENNE.....	48
TABLEAU 2 – SURFACE OCCUPEE PAR TYPES D'OCCUPATION ET D'USAGE DES TERRES DANS LES ZONES DEFORESTEEES DE L'AMAZONIE BRESILIENNE.	49
TABLEAU 3 - METRIQUES ADOPTEES ET UNITES DE MESURE (NIVEAU MUNICIPALE).....	66
TABLEAU 4 - METRIQUES ADOPTEES ET UNITES DE MESURE (NIVEAU CELLULAIRE)	96
TABLEAU 5 – REGLES POUR LA VALIDATION DES ECHANTILLONS DE TERRAIN	100
TABLEAU 6 – RESULTATS POUR LA VALIDATION DE TERRAIN.....	100

AVANT-PROPOS

Contexte historique et politique de la thèse

Durant le “Sommet des Nations Unies consacré à l’adoption du programme de développement pour l’après-2015”¹, 160 chefs d’État, ont adopté à l’unanimité, un programme de développement durable à l’horizon 2030 (United Nations 2015). Ce document est assorti de 17 objectifs, dont les buts principaux sont éradiquer du monde l’extrême pauvreté, combattre les inégalités et préserver la planète. Ce programme servira de référence pour les actions de la communauté internationale et pour les gouvernements nationaux au cours des 15 prochaines années. Parmi les 17 objectifs présentés par l’Agenda 2030, 4 touchent directement les questions liées à cette thèse:

Objectif 2 – Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l’agriculture durable.

Objectif 13 – Prendre d’urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions.

Objectif 15 - Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable, gérer durablement les forêts, ..., enrayer et inverser le processus de dégradation des sols et mettre fin à l’appauvrissement de la biodiversité.

Objectif 17 - Renforcer les moyens de mettre en œuvre le Partenariat mondial pour le développement durable et le revitaliser.

Ces objectifs impliquent que d’ici 2030 tous les pays devront promouvoir la gestion durable de tous les types de forêt, mettre un terme à la déforestation, restaurer les forêts dégradées et accroître considérablement le boisement et le reboisement au niveau mondial. Les pays impliqués devront assurer la viabilité des systèmes de production alimentaire et mettre en œuvre des pratiques agricoles résilientes qui permettent d’accroître la productivité et la production. Enfin ils devront renforcer la coopération triangulaire régionale et internationale.

C’est dans ce contexte historique que cette thèse s’inscrit. Elle s’appuie sur la coopération scientifique développée conjointement entre la France et le Brésil. Celle-

¹ Le Sommet s’est déroulé à New York au siège de l’ONU, du 25 au 27 septembre 2015.

ci porte sur les questions de surveillance, de protection et de responsabilité en matière environnementale des forêts tropicales, en vue de contribuer au développement durable. Plus spécifiquement elle s'insère dans le cadre de la coopération mise en place depuis de nombreuses années entre l'Institut National de la Recherche Spatiale du Brésil (INPE²) et l'Institut de la Recherche pour le Développement (IRD³).

Cette thèse de doctorat s'est déroulée à la Maison de la télédétection au sein de l'équipe Observation Spatiale de l'Environnement (OSE) de l'UMR ESPACE-DEV/IRD. Les travaux ont été réalisés dans le cadre de deux des axes de recherche de cette équipe. Le premier, thématique, porte sur la compréhension des interactions entre les dynamiques d'occupation du sol, le paysage et l'évolution des ressources naturelles (végétation, eau, sol). Le second, méthodologique, concerne la mise en adéquation des échelles d'observation et les cascades d'échelles du processus étudié.

Les travaux de thèse ont été financés: (i) par le gouvernement brésilien dans le cadre du programme Sciences sans frontières, du Ministère de la science, technologie, innovation et communication; (ii) par le projet TerraClas qui est soutenu par le Found Amazonie⁴; (iii) par l'Ambassade de France au Brésil et le projet "Système d'information régional des paysages épidémiologiques Amazoniens" (RELAIS) pour les aspects terrain; (iv) par le projet CNES TOSCA-AGRIZONE⁵ intitulé "de l'image satellite à la carte des systèmes de production". Les résultats obtenus dans le cadre de ce dernier projet contribuent au développement d'un système générique de zonage basé sur l'analyse du paysage des systèmes agricoles des régions de forêts tropicales en lien avec leur durabilité.

² INPE : est un des treize centres de recherche du Ministère des Sciences et Technologies du Brésil (MCT). Il a pour mission de : produire de la science et de la technologie dans les domaines de l'espace et de l'environnement terrestre et d'offrir des produits et des services uniques au profit du Brésil.

³ IRD : est un organisme français de recherche. Ses activités de recherche, de formation et d'innovation ont pour objectif de contribuer au développement social, économique et culturel des pays du Sud.

⁴ Fonds Amazonie : Le Fonds Amazon vise à recueillir des dons pour les investissements non remboursables dans la prévention, la surveillance et la lutte contre la déforestation et la promotion de la conservation et l'utilisation durable de l'Amazonie, en conformité avec le décret n ° 6527 1 Août, 2008.

⁵ Le TOSCA correspond à un 'Appel à Propositions de Recherche (APR) qui prépare le programme de recherche scientifique spatiale du CNES. Il concerne les sciences de l'Univers, les sciences de la planète Terre et les sciences en micropesanteur. Le projet TOSCA-AGRIZONE est issu d'une coopération entre l'UMR ESPACE-DEV (IRD) et l'UMR TETIS (CIRAD).

Les résultats de cette thèse contribuent au développement de techniques susceptibles d'être transférées vers d'autres pays tropicaux, dans le cadre technique de la coopération scientifique internationale. Plus particulièrement, dans le cadre de la coopération tripartite Brésil-France-Pays africains où les efforts conjugués de l'INPE et de l'IRD, ont pour but le transfert de technologie afin d'élargir et de perfectionner la surveillance et le développement durable des forêts tropicales.

Cadre scientifique de la thèse

Il est courant dans la littérature scientifique que soit mise en évidence l'importance de la région amazonienne en tant que pourvoyeuse de services environnementaux, non seulement au niveau régional, mais aussi au niveau global (Becker and Stenner 2008). Le bassin hydrographique amazonien est un des trois bassins hydrographiques mondiaux qui détient la plus grande biodiversité (Winemiller et al. 2016), avec environ 1/3 de la réserve génétique de la planète (Albagli 2010). Le fleuve Amazonas assure à lui seul environ 17% de l'apport d'eau dans les océans (Callède et al. 2010). Concernant le bilan carbone les émissions et la captation issues respectivement de la déforestation ou de la régénération forestière Amazonienne constituent à elle seule une partie significative des émissions nationale brésilienne (Aguiar et al. 2012).

Ce monumental espace géographique est aussi la demeure de plus de 20 millions d'habitants (IBGE 2016). Il partage, avec d'autres régions agricoles de pays ayant des réalités différentes, tels que l'Espagne et le Cameroun, de forte concentration urbaine et des problèmes liés à l'exode rural vers les grandes agglomérations (Bayona-i-Carrasco and Gil-Alonso 2013; Folefack 2015; Théry 2015). La répartition des communautés rurales amazonienne était initialement liée exclusivement au réseau hydrographique. Elle est actuellement grandement influencée par les autres modes de transports créant ainsi un réseau de connexions entre ces différents nœuds (Amaral et al. 2013). L'économie de cette immense région est basée sur la production minérale, l'exploitation forestière et la production agropastorale (Margulis 2003; Monteiro 2005). L'élevage bovin est en progression dans tous les États de l'Amazonie brésilienne (Rivero et al. 2009; Barona et al. 2010). Il constitue la principale forme d'utilisation de la terre dans plus de 62% de la portion

déforestée (Almeida et al. 2016a). En 2015, l'élevage bovin amazonien représente environ 40% de l'abattage de bovins au Brésil (MAPA 2016) avec des taux de revenus financiers supérieurs à ceux d'autres régions d'élevage brésiliennes (Margulis 2003). A l'heure actuelle l'élevage bovin est l'activité agricole la plus importante en Amazonie, alors qu'il y était totalement marginal au début des années 1970. Bowman et al. (2012) indiquent que 83% de la croissance du cheptel bovin du Brésil c'est effectuée en Amazonie entre 1990 et 2007. Piketty et al (2005), montrent qu'environ 80% de la déforestation des années 1990 sont une conséquence du développement de l'élevage. La structuration locale de la filière bovine pèse dans la balance commerciale (Pacheco and Pocard-Chapuis 2012) ainsi que d'autres chaînes productives agropastorales comme celles du lait et du soja qui jouent aussi un rôle important dans le développement économique de cette région (Homma 2005; Becker 2007; Gomes and Ferreira Filho 2007; Paes-de-Souza, Amin, and Gomes 2009; IDARON 2013; Gibbs et al. 2015).

Dans les années 1970 la mise en place par le gouvernement brésilien du Plan d'Intégration Nationale (PIN) a contribué à accélérer le processus de déforestation. Son objectif était de développer le Nord du Brésil sur le plan économique en favorisant la construction de grandes infrastructures, l'installation de petits agriculteurs et l'investissement par le biais d'incitations fiscales de grandes entreprises. A la même époque le gouvernement brésilien commence à réaliser des suivis de l'Amazonie légale⁶ au travers du projet RADAMBRASIL⁷.

A partir des années 1980, il met en place des dispositifs de suivi régulier de la déforestation en Amazonie en réponse aux préoccupations internationales. **A partir de 1988** l'INPE pilote un projet d'estimation de la déforestation de l'Amazonie légale (PRODES⁸) qui fournit encore maintenant un suivi annuel des taux de déforestation. Ce projet qui permet de produire des bilans à posteriori a été complété en 2004 par le

⁶ Amazonie légale : définie en 1953 afin de déterminer les régions éligibles pour les aides au développement de l'Amazonie. Cette région regroupe les états de l'Acre, Amazonas, Roraima, Amapá, Pará, Rondônia, Tocantins, ainsi que la quasi-totalité du Mato Grosso et les quatre cinquième du Maranhão. Dans la suite du document nous parlerons « d'Amazonie » au sens d'Amazonie légale.

⁷ RADAMBRASIL : Project Radar d'Amazonie, dédié à la couverture des différentes régions du Brésil (en particulier l'Amazonie) avec des images aériennes de radar aéroporté.

⁸ PRODES : Projet de surveillance de la forêt amazonienne par satellite

projet DETER (Détection de la déforestation en temps réel) qui permet un suivi hebdomadaire.

Un partenariat est mis en place en 2009 entre l'INPE et l'Entreprise brésilienne de recherches agropastorales (EMBRAPA)⁹, (cf. figure 1) afin de mieux cerner l'origine et les conséquences de la déforestation hétérogène de l'Amazonie et la destination des terres. Un nouveau projet intitulé TerraClass voit le jour. L'objectif est de mettre en place des méthodologies pour caractériser par télédétection l'occupation et l'usage des sols des zones déboisées de l'Amazonie Légale. Dans le cadre du projet TerraClass et en tant que responsable de l'INPE Amazon j'ai eu en charge le développement technique et scientifique de la mise en œuvre de ce projet. J'ai donc entre 2009 et 2010, assuré l'articulation et le développement des travaux en étroite collaboration avec le Dr. Adriano Venturieri (EMBRAPA Amazonie Orientale) et le Dr. Alexandre Coutinho (EMBRAPA Informatique Agropastorale). Cet effort conjoint entre les deux instituts a aboutit en 2011 à la première diffusion de la cartographie de l'usage et de l'occupation des sols pour l'ensemble de l'Amazonie légale.

L'historique de l'occupation de l'Amazonie (cf. chapitre 2 - paragraphe 2.1) montre le rôle important des politiques publiques pour le développement et la préservation de la région (Binswanger 1991). Un développement équilibré ne peut être atteint que par l'élaboration et la mise en place de politiques publiques basées sur des connaissances scientifiques et orientées vers le bien-être des populations locales, régionales et nationale (Becker 2005; Becker and Stenner 2008). Pour un développement durable, le processus de régionalisation est un outil susceptible de collaboration dans la mesure où il dévoile les limites, met à jour les frontières d'une géographie régionale et permet de reconnaître les caractéristiques des divers types (patterns) de paysage (Marsden et al. 1996). Les décisions des différents acteurs impliqués peuvent conduire au développement, mais en même temps provoquer de sévères impacts environnementaux. Identifier quels changements les politiques publiques et les acteurs impliqués ont sur l'environnement et les caractéristiques socio-

⁹EMBRAPA: Entreprise Brésilienne de Recherche Agricole, est une entreprise d'État brésilienne fondée le 26 avril 1973 et spécialisée dans l'agronomie.

économiques d'une région s'avère condition "*sine qua non*" pour permettre la planification et le suivi des actions de développement et / ou de préservation de l'environnement.

En ce qui concerne la production agropastorale, point focal de cette thèse, les changements identifiés prennent appui essentiellement sur deux axes :

(i) Connaître et suivre l'utilisation et l'occupation des sols à une échelle détaillée. Ce qui permettra d'identifier l'absence ou la présence d'activité de production, et le type d'activité agropastorale pour chaque parcelle de terrain ;

(ii) Identifier le système de production prédominant dans chaque région. A un même type d'activité agropastorale peuvent correspondre différents systèmes de production développés par divers acteurs. Par exemple, des grands ou des petits propriétaires, ayant accès à plus ou moins de ressources financières et/ou technologiques aboutiront à la fin du processus productif à des résultats différents dans les domaines économique, social ou environnemental.

Hypothèses et objectifs.

Cette étude a été bâtie sur deux hypothèses :

- La première est qu'il est possible d'identifier les systèmes productifs agropastoraux prédominants dans chaque commune à partir des données de l'occupation et de l'usage des sols et des données socio-économiques à partir d'un arbre de décision. Cette hypothèse a été formulée à partir de la prémisse que l'interaction entre les ressources environnementales et l'ensemble des pratiques agricoles adoptées dans un système de production conduit à la formation d'un paysage standard (Benoît et al. 2012; Souza and Silva 2012; Pecqueur 2014).
- La seconde hypothèse est qu'il est possible d'identifier les systèmes productifs, en utilisant uniquement les "empreintes spatiales" laissées par les différents systèmes de production sur le paysage à partir des données de déforestation, d'occupation et d'usage des sols et d'infrastructure logistique.

En prenant pour base ces hypothèses et ces prémisses, nous avons défini comme objectif général de notre thèse d'identifier, spatialiser, quantifier et caractériser les systèmes de production dans le cadre de l'exploitation agropastorale de l'Amazonie brésilienne. Les objectifs spécifiques définis sont les suivants :

- i) construire une méthodologie générique pour cartographier l'occupation et l'usage des sols à une échelle détaillée et applicable à toute l'Amazonie brésilienne.
- ii) Construire une méthodologie générique capable d'identifier et de caractériser le système de production agropastoral prédominant dans l'ensemble des municipes¹⁰ de l'État de Rondônia, en utilisant des données de l'occupation et l'usage des sols, des données de déforestation et des données socio-économiques;
- iii) Construire une méthodologie générique capable d'identifier le système de production agropastoral prédominant dans l'ensemble des espaces cellulaires de l'État du Rondônia, en utilisant des données d'utilisation et de couverture des sols, des données de déforestation et des données d'infrastructure logistique ;
- iv) Cartographier et quantifier les systèmes de production agropastoraux de l'État du Rondônia pour l'année 2010.

Organisation du document

Ce document consolide les travaux de recherche entrepris précédemment et au cours de notre doctorat. Il s'organise en quatre chapitres:

Le premier chapitre retrace l'historique de l'occupation et de la déforestation de l'Amazonie légale brésilienne. Un état de l'art est développé sur l'utilisation de la télédétection pour la cartographie de la déforestation et de l'occupation du sol dans les régions tropicales et sur l'étude de l'analyse des paysages.

¹⁰ Découpage administratif de l'Etat brésilien, équivalent à une ville française.

Le chapitre 2 est consacré à la formalisation scientifique des travaux menés entre 2009 et 2012 dans le cadre du projet TerraClass (cf. figure 1). Il explicite comment caractériser génériquement l'occupation et l'usage des sols des zones déboisées de l'Amazonie Légale par télédétection à moyenne et haute résolutions.

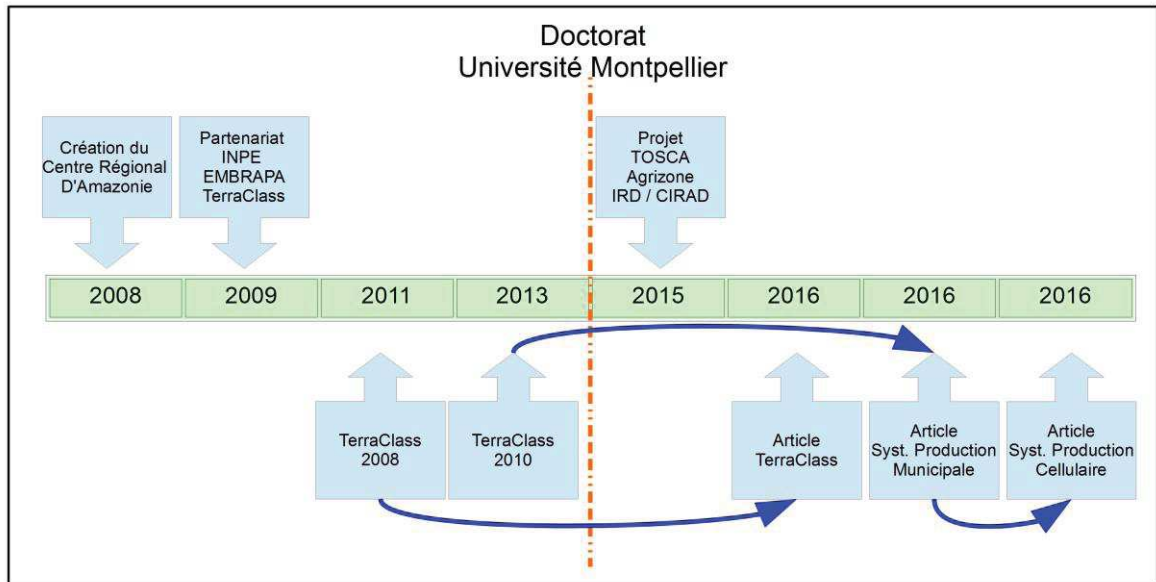


Figura 1 – Ligne du temps de l'évolution de la thèse.

Le chapitre 3 expose une méthodologie générique permettant d'identifier les différentes configurations territoriales des systèmes de production agro-pastoraux prédominants dans les municipes de l'État du Rondônia.

Le quatrième chapitre présente les travaux menés à l'échelle de la cellule (10 x 10 km) et pour l'ensemble de l'État du Rondônia. L'empreinte paysagère des systèmes de production agropastoraux est déterminée.

Les trois chapitres introduisent les trois articles rédigés dans le cadre de cette thèse (cf. figure 1). Les deux premiers sont déjà publiés dans des revues de rang A (Almeida et al. 2016a) et (Almeida et al. 2016b) et le troisième a été soumis à la revue *Journal of Rural Studies* (Almeida et al. 2016c).

1 ÉTAT DE L'ART

1.1 Historique de l'occupation et de la déforestation de Amazonie brésilienne

L'expression Amazonie légale a été créée comme concept politique dans le cadre de la planification et du développement régional par la loi 1.806 du 06/01/1953, postérieurement modifiée par la loi 5.173 du 27/10/1966 et par la loi complémentaire 31 du 11/10/1977. Cette région qui s'étend sur un peu plus de 5 millions de km² représente plus de la moitié de la superficie territoriale brésilienne, et près de 112% de la superficie de l'Union Européenne (figure 2) (IBGE 2012; UE 2016).

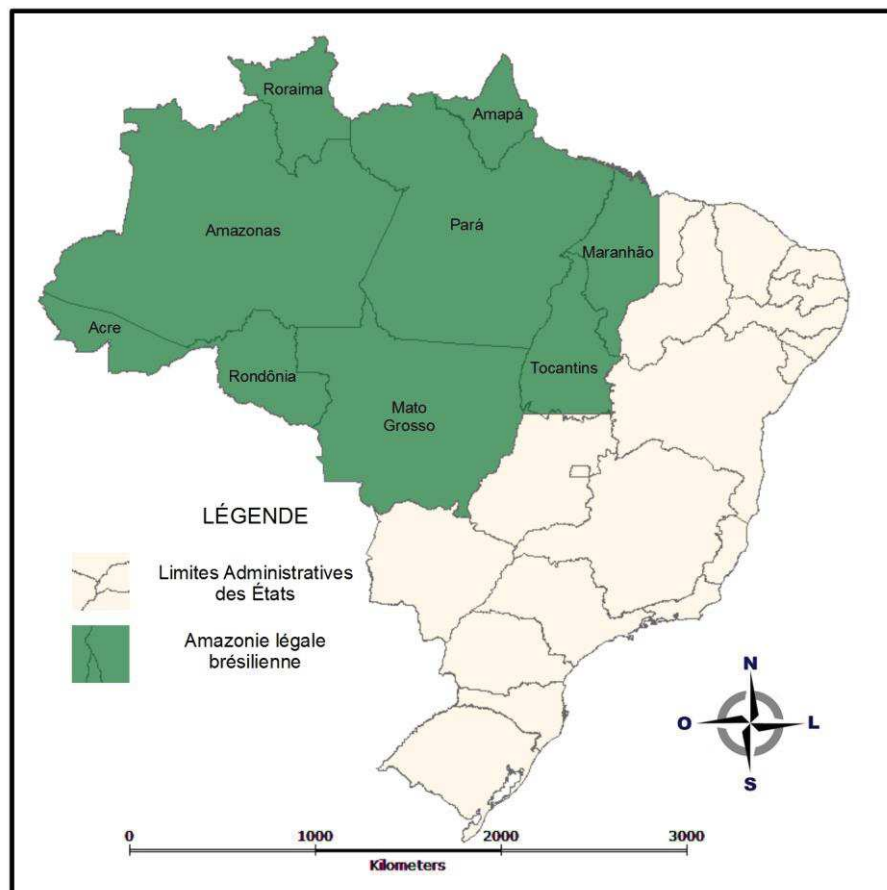


Figure 2 – Localisation de l'Amazonie légale et des 9 états fédéraux associés.

Bien que la création du concept d'Amazonie légale date des années 50, les tentatives d'occuper et d'explorer l'espace amazonien remontent au XVI^{ème} siècle, quand ont lieu les premières expéditions dans la région (Gadelha 2002). Jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle le peuplement reste éparpillé, faible et circonscrit à de petites agglomérations. Il repose sur des vecteurs tels que la logique de domination territoriale

militaire, l'extraction des "drogues du sertão" et la capture d'indigènes pour servir de main d'œuvre servile (Chambouleyron 2006).

À la fin du XIX^{ème} siècle l'utilisation du caoutchouc vulcanisé pour la fabrication de pneus provoque une forte demande pour le caoutchouc produit à partir du latex collecté de l'hévéa (*Hevea brasiliensis*) et est à l'origine de ce qui dans l'histoire brésilienne est connu comme le "premier cycle du caoutchouc" en Amazonie (D'Agostini et al. 2003). La contrebande de graines d'hévéa (*Hevea brasiliensis*) vers des pays asiatiques entrainera l'émergence de nouveaux concurrents, la chute des prix du caoutchouc, et à partir des années 1910 une réduction drastique de la production du latex en Amazonie.

Le déclenchement de la seconde guerre mondiale entraine l'interruption par le Japon de la production et de l'exportation du caoutchouc d'Asie. Pour assurer l'approvisionnement en latex des industries alliées, les gouvernements brésilien et nord-américain signent un accord dans le cadre d'un plan connu comme la "bataille du caoutchouc". Cet accord entraîne la mobilisation de travailleurs notamment les "Nordestinos"¹¹ qui fuyaient la grande sécheresse pour l'extraction du latex en Amazonie. Ils seront appelés les "soldats du caoutchouc", (Prates and Bacha 2011). La fin de la seconde guerre mondiale associée d'une part à la reprise et à la normalisation de la production, aux exportations asiatiques, et d'autre part au développement de la fabrication du caoutchouc synthétique, marque le nouveau déclin de la production du latex amazonien.

La volonté de mettre en place des actions pour favoriser le développement et l'intégration économique de l'Amazonie au reste du Brésil a conduit à la création en 1953 de la **S**uperintendance du **P**lan de mise en **V**aleur **É**conomique de l'**A**mazonie (SPVEA) et à l'introduction du concept Amazonie légale. Parmi les principales réalisations de la SPVEA se trouvent l'amélioration des communications, et notamment l'ouverture des routes Belém-Brasilia et Brasilia-Acre (actuellement respectivement les BR-010 et BR-364). Ces deux axes routiers vont permettre de relier

¹¹ Nordeste : originaire de la région Nordeste du Brésil

par voie terrestre la région amazonienne aux régions Sud et Sudeste du Brésil (Théry 1976; Ferreira and Bastos 2016).

L'ouverture des routes BR-010 et BR-364 est considérée comme le point d'inflexion de la déforestation et de l'occupation des terres amazoniennes jusqu'alors limitée aux bordures des fleuves (Théry 1997). La possibilité d'accès à la région par voie terrestre potentialise le processus de migration vers la région amazonienne dont la population passe de 1 à 5 millions pour la période comprise entre 1950 et 1960 (Becker 2004).

À partir de la seconde moitié des années 60, les militaires à la tête du pouvoir exécutif préoccupés par le vide démographique de l'Amazonie et conscients de l'importance stratégique de cette région mettent en place plusieurs actions de développement, telles que le **Programme d'Intégration Nationale (PIN)**, le **Plan de Développement de l'Amazonie (PDA)** et le premier **Plan National de Développement (I PND)**.

La construction d'une maille viaire interconnectée et l'implantation de programmes officiels de colonisation de grande envergure incitent la migration de dizaines de milliers de familles originaires principalement des régions Sud et Nordeste du Brésil. Dans une seconde phase le **II Plan National de Développement (II PND)** subventionnera des projets d'exploitation minière et d'élevage bovin menés par de grands propriétaires fonciers.

À la fin des années 80, avec l'installation d'une grave crise économique, ce modèle de développement dépendant d'aides financières directes et d'avantages fiscaux doit être remis en question faute de ressources pour assurer sa continuité. De plus la déforestation de la région s'étend sur des centaines de milliers de km² provoquant des impacts sur l'environnement à une échelle inédite ce qui attire l'attention de la communauté internationale, qui entame une pression sur le gouvernement brésilien pour la mise en place de mesures de préservation de la forêt amazonienne.

Dans ce contexte, le gouvernement brésilien crée en 1989 l'Institut brésilien pour l'environnement et les ressources naturelles renouvelables (IBAMA), et en 1991 il négocie le Programme pilote pour la protection des forêts tropicales brésiliennes

(PPG7) qui met en place des mesures pour le contrôle de la déforestation et la préservation de l'environnement amazonien.

Néanmoins, malgré ces mesures la déforestation ne cesse de croître atteignant en 1995 le chiffre record de 29.059 km² (INPE 2015). En réponse le gouvernement brésilien promulgue le 25 juillet 1996 la mesure provisoire n° 1511 qui permet d'augmenter le pourcentage de l'aire de préservation des propriétés de 50% à 80%. Cette mesure à laquelle s'ajoute un effort accru de surveillance aura pendant quelques années un effet positif en faisant baisser le taux annuel de déforestation.

À partir des années 2000 l'organisation de la chaîne productive de l'élevage bovin stabilise les prix de production et de commercialisation, et place l'élevage bovin parmi les systèmes de production agropastoraux les plus performants (Poccard-Chapuis et al. 2001). La stabilité du système agropastoral à laquelle s'ajoute l'essor de la céréaliculture dans quelques régions de l'Amazonie, est responsable d'une nouvelle hausse du taux annuel de déforestation qui atteindra des chiffres supérieurs à 20.000 km² à partir de 2002, atteignant les 27.772 km² en 2004 (figure 3).

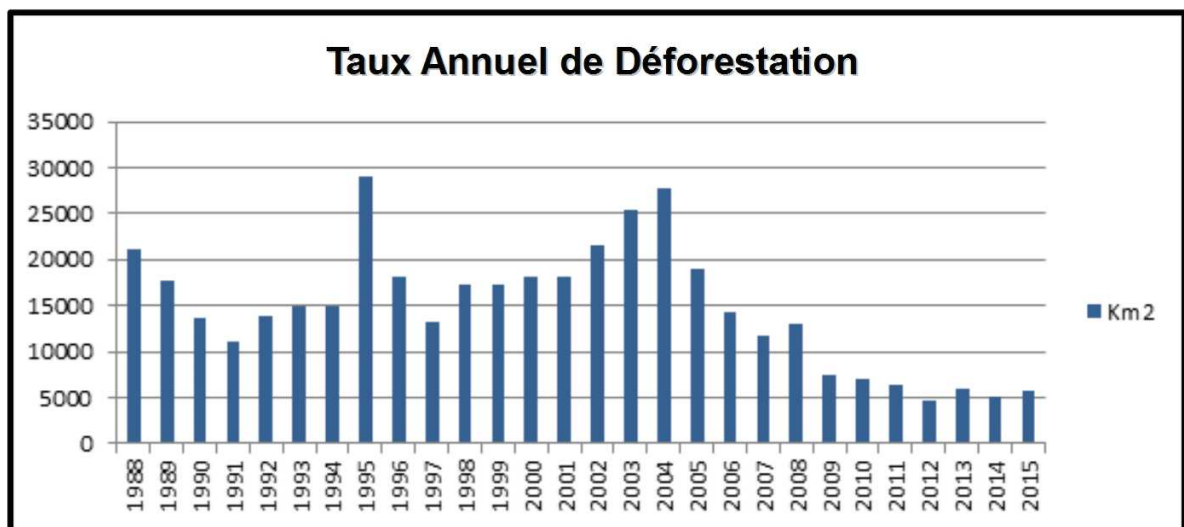


Figure 3 – Taux annuel de déforestation de l'Amazonie légale.
Source: adaptée de INPE (2015)

Pour faire face durablement au problème de la déforestation de l'Amazonie, le gouvernement brésilien met en place en 2004 le **Plan d'action pour la Prévention et le Contrôle de la Déforestation de l'Amazonie légale (PPCDAm)**. Il est structuré en trois axes : (i) l'aménagement foncier et territorial, (ii) la surveillance et le contrôle

environnemental, (iii) le soutien aux activités productives durables. Les actions du gouvernement fédéral ainsi que les requêtes judiciaires du ministère public relatives aux chaînes de production de la viande et du soja (moratoires de la viande et du soja) sont responsables de la chute des taux de déforestation de l'ordre de près de 70% par rapport à 2004 pour passer au-dessous des 6.000 km² actuellement (Nepstad et al. 2014; Assunção, Gandour, and Rocha 2015; Gibbs et al. 2015).

1.2 Télédétection appliquée à la surveillance des forêts et à l'usage des terres

Du point de vue de l'observation de la Terre, la télédétection peut être définie comme l'utilisation conjointe de capteurs et d'équipements embarqués à bord de plateformes (suspendues ou transportées par avion ou satellite) destinés à mesurer, traiter et transmettre des données de mesure de l'interaction entre la radiation électromagnétique et la superficie terrestre, ayant pour objectif l'étude des processus et des phénomènes qui ont lieu sur cette superficie (Novo 2008). Les systèmes de télédétection captent un flux d'énergie donné suite à l'interaction de cette énergie avec une superficie spécifique. Connaître ce flux d'énergie électromagnétique et comprendre les interactions entre la matière et le flux d'énergie permet d'extraire des informations utiles sur cette superficie (Jensen 2009).

C'est à partir du lancement des premiers satellites d'observation de la Terre dans les années 1970, que la télédétection est devenue le principal outil d'observation de la végétation, en raison de son coût bas et de sa capacité à couvrir de grandes surfaces dans un court laps de temps. Dans les années 1980, la démocratisation des systèmes numériques va de pair avec le développement des techniques de traitement des images numériques qui permettent d'extraire des informations des images satellites de façon chaque fois plus rapide et précise.

Actuellement l'existence de dizaines de satellites et probablement de milliers de techniques et méthodologies de traitement d'image rend possible une surveillance permanente de la végétation de la surface terrestre (Novo 2008; Jensen 2009; Ponzoni, Shimabukuro, and Kuplich 2012). Dans ce chapitre nous présenterons quelques unes des études les plus connues relatives à la surveillance des forêts et de l'utilisation des terres.

1.2.1 Cartographie des forêts tropicales

Le rôle important que les forêts tropicales jouent en tant que pourvoyeuses de services environnementaux et comme puits de carbone et de conservation de la biodiversité (IPCC, 2013; Pereira, Navarro, & Martins, 2012; Wright, 2005), rend impérative la surveillance permanente des forêts pour la détection des cas de déforestation ainsi que de dégradation forestière.

Des études réalisées antérieurement avaient estimé le couvert forestier des forêts tropicales entre 11,5 et 12,4 millions de km² (Achard et al. 2002; Bartholome et al. 2002; Mayaux et al. 2006). En tenant compte de leur ampleur globale et de leur résolution moyenne de telles études sont surtout indiquées pour des évaluations de l'état des forêts à l'échelle globale ou régionale.

D'autres études ont travaillé avec des capteurs de meilleures résolutions spatiales en faisant appel à des produits composites réalisés à partir de différents capteurs tels que MODIS et Landsat (Sexton et al. 2013; Kim et al. 2014), ou uniquement avec l'imagerie Landsat (Margono et al. 2012; Yong et al. 2013; INPE 2015). Toutes ces études démontrent la perte de grandes étendues de forêts tropicales surtout en Indonésie et en Amazonie brésilienne pour la période allant de 1990 à 2012.

Bien que les approches globales ou régionales soient très importantes pour quantifier la diminution des forêts et leurs impacts sur le changement climatique pour la détermination des politiques publiques locales, il s'avère nécessaire de mettre en place un suivi à haute résolution spatiale et temporelle. Il permettra de localiser avec précision les aires touchées par la suppression de la forêt, et d'agir à temps pour freiner la déforestation illégale.

L'INPE produit des cartes et diffuse annuellement les taux de déforestation depuis 1988 de l'Amazonie légale à une résolution spatiale de 30 m (INPE 2015). D'autre part les données du projet PRODES font état d'une déforestation cumulée pendant la période de 1988 à 2015 de 413.506 km². Les chiffres annuels les plus importants ont eu lieu en 1995 (29.059 km²) et en 2004 (27.772 km²) alors que les plus faibles caractérisent les années 2012 (4.571 km²) et 2014 (5.012 km²).

En plus de la cartographie annuelle qui permet de quantifier et de localiser à haute résolution spatiale la déforestation, l'INPE produit depuis 2004 des cartes à moyenne résolution spatiale mais à haute résolution temporelle à partir des produits MODIS (250 m). L'IBAMA¹² reçoit chaque semaine des cartes indiquant les points d'occurrence de nouvelles déforestations en Amazonie légale. Le projet nommé DETER¹³ a rendu possible l'adoption par le gouvernement brésilien de mesures de combat contre la déforestation qui ont entraîné une réduction significative du taux annuel de déforestation (Machado 2009; Boucher, Roquemore, and Fitzhugh 2013; Godar et al. 2014; Lambin et al. 2014).

Cette importante base de données de l'INPE est à la disposition de la communauté scientifique et des décideurs, et rend possible, outre le combat de la déforestation, la réalisation d'études capitales sur l'évaluation de l'impact provoqué par le développement économique dans la région.

La base de données sur la déforestation de l'Amazonie produite par l'INPE a été utilisée dans cette thèse (i) pour élaborer la méthodologie de cartographie de l'occupation et de l'usage des sols et (ii) pour construire des méthodologies génériques d'identification des principaux systèmes productifs agropastoraux.

1.2.2 Cartographie de l'occupation et de l'usage des terres

Connaitre les systèmes d'utilisation du sols et leurs impacts sur les processus sociaux et naturels nous aide à mieux comprendre comment des modifications sur ces systèmes affectent localement ou même globalement les relations socio-écologiques avec de profondes conséquences pour l'espèce humaine (Verburg et al. 2015; Erb et al. 2016). La qualité et la cohérence des données sur l'utilisation et la couverture des terres affectent directement notre compréhension des impacts produits par les changements d'utilisation des terres sur le climat, les ressources et la biodiversité entre autres (Lausch and Herzog 2002; Lausch et al. 2016; Prestele et al. 2016).

¹² IBAMA : l'Institut Brésilien de l'environnement, est l'organisme brésilien responsable de la fiscalisation environnementale

¹³ DETER : Système de détection de la déforestation en temps réel

Une abondante littérature montre l'importance de l'utilisation des systèmes d'observation de la Terre pour cartographier l'occupation et de l'usage des sols (Novo 2008; Wulder et al. 2008; Hansen and Loveland 2012; Ponzoni, Shimabukuro, and Kuplich 2012; Hansen et al. 2013).

Au début des années 2000, l'équipe du Centre Commun de Recherche de l'Union Européenne (Bartholome et al. 2002), a utilisé l'imagerie du capteur VEGETATION embarqué à bord du satellite SPOT 4 caractérisé par une résolution de 1 km. Elle a produit une carte régionale de la couverture terrestre du globe détaillée en 21 classes d'occupation du sol. Cette carte a permis une évaluation de l'occupation des sols au niveau global. Néanmoins la résolution spatiale ne permettait pas de descendre en-dessous du niveau des études régionales.

Le projet MODIS Collection 5 Global Land Cover (Friedl et al. 2010) a fourni à partir d'images des satellites MODIS et en utilisant l'ensemble des 17 classes d'occupation des sols proposées par l'IGBP¹⁴, un produit global à une résolution spatiale de 500 m permettant ainsi d'affiner les études régionales.

Une autre équipe dirigée par l'ESA¹⁵ et par l'Université Catholique de Louvain a élaboré à partir d'images du capteur MERIS embarqué à bord du satellite ENVISAT deux cartes de l'occupation des sols du globe. Ces cartes comprennent 22 classes thématiques et caractérisent les années 2005 et 2009 rendant possible des études diachroniques encore plus ciblées (Arino et al. 2007; Bontemps, Defourny, and Eric 2010).

L'ouverture au public des archives d'images de la série de satellites Landsat, en même temps que le développement de nouveaux algorithmes plus performants, ont rendu possible la surveillance environnementale à une échelle plus large et à une résolution spatiale plus fine de l'ordre de 30 m (Hansen and Loveland 2012; Giri et al. 2013; Hansen et al. 2013).

¹⁴ IGBP : International Geosphere-Biosphere Programme

¹⁵ ESA : Agence Spatiale Européenne

Un projet récemment développé par une équipe de chercheurs chinois a proposé une double approche basée sur les pixels et sur les objets contenus dans les images : l'approche POK-based (Pixel Object Knowledge). Ce projet a abouti à la production d'une carte d'utilisation des sols d'une résolution de 30 m et contenant 10 types d'utilisation des sols pour l'ensemble du globe et avec une précision supérieure à 80% (Chen et al. 2015). A nouveau ce projet démontre un progrès technique remarquable dans notre capacité d'assurer le suivi de l'environnement. Néanmoins, en raison de sa caractéristique globale et du nombre limité de classes, ce produit ne permet pas de caractériser avec suffisamment de précision sémantique les grandes échelles, régionales ou locales.

L'importance, l'ampleur et la complexité des relations socio-économiques et environnementales de l'Amazonie brésilienne (Margulis 2003; Lima and Pozzobon 2005; Fearnside 2006; Barlow et al. 2011; Valeriano et al. 2012), ainsi que la coïncidence temporelle entre son intégration au marché économique et les progrès des outils de télédétection font de la région amazonienne une des plus étudiées du globe. Les questions ayant trait aux changements d'occupation et d'usages des sols occupent une place centrale par leur importance et leur interface dynamique avec tous les acteurs de la région.

Une étude spatio-temporelle a été développée pour les municipes de Lucas do Rio Verde, Altamira et Santarém¹⁶, en utilisant des images Landsat à trois périodes données: 1990/1991, 1999/2000 et 2008/2009. L'occupation des sols a été cartographiée en six classes et à trois échelles: par pixel, par polygone et par secteur censitaire (Lu et al. 2013). Les résultats ont montré la diversité et l'importance de l'analyse à plusieurs échelles pour l'identification des types d'occupation des sols ainsi que de leurs changements. Ce résultat s'accorde avec une étude réalisée dans la région du fleuve Tapajós qui, lors de l'analyse de la dynamique de l'occupation et de l'utilisation du sol pendant les années 1986, 2001 et 2009 a également montré des taux de changement différents à chacune des échelles d'observation (Rozon et al. 2015). Ces deux résultats mettent en évidence l'importance de l'accès à des données

¹⁶ Le municipe de Lucas do Rio Verde appartient à l'État du Mato Grosso, Altamira et Santarém à l'État du Pará

à une résolution suffisamment fine pour permettre des analyses aux échelles locale, régionale.

Des images du capteur VEGETATION à bord du satellite SPOT 4 ont aussi été utilisées pour cartographier l'agriculture, les pâturages et la végétation secondaire en Amazonie légale brésilienne (Carreiras et al. 2006). Les cartes établies pour l'agriculture et les pâturages ont atteint une précision globale de 92%, alors que la végétation secondaire a montré des erreurs d'omission et de commission avec la classe forêt primaire et les autres classes. Un chiffre estimatif du taux de végétation secondaire pour l'Amazonie légale brésilienne a été avancé ayant pour base un échantillon de 26 scènes Landsat et des données de déforestation du projet PRODES (Almeida et al. 2010). Les résultats obtenus ont montré qu'environ 19,4% des parcelles déforestées étaient occupées par la végétation secondaire. Bien que les comparaisons avec des relevés de terrain aient atteint un indice de succès supérieur à 92%, le fait de travailler sur un échantillon ne permet pas la spatialisation de l'occurrence de végétation secondaire.

En vue d'étudier la trajectoire de l'intensité d'utilisation des pâturages en Amazonie, 368 images Landsat de la scène 227/65 acquises entre 1985 et 2012 ont été utilisées (Rufin et al. 2015). Cette étude a mis en évidence une intensification de l'installation des pâturages à partir du début des années 2000. Le recours à une métrique spectrale et temporelle dérivée d'une longue série Landsat s'est montré adéquat pour l'évaluation de motifs d'intensification des pâturages. Intéressés aussi à la question de l'intensification de l'utilisation des terres, une autre étude utilisant des images MODIS MOD13Q1 de 2000/2001 et de 2006/2007 à résolution spatiale de 250 m (Arvor, Dubreuil, et al. 2012) a réussi à identifier l'expansion de la frontière agricole et à spatialiser les trajectoires d'intensification de l'utilisation des terres.

Pour vérifier si le moratoire du soja¹⁷ était bien respecté, une équipe conduite par des chercheurs de la division de télédétection de l'INPE a utilisé des images MODIS MOD13Q1 couvrant la récolte agricole de 2009/2010 et des données relatives à la

¹⁷ Accord passé entre les grandes entreprises de trituration du soja et le gouvernement brésilien, celles-ci s'étant engagé à ne pas acheter le soja planté dans des aires ayant subi la déforestation après le 24 juillet 2006

déforestation issues du projet PRODES. Cette étude a permis d'identifier 6300 ha de plantations de soja située en dehors de la zone atteinte par la déforestation après la période accordée par le moratoire du soja (Rudorff et al. 2011).

En plus des études ici décrites sommairement, des dizaines d'autres travaux ont utilisé des données de télédétection pour estimer, assurer le suivi environnemental et identifier des transitions entre différentes occupation et usage des terres dans la région amazonienne (Vieira et al. 2003; Espírito-Santo, Shimabukuro, and Kuplich 2005; Morton et al. 2006; Soler and Verburg 2010; Arvor, Dubreuil, et al. 2012). Ces travaux montrent que les outils de télédétection sont des instruments privilégiés pour l'observation de l'occupation des sols en vue de comprendre les processus d'interaction entre l'Homme et son environnement.

L'occupation et l'usage des terres sont des notions en interrelation qui permettent d'établir une liaison entre les activités humaines et leurs effets sur l'environnement dans une dimension spatio-temporelle donnée (Eurostat 2000).

L'occupation des sols prend en comptes les aspects biophysiques des paysages. Alors que l'usage peut être défini comme le résultat d'arrangements des activités anthropiques, développées sur une portion déterminée de terre et en considérant les aspects fonctionnels à cette parcelle de terrain (Mucher, Stomph, and Fresco 1993; DGAGRI, Eurostat, and Ispra 2000; Brown and Duh 2004; Di Gregorio 2005).

Le projet TerraClass a adopté une légende qui considère les caractéristiques d'utilisation et aussi d'occupation des sols. Par exemple, la classe végétation secondaire se réfère à une surface qui après sa déforestation complète est abandonnée et où réapparaît une végétation de type forestier. Pour la définition de cette classe on a considéré seulement les caractéristiques biophysiques de l'aire. Alors que la classe agriculture annuelle se réfère à une région utilisée pour la culture de céréales. Cette région va être couverte par une (ou plusieurs) culture(s) déterminée(s) pendant une période de l'année. Alors que pendant une autre période de l'année le sol peut être complètement exposé. Mais le facteur prépondérant pour le classement est l'aspect fonctionnel de cette aire (la production de céréales).

1.3 Apport du paysage dans la compréhension de l'occupation du sol

Le paysage est le résultat de la combinaison dynamique et instable d'éléments physiques, biologiques et anthropiques qui réagissent entre eux pour former un élément unique et indissociable et en perpétuelle évolution (Bertrand and Tricart 1968). Néanmoins, ce terme a d'abord été utilisé dans le domaine de l'art à partir du XV^{ème} siècle par des peintres dont les œuvres avaient pour thème des espaces naturels (Alves 2001). Au début du XVIII^{ème} siècle l'allemand Alexander Von Humbold a utilisé le terme paysage pour décrire les caractéristiques d'une région terrestre dans le sens d'espace géographique. Tout au long du XX^{ème} siècle de nombreux auteurs se sont préoccupés des relations entre l'Homme et son environnement, dans des applications pratiques des questions environnementales (Metzger 2001). La figure 4 montre l'importance attribuée à l'interrelation Homme et espace géographique dans le paysage (Bertrand and Tricart 1968; Naveh 1994; Benoît et al. 2012).

Mais c'est avec la démocratisation des produits de télédétection et les progrès des systèmes d'information géographique que se renforce la tendance d'analyser les paysages à partir de la mesure de leurs composantes d'un point de vue quantitatif et intégré, ce qui donnera l'origine du terme écologie du paysage (Forman 1995; Antrop 2000).

Une étude réalisée pour la Commission européenne destinée à l'analyse du paysage a avancé que cinq indicateurs pouvaient décrire le paysage : la densité des éléments du paysage ; la moyenne de la relation périmètre/aire ; le nombre de classes ; l'indicateur de diversité ; l'indicateur de diffusion et de juxtaposition (DGAGRI, Eurostat, and Ispra 2000). Des indicateurs similaires ont aussi été proposés dans une étude comprenant 55 métriques calculées pour 85 cartes d'utilisation et de doccupation des sols aux États-Unis (Riitters et al. 1995).

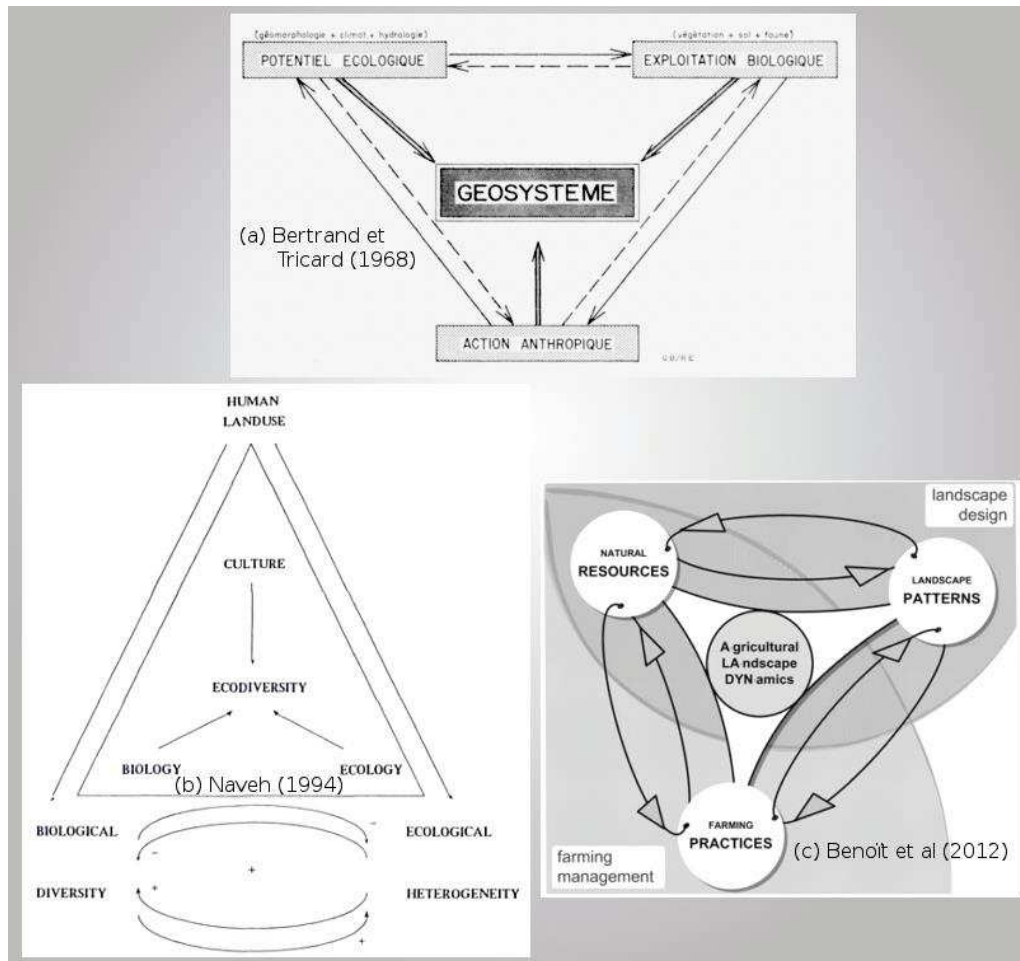


Figure 4 – Importance de l'interrelation homme espace naturel dans la construction des paysages.
Source : Adaptée de Bertrand et Tricard (1968), Naveh (1994) et Benoît et al (2012).

Une étude sur le paysage portugais, ayant pour base la carte d'occupation du sol de 1990, a divisé les indicateurs en deux catégories : les indicateurs qui considèrent la composition de la carte sans prendre en compte le rapport spatial des éléments et ceux qui considèrent la configuration spatiale des objets cartographiés. Ces deux catégories seront considérées respectivement comme des indicateurs de composition du paysage et des indicateurs de configuration du paysage (Carrão, Caetano, and Neves 2001).

Pour les études du paysage, outre choisir les indicateurs les plus adéquats à chaque étude, les chercheurs doivent aussi être attentifs à l'échelle de l'analyse spatiale et temporelle des données. La littérature attire l'attention sur l'importance du choix d'une échelle qui permette d'identifier l'hétérogénéité des motifs paysagers (Lausch and Herzog 2002; NIJOS and OECD 2002; Wu 2004; Bailey et al. 2007; Eva et al. 2010; Šímová and Gdulová 2012).

Dans une étude destinée à vérifier l'effet de l'agrégation spatiale pour l'identification de standards spatiaux de la déforestation dans l'État du Rondônia, ont été prises des données de déforestation durant six années. Dans ce travail ont été testés 16 métriques. Les mesures de complexité de forme "Landscape Shape Index" et "Square Pixel" ont présenté la meilleure performance (Frohn and Hao 2006).

L'indice de contamination s'est avéré effectif pour l'évaluation de la fragmentation du paysage de forêt d'une aire du municiple de Marabá en Amazonie brésilienne. L'étude a mis en évidence qu'en 1997 seulement 5% de l'aire de forêts se trouvait à moins de 500 m d'un polygone de déforestation (Pereira et al. 2001).

Pour tester l'identification des types d'utilisation et d'occupation des sols, une étude a utilisé 1872 polygones de divers usages des terres produits par l'IBGE. Ces échantillons se situaient dans les États du Pará, du Mato Grosso, du Rondônia et de l'Amazonas. Les métriques ayant trait à l'aire des polygones ont expliqué la plus grande partie des variances des polygones, suivie des métriques des formes, sans toutefois obtenir une distinction nette entre les quatre États (Colson, Bogaert, and Ceulemans 2011).

Les trois chapitres suivants s'appuient sur cet état de l'art pour caractériser, la zone déboisée de l'Amazonie et les changements dans le paysage.

2 CARACTERISATION PAR TELEDETECTION DE L'OCCUPATION ET DE L'USAGE DES SOLS DES ZONES DEBOISEES AVANT 2008 DE L'AMAZONIE LEGALE

Contexte

Comprendre la répartition spatiale de l'utilisation et de l'occupation de sols est essentiel pour les études portant sur la biodiversité, les changements climatiques, la modélisation de l'environnement, **les systèmes de production agropastoraux**, ainsi que pour la conception et le suivi des politiques d'utilisation des terres (Laurance et al. 2002; Kerr and Ostrovsky 2003; Turner et al. 2003; Nagendra and Rocchini 2008; Aguiar et al. 2012).

Ce chapitre est consacré à la caractérisation générique de l'occupation et de l'usage des sols des zones déboisées de l'Amazonie Légale par télédétection à moyenne et haute résolutions. Cette étude a permis la formalisation scientifique des travaux que j'ai menés entre 2009 et 2012 (Almeida et al. 2016a). D'autres travaux avaient déjà permis une cartographie de l'occupation et de l'usage des sols, mais la plupart étaient restreints à une seule culture (Rudorff et al. 2010; Rudorff et al. 2011; Arvor, Dubreuil, et al. 2012), ou concentrés sur une seule région productrice (Arvor, Meirelles, et al. 2012; Brown et al. 2013), ou travaillaient à une résolution spatiale adaptée à l'analyse régionale (Bontemps, Defourny, and Eric 2010; Friedl et al. 2010; Vuolo and Atzberger 2012; Dias et al. 2016).

La zone d'étude a été définie comme la partie déforestée de l'Amazonie légale. Elle couvre une aire déforestée d'un peu plus de 719.000 km² distribuée sur les neuf États qui la composent. Les limites de cette aire déforestée ont été fixées à partir des données vectorielles issues du projet PRODES. Elles prennent en compte l'année 2008 et intègrent également la déforestation antérieure à cette date.

Les données LANDSAT/TM5, MODIS et SPOT-5, permettant de combiner hautes résolutions spectrale, temporelle et spatiale ont été utilisées. Différentes techniques incluant le modèle linéaire de mélange spectral, la segmentation, le découpage et l'interprétation visuelle, ont été appliquées aux images Landsat-5/TM et MODIS pour cartographier les classes décrites dans le tableau 1.

Tableau 1 – Thèmes représentant les principaux types d'occupation et d'usage des terres dans les zones déforestées de l'Amazonie brésilienne

Thème	Description
Déforestation 2008	Zone récemment déboisée composée d'arbres abattus, d'arbustes, d'herbacée et de sol nu. Son usage n'est pas encore défini
Zone urbaine	Tâche urbaine résultant de la concentration de la population (villages, petites villes, villes) différenciée des zones rurales par un réseau de rues, des équipements publics, des maisons, des bâtiments
Exploitation minière	Aires d'extraction minière avec présence de clairière, de sol nu impliquant des déboisements à proximité des cours d'eau
Mosaïque d'occupation du sol	Caractérisée par une association de divers types d'occupation et d'usage des sols. Du fait de la résolution spatiale des images satellitaires, il n'a pas été possible de différencier leurs composantes.
Cultures annuelles	Large étendue avec prépondérance de cultures annuelles, principalement des céréales. Caractérisée par l'emploi de hautes technologies telles que : semences certifiées, intrants, produits chimiques, fertilisants, et mécanisation.
Pâturage "bien entretenu"	Pâturage homogène à prédominance de végétation herbacée composée de graminées (90% à 100%).
Pâturage "embroussaillé"	Pâturage homogène à prédominance de végétation herbacée composée de graminées, avec présence d'espèces invasives (50% à 80%) et de végétation arbustive (20% à 50%).
Pâturage sol nu	Encore dans le domaine des pâturages, mais présentant une forte dégradation de la capacité de charge de troupeaux. Ces pâturages très dégradés présentent une couverture d'au moins 50% de sol nu
Pâturage en voie de régénération	Aires qui après des coupes rases de la végétation naturelle et le développement de quelques activités agropastorale, sont au début du processus de régénération de la végétation autochtone avec une prédominance d'espèces arbustives et d'espèces pionnières arborées. Elles sont caractérisées par une grande diversité d'espèces végétales.
Végétation secondaire	Aires qui suite à la suppression totale de la végétation forestière, se trouvent en processus avancé de régénération de la végétation arbustive et/ou arborée. Celles-ci peuvent également être des aires utilisées pour la pratique de la sylviculture ou de l'agriculture permanente avec l'usage d'espèces autochtones ou exotiques.
Autres	Il s'agit d'aires qui n'entrent pas dans les clés de classification et présentent des types de couvert différents de ceux des autres classes du projet, tels les affleurements rocheux, des plages fluviales et des bancs de sable.

Les statistiques des aires et des fréquences des classes thématiques cartographiées ont ensuite été calculées (cf. tableau 2). Il ressort, en premier lieu, une prédominance des différents pâturages dévolus principalement à l'élevage bovin. Les

4 classes, pâturage "bien entretenu", pâturage "embroussaillé", pâturage en voie de régénération et pâturage avec sol nu couvrent 62,1% de la partie déforestée de l'Amazonie légale. La végétation secondaire est présente sur 21% du territoire cartographié. Cela montre que, malgré une certaine intensification de l'usage du sol (Becker, Alves, and Costa 2007), il existe encore une proportion de terre considérable peu exploitée à l'intérieur d'une frontière en consolidation. L'agriculture annuelle, souvent considérée comme à l'origine de la déforestation, occupe une superficie inférieure à 5% actuellement en progression (5,7 % en 2012, Le Tourneau, 2015). Elle est surtout présente dans l'État du Mato Grosso (88,6%) . Il est à noter l'effet indirect de l'expansion de la culture du soja dans des zones d'anciens pâturages. Ces derniers ont migrés vers de nouveaux fronts de déforestation (Barona et al. 2010). Les cinq autres classes (déforestation 2008, zone urbaine, exploitation minière, mosaïque d'occupation du sol et autres) se répartissent les 12% restants.

Tableau 2 – Surface occupée par types d'occupation et d'usage des terres dans les zones déforestées de l'Amazonie brésilienne.

Thème	Aire km²	Fréquence absolue	Fréquence cumulée
Pâturage "bien entretenu"	335.714,94	46,68%	46,68%
Végétation secondaire	150.815,31	20,67%	67,65%
Pâturage "embroussaillé"	62.823,75	8,74%	76,38%
Pâturage en voie de régénération	48.027,37	6,68%	83,06%
Aire non observée	45.406,27	6,31%	89,37%
Agriculture annuelle	34.927,24	4,86%	94,23%
Mosaïque d'occupation du sol	24.416,57	3,39%	97,63%
Aire urbaine	3.818,14	0,53%	98,16%
Exploitation minière	730,68	0,10%	98,26%
Pâturage avec sols nus	594,19	0,08%	98,34%
Autres	477,88	0,07%	98,41%
Déforestation 2008	11.458,64	1,59%	100,00%
TOTAL	719.210,98	100.00%	

Discussion

Le principal élément novateur de la méthodologie de cartographie que nous avons développée a été l'intégration des différentes méthodologies existantes en une chaîne d'opérations séquentielles. Ce traitement en flux a consisté à cartographier chaque classe l'une après l'autre en retirant à chaque étape l'aire de la classe précédemment cartographiée. Cette méthode a permis de réaliser des gains de temps de traitement, d'éliminer les risques de redondance de classes sur une même zone ainsi que de rendre possible la répartition des tâches entre différents groupes de chercheurs et ingénieurs.

La combinaison des données LANDSAT/TM5, MODIS et SPOT-5 a produit une cartographie de l'usage et de l'occupation du sol à un niveau de détail inédit pour toute l'Amazonie et compatible aux échelles locale, régionale et macro-régionale. Ces avancées confèrent la précision spatiale nécessaire à la description des changements d'usage des sols et à l'identification des déterminants de ces changements (Dias et al. 2016). Cette méthodologie est susceptible d'être répliquée à des dates postérieures et/ou antérieures. De telles caractéristiques permettent de créer une longue série de données capable de porter une analyse à long terme. Les données TerraClass ont un potentiel élevé dans plusieurs domaines de connaissance tels que l'usage du sol, le bilan de carbone, les politiques publiques, l'écologie du paysage, la santé et l'environnement entre autres.

Les résultats produits à cette étape constituent la base indispensable des données d'usage et d'occupation des sols utilisées pour les analyses des étapes suivantes. Cette méthode et les résultats associés ont été publiés dans le premier article intitulé "High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat/Tm5 and MODIS data" de la revue *Acta Amazonica*. Cet article concrétise les divers processus qui au travers de la chaîne de traitement permettent d'extraire des connaissances des images orbitales.

Les cartes générées sont disponibles sur le site Web TerraClass de l'INPE (http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2008.php).

2.1 High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat/Tm5 and MODIS data

High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data

Cláudio Aparecido de ALMEIDA^{1*}, Alexandre Camargo COUTINHO², Júlio César Dalla Mora ESQUERDO², Marcos ADAMI³, Adriano VENTURIERI⁴, Cesar Guerreiro DINIZ³, Nadine DESSAY⁵, Laurent DURIEUX⁵, Alessandra Rodrigues GOMES³

¹ National Institute for Space Research (INPE) - Image Processing Division, Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brazil.

² Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA) - Agriculture Informatics, Av. André Tosello, nº 209, Campinas, SP, Brazil.

³ National Institute for Space Research (INPE) - Amazon Regional Center, Av. Perimetral 2651, Belém, PA, Brazil.

⁴ Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA) - Eastern Amazon Trav. Dr. Enéas Pinheiro, s/n°, Belém, PA, Brazil.

⁵ Institut de Recherche pour le Développement (IRD) - Unité Espace-Dev, 500 rue JF Breton - Montpellier, France.

* Corresponding Author: claudio.almelda@inpe.br

ABSTRACT

Understanding spatial patterns of land use and land cover is essential for studies addressing biodiversity, climate change and environmental modeling as well as for the design and monitoring of land use policies. The aim of this study was to create a detailed map of land use and land cover of the deforested areas of the Brazilian Legal Amazon up to 2008. Deforestation data from and uses were mapped with Landsat-5/TM images analysed with techniques, such as linear spectral mixture model, threshold slicing and visual interpretation, aided by temporal information extracted from NDVI MODIS time series. The result is a high spatial resolution of land use and land cover map of the entire Brazilian Legal Amazon for the year 2008 and corresponding calculation of area occupied by different land use classes. The results showed that the four classes of Pasture covered 62% of the deforested areas of the Brazilian Legal Amazon, followed by Secondary Vegetation with 21%. The area occupied by Annual Agriculture covered less than 5% of deforested areas; the remaining areas were distributed among six other land use classes. The maps generated from this project – called TerraClass - are available at INPE's web site (http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2008.php).

KEYWORDS: Remote Sensing, Tropical Deforestation, TerraClass, Image Processing.

Mapeamento do uso e cobertura da terra na Amazônia Legal Brasileira com alta resolução espacial utilizando dados Landsat-5/TM e MODIS

RESUMO

Entender o padrão espacial do uso e cobertura da terra é essencial para estudos de biodiversidade, mudanças climáticas e modelagem ambiental, bem como para concepção e acompanhamento de políticas direcionadas ao uso da terra. O objetivo deste estudo foi criar um mapa detalhado do uso e cobertura da terra para a porção desflorestada da Amazônia Legal Brasileira, até 2008. Dados de desflorestamento e uso foram mapeados usando imagens Landsat-5/TM analisadas com técnicas como modelo linear de mistura espectral, fatiamento e interpretação visual, auxiliados por informações temporais de NDVI extraídas de série temporal de dados MODIS. O resultado deste estudo é um mapa de uso e cobertura da terra com alta resolução espacial para toda Amazônia Legal Brasileira, para o ano de 2008, e os respectivos percentuais da área ocupada por diferentes classes de uso da terra. O resultado mostrou que, quatro classes de pastagens cobrem 62% da área desflorestada da Amazônia Legal Brasileira, seguida pela vegetação secundária com 21%. A área ocupada pela agricultura anual cobriu menos de 5% das áreas desflorestadas; as áreas restantes estavam distribuídas em outras seis classes de uso da terra. Os mapas gerados por este projeto, chamado TerraClass, estão disponíveis no site do INPE (http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2008.php).

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento Remoto, Desflorestamento Tropical, TerraClass, Processamento de Imagens.

INTRODUCTION

Over the last decades, many global scale, land use and land cover products based on coarse spatial resolution remote sensing data, have become available. For example, in the early 2000s, land cover maps at 1000 m spatial resolution such as Global Land Cover (GLC) 2000 (Bartholome *et al.* 2002) and MODIS Global Land Cover (Friedl *et al.* 2002) were released. Later, higher resolution data of land cover were made available, including the MODIS collection 5 Global Land Cover (Friedl *et al.* 2010) at 500 m spatial resolution and the GLOBCOVER 2005 and 2009 products (Arino *et al.* 2007; Bontemps *et al.* 2010) at 300 m spatial resolution. While these products offered important advances in mapping global trends, applications relevant for national or regional decision-making require even finer resolution, particularly as the results of land use change analysis have been reported to differ depending on the scale of mapping. (Rozon *et al.* 2015).

In this work, the area under study is the Brazilian Legal Amazon. The Brazilian National Institute for Space Research (INPE) has been producing data on spatial extent of deforestation in this region since 1988 through the Program for Deforestation Monitoring in the Brazilian Legal Amazon (PRODES). TerraClass is a complement to PRODES by adding information about what was the land use and land cover spatial distribution and regional statistics in the deforested areas up to 2008. According to PRODES, deforestation in the Brazilian Amazon up to 2008 amounted to 719,710 km² (INPE 2015) nearly twice the size of Germany's land area, for comparison. The scale of this deforestation has an impact on ecosystem services, biodiversity, water cycle and the carbon cycle (Fearnside 2006). Yet, in addition to the biological impacts of deforestation in the region, this deforested area is an issue of interest as it now encompasses highly diverse socio-economic environments (Margulis 2003; Morton *et al.* 2006; Barona *et al.* 2010) as one example, research within the Brazilian Amazon has suggested that over the last two decades, macro-economic forces have played an increasing role in deforestation in the Brazilian Amazon: large-scale cattle raising, industrial timber and wood, soybean and infrastructure investments are thought to have an increasingly greater role (Margulis 2003; Coutinho 2009).

TerraClass projects represents a concerted effort to monitor Land Use and Land Cover in the Brazilian Legal Amazon. This study offers to researchers a greater ability to trace out different classes of land use change over time, which can shed further light into the original land-uses post-deforestation and test how land use land cover and socio-economic dynamics may be changing over time across the entire region. Access to more historical data, along with continued monitoring in the years ahead, will allow make more rigorous analysis of both

the drivers of deforestation and more accurate estimates of greenhouse gas sinks and emissions.

Therefore, to assist and promote better-informed land use planning and decision making for the Amazon region, INPE and the Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa) have started a technical partnership in this study, which aimed to create a detailed map of land use land cover of the deforested areas of Brazilian Legal Amazon up to 2008.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The Brazilian Legal Amazon Region (Figure 1) extends over an area of approximately 5,200,000 km² and represents 59% of Brazil's land mass. Its population of twenty four million people (IBGE 2012) are distributed over 775 municipalities and the region is home to a very high ecological and socio-economic diversity. Figure 1 shows a map of the study area defined as the deforested area of the Amazon.

Datasets

This study uses a combination of deforestation vector data from PRODES (INPE 2015) and satellite orbital images (Landsat-5/TM, MODIS and SPOT-5).

Since 1988, PRODES data has recorded the annual increment (August-July) of deforestation larger than 6.25 ha. In 2008, total deforestation amounted to 719,210 km². Measured deforestation between August 2007 and July 2008 was of 11,457 km². This area was denoted as '2008 deforested area' and was not further classified, as we could not track its

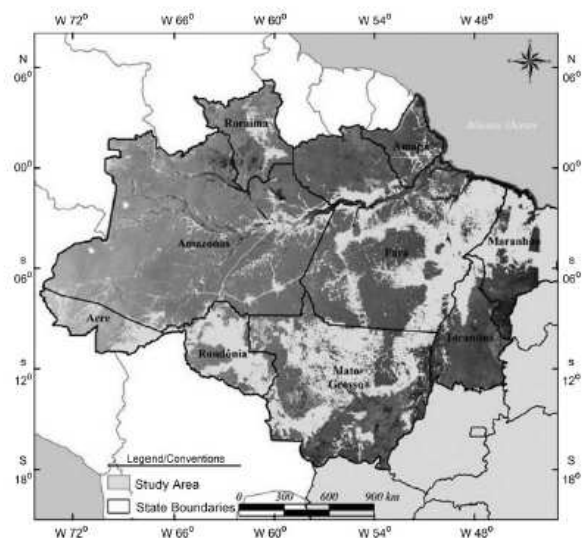


Figure 1. The Brazilian Legal Amazon.

evolution into other land cover types using 2008 images. The PRODES data was used to provide a mask of areas for use in the subsequent land cover classification procedures.

Landsat images have been successfully used in deforestation monitoring and land use and land cover studies, due mainly to its high spatial resolution (30 m) and capacity to discriminate objects and vegetation typology (Dubreuil *et al.* 2008; Bodart *et al.* 2011). This study used 214 geo-referenced Landsat-5/TM images available from the INPE's Image catalog (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>). The Landsat images are the same used to generate PRODES deforestation products. This set of images was collected mainly for the period July-September 2008 (187 scenes) when cloud cover is at its lowest in the Amazon. The Landsat images were the primary key source data for our land cover classification.

Due to its high temporal resolution of 1-2 days (compared to Landsat's 16-18 days), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) images have been widely used for continuous land use and land cover mapping, despite their limited spatial resolution of 250-1000 m (Eva *et al.* 2010; Verbesselt *et al.* 2012; Atzberger 2013). This study employs data from the MODIS Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) MOD13Q1 product (NASA 2001) over the period from August 2007 to July

2008 to identify annual crop areas based on their seasonal phenology. The MODIS product used is a 16-day composite of the highest quality pixels from daily images at a spatial resolution of 250 m.

TerraClass land cover classification was validated using SPOT-5 HRG (High Geometric Resolution) data in "panchromatic" mode (PAN, 0.51 – 0.73 μm) at 2.5 m spatial resolution. The geometric accuracy of these images is sufficient for their use in photointerpretation (Jensen 2009) and they were used here to assess our mapping accuracy.

Land Cover Classification

The methodology combines products of high spatial and temporal resolution to increase the mapping efficiency of land use and land cover (LULC) in the Brazilian Amazon. Table 1 lists the twelve classes of land uses used this region, which also represent the main types of land use land cover in the region. Figure 2 provides a flowchart of the methodological approach described in this paper. Land cover classification was attained by a sequence of operations, each one solving a classification decision and defining the region to be addressed by the next operation. The sequence of operations occurred in the order described in the following text.

Table 1. Main types of Land Cover in deforested areas of the Brazilian Amazon.

Thematic Categories	Description
Deforestation 2008	Areas recently deforested covered by soil, shrubs, herbage and felled trees with no defined land use at this stage, defined as areas that were mapped by PRODES project as deforested in 2008.
Urban area	Population concentration forming small inhabited places, villages and cities that present differentiated infrastructure from the rural areas with street design and higher density of dwellings such as houses, buildings and other public spaces.
Mining	Areas of mineral extraction with the presence of bare soil and deforestation in the proximity of water bodies.
Mosaic of Uses	Characterized by land cover units that, due to the spatial resolution of the satellite images, cannot be broken down further into specific components. For example, this classification might include family agriculture practiced in conjunction with the traditional cattle raising.
Annual Crops	Extensive areas with predominance of annual crops, specially grains, highly technological such as certified seeds, enriched soil, chemicals, fertilizers, mechanization among other resources.
Herbaceous Pasture	Pasture in productive process with predominance of herbage and coverage between 90 and 100% by different species of grass.
Shrubby Pasture	Areas of pasture in productive process with predominance of herbage and coverage by species of grass between 50% and 80% associated to the presence of shrubby vegetation with coverage between 20% and 50%.
Pasture with exposed soil	Pasture areas, exhibiting signs of severe degradation, containing at least 50% bare soil.
Regeneration with Pasture	Areas that were clear-cut, later developed as pasture and are at the beginning of a regenerative process containing shrubs and early successional vegetation.
Secondary Vegetation	Areas that were clear-cut and are at an advanced stage of regeneration with trees and shrubs. Includes areas that were used for forestry (silviculture) or permanent agriculture with use of native or exotic species.
Others	Areas not encompassed by other categories such as rocky or mountain outcrops, river shores and sand banks, among others.
Non-observed area	Areas not possible to be interpreted due to clouds or cloud shade at the moment of the satellite overpass or recently burned areas.

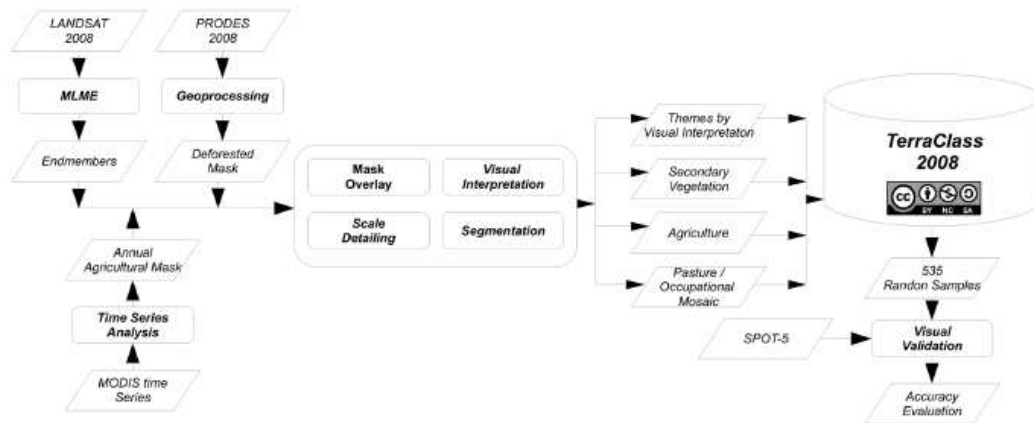


Figure 2. TerraClass project flowchart.

Deforestation mask

TerraClass has as study area the polygons defined as deforested areas by PRODES up to 2007.

Generation and clipping of fraction images

Second, to aid in the analysis, we applied a linear spectral mixture model methodology, developed by Mello *et al.* (2003) to obtain the soil, shade and vegetation fractions for each single pixel in the Landsat-5/TM images. The endmembers spectral signatures were acquired directly from each Landsat-5/TM images using representative targets of green vegetation, soil and shade. This procedure has been widely used in literature (Shimabukuro *et al.* 1998; Lu 2003; Mello *et al.* 2003) We then used the deforestation mask to eliminate already classified areas from analysis (i.e. forested areas), leaving only deforested areas for subsequent classification.

Visual Interpretation

Through visual interpretation step four low-frequency land cover classes were identified and mapped: urban areas, mining, others and non-observed areas due to cloud cover. This visual interpretation procedure has been reported in the literature to as a reliable method to characterize specific features (Novo 2008; Jensen 2009; Ponzoni *et al.* 2012), and it is based on the analysis of color, shape, texture, size and attributes of neighbouring pixels. An interpretation key was developed (shown in Table 2) so as to minimize errors due to subjective interpretation as well as to standardize the process among the technical personnel involved. These areas were then masked out from the deforested area.

Secondary vegetation

In this study, secondary vegetation consisted of originally forested areas that had been clear cut, used for silviculture,

agriculture or pasture and then left to regenerate, taking on a forest appearance again.

The areas mapped as secondary vegetation are in various stages of development, from initial stages, when the canopy is homogeneous and few species are found, to advanced stages when canopy heterogeneity and species diversity is similar to the original forest (Vieira *et al.* 2003).

Secondary vegetation areas were identified using the fraction images and color composite images of Landsat-5/TM bands 3, 4 and 5. With the vegetation fraction images from the linear mixture model, it was possible to identify a threshold above which land cover is dominated by secondary vegetation. These values varied for each image and once the spectral pattern was identified, the technique of image slicing was applied to create a thematic image (Almeida *et al.* 2010).

The image slicing results were used to create a group of thematic images of the secondary vegetation. Additional editing of imperfections found in secondary vegetation mapping was conducted with the aid of the color composites and the final secondary vegetation polygons were masked out of the fractional images.

Agriculture

To map annual crops, we used an automatic classification procedure based on the spectral and temporal characteristics of the MODIS Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse *et al.* 1974). Areas covered by annual crops present a particular seasonal biomass variation which allows the distinction of this class from other land covers based on behaviour of the NDVI time series of each pixel during the growing cycle (Adami *et al.* 2005; Rudorff *et al.* 2011; Arvor *et al.* 2012a).

Table 2. Visual interpretation key.

Urban Area			
Color <i>Magenta and Cyan</i>	Tonality <i>Medium to High</i>	Texture <i>Roughened with systematic pattern</i>	Form <i>Regular</i>
Mining			
Color <i>Magenta and Cyan</i>	Tonality <i>Medium to High</i>	Texture <i>Smoother</i>	Form <i>Irregular</i>
Mosaic of Uses			
Color <i>Magenta</i>	Tonality <i>Medium to High</i>	Texture <i>Roughened and heterogeneous</i>	Form <i>Irregular</i>
Annual Crops			
Color <i>Magenta</i>	Tonality <i>Medium to Light</i>	Texture <i>Smoother</i>	Form <i>Regular</i>
Herbaceous Pasture			
Color <i>Magenta</i>	Tonality <i>Light</i>	Texture <i>Smoother</i>	Form <i>Regular or Irregular</i>
Shrubs Pasture			
Color <i>Magenta or light green</i>	Tonality <i>Light</i>	Texture <i>Smoother</i>	Form <i>Regular or Irregular</i>
Pasture with exposed soil			
Color <i>Magenta and Cyan</i>	Tonality <i>Light or Medium</i>	Texture <i>Smoother</i>	Form <i>Regular or Irregular</i>
Regeneration with Pasture			
Color <i>Magenta or light green</i>	Tonality <i>Light or Medium</i>	Texture <i>Smoother or Slightly Roughened</i>	Form <i>Regular or Irregular</i>
Secondary Vegetation			
Color <i>Green</i>	Tonality <i>Light or Medium</i>	Texture <i>Smoother or Roughened</i>	Form <i>Regular or Irregular</i>
Others			
Color <i>Does not apply</i>	Tonality <i>Does not apply</i>	Texture <i>Does not apply</i>	Form <i>Irregular</i>
Non-observed area			
Color <i>White and various shades of black</i>	Tonality <i>High</i>	Texture <i>Smoother</i>	Form <i>Irregular</i>

The analysis was applied over 23 dates of MODIS-NDVI composites, acquired for the nine Amazon States between August 2007 and July 2008. The applied method has been demonstrated as useful for crop identification and mapping, especially in large mechanized agriculture areas (Adami *et al.* 2005; Arvor *et al.* 2012b; Vuolo and Atzberger 2012).

The adopted mapping method used the maximum and minimum NDVI values identified throughout the time series, based on the premise that each target presents a typical temporal behaviour. That is, in the case of the annual crops, the vegetation indices present low values at the beginning of the growing cycle, when the amount of biomass is low and the spectral response is influenced by the soil and, as the crops grow and gain biomass, the indices respond with higher values until reaching the vegetative peak. There is a decrease in value at the beginning of senescence, until they reach the same levels of the beginning of the cycle. This pattern is represented in figure 3. Considering this typical

temporal behaviour of the farming areas, the annual crop pixel mapping was done using the difference between the NDVI values at vegetative peak and the values at the cycle beginning, when there is greatest distance between them.

To minimize clouds interference in the temporal analysis, prior to classification, we applied an image filtering technique on the MODIS images based on harmonic analysis using HANTS algorithm, Harmonic Analysis of NDVI Time Series (Roerink *et al.* 2000)

The standard amplitude between maximum and minimum NDVI values was estimated based on known agricultural areas previously identified on Landsat-5/TM scenes. MODIS NDVI temporal profiles were generated for those areas to evaluate the seasonal variation of the biomass during the growing cycle and determine best periods to obtain maximum and minimum NDVI values. Once the standard difference value was established, a classification procedure based on an IDL (Interactive

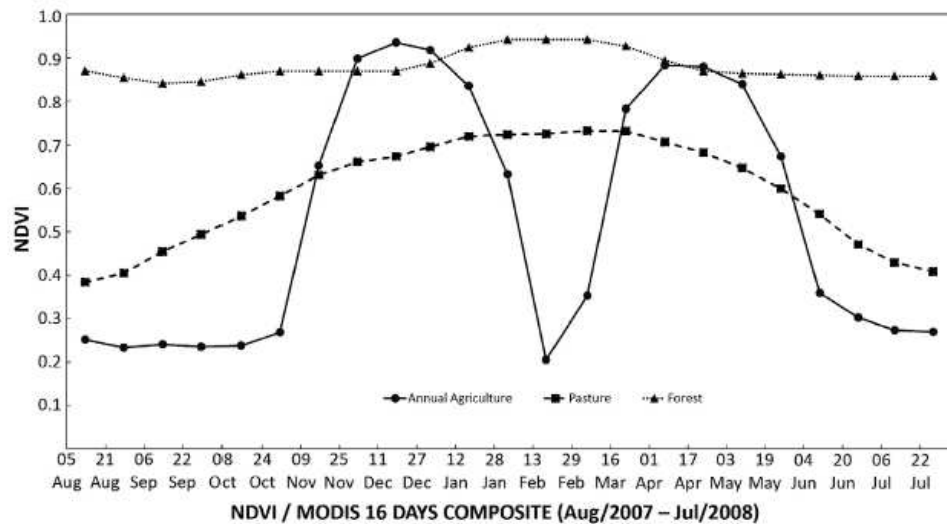


Figure 3. MODIS/NDVI temporal profiles of annual agriculture, forest and pasture between August 2007 and July 2008.

Data Language) code (Roerink *et al.* 2000) was applied to produce a binary image with the location of the MODIS pixels classified as annual crops, named “agricultural MODIS mask”.

The agricultural MODIS mask was employed to choose sample areas for the supervised classification of Landsat-5/TM images. First, image segmentation was conducted to discriminate spectrally homogeneous fields. Segmentation was based on the Regional Growth the algorithm available in the SPRING software (Câmara *et al.* 1996). It requires two parameters to aggregate pixels into homogeneous fields: the *similarity* and *area* thresholds. The similarity threshold is defined as the Euclidian distance between the grey values of two adjacent pixels or fields while the area threshold is defined as the minimum area in number of pixels to be considered as a field. There is no standard value for these thresholds as they depend on the land use spatial patterns present in each landscape. Consequently, the user has to make several approximations until a segmentation scheme is considered adequate. In our study, we found optimal similarity values between 10 and 20 grey levels and an optimal minimum area of 49 pixels giving a minimum mapping area of 4.4ha.

Following segmentation, supervised classification of the Landsat-5/TM images was conducted using the Bhattacharya classifier available in SPRING (Câmara *et al.* 1996). The final map of the annual crops therefore combines the temporal information of the MODIS images with the spatial resolution of Landsat-5/TM images. Following final classification and additional manual editing of eventual misclassifications, the agricultural polygons were identified in the deforested area and masked out of the fraction image.

Pasture and mosaic of uses

The final stage of analysis involved the classification of the remaining area dominated by pasture into four categories, Herbaceous Pasture, Shrubs Pasture, Regeneration with Pasture and Bare Soil Pasture, and a final miscellaneous ‘mosaic of uses’ category among the remaining land areas. Segmentation of fraction images was conducted as described above which was followed by a visual classification of polygons based on the interpretation key presented in Table 2 to attain consistent and precise identification of individual categories (Kelly *et al.* 1999; Jensen 2009).

These five land cover classes represent distinct land occupation patterns in the Amazon, as suggested by Pocard-Chapuis *et al.* (2005), and identifying them allows researchers to observe the land abandonment and forest regeneration processes. As reported by Uhl *et al.* (1988), abandoned pastures appear as forest regeneration with distinct biomass accumulations that vary according to time since last land use and the its intensity and duration. Other authors (Morton *et al.* 2006; Barona *et al.* 2010) pointed out that part of the soy development in the Amazon region has occurred by replacing pastures with soybeans, which may have been associated with have induced pasture expansion towards the deforestation frontier. Thus identifying and quantifying pastures spatial distribution according to its vegetative condition is essential to examine these hypothesis.

Fieldwork, final verification and data mosaic

During our study, we collected 3,800 geo-referenced photographs, in a field mission that covered more than 10,000 km in the Brazilian Amazon. These photographs were used as support material during the interpretation process, and are

publicly available on the INPE's website (www.obt.inpe.br/fototeca/fototeca.html).

At the end of the interpretation step, technicians external to the project verified the entire classification process aiming to reduce errors from divergent interpretation. The interpretation key showed in Table 2 was used in this step.

The validation consisted of taking a geographically random sample of 535 points from all of the 12 categories identified. The number of sample points was determined so as to reach a statistical consistency with the level of confidence (95%) and a confidence interval of 5% for the polygon population of approximately 2.5 million cases.

The procedure adopted for the validation of points was based initially on the visual identification of classes using SPOT-5 HRG at 2.5 m spatial resolution images, which were then overlapped and compared to the map produced by TerraClass.

The final TerraClass map covering the entire Brazilian Amazon was composed by the final classified product combined with PRODES regional data of forested areas in 2008, non-forested vegetation and water bodies.

RESULTS

Table 3 summarizes the results of the land use and land cover classification in the deforested areas of the Brazilian Legal Amazon. The land use category with the largest territorial coverage is Herbaceous Pasture which occurred in 46.7% of the deforested areas. When Shrubs and Regeneration Pasture

are also considered, this figure goes up to 62.1% of the total deforested area. In the table 4 it can see that Herbaceous Pasture is found in 335,700 km² of the Amazon deforested area with the largest incidence in Mato Grosso (MT), Para (PA) and Rondonia (RO) States with areas of 107,500 km², 107,300 km² and 52,900 km², respectively, representing 79.6% of total Herbaceous Pasture cover.

Table 3. Land Use and Land Cover by class for the Brazilian Amazon in 2008.

	Area (km ²)	Percentage Cover	Cumulative Percentage Cover
Herbaceous Pasture	335,714.94	46.68	46.68
Secondary Vegetation	150,815.31	20.67	67.65
Shrubs Pasture	62,823.75	8.74	76.38
Pasture with Regeneration	48,027.37	6.68	83.06
Non-observed Area	45,406.27	6.31	89.37
Annual Crops	34,927.24	4.86	94.23
Mosaic of Uses	24,416.57	3.39	97.63
Urban Area	3,818.14	0.53	98.16
Mining	730.68	0.10	98.26
Pasture with exposed soil	594.19	0.08	98.34
Others	477.88	0.07	98.41
Deforestation 2008	11,458.64	1.59	100.00
TOTAL	719,210.98	100	

Table 4. Distribution of the areas corresponding to each thematic category mapped by State (km² x 1000). Hyphens are used to denote the lack of occurrence of specific land use categories in particular states.

Class	Acre	Amapa	Amazonas	Maranhao	Mato Grosso	Para	Rondonia	Roraima	Tocantins	TOTAL
Forest	144.6	110.8	1,426.5	36.0	316.9	888.5	128.1	152.6	10.0	3,214.0
Non-forest	0.1	25.6	48.3	112.6	377.3	73.7	24.4	60.9	230.3	953.3
Hydrograph	0.2	3.6	52.2	4.4	4.8	44.3	2.1	1.8	1.5	114.9
Deforestation 2008	0.3	0.1	0.5	1.2	3.2	4.8	0.9	0.4	0.1	11.5
Annual Crops	-	<0.05	0.1	0.2	31.0	2.1	1.4	<0.05	0.1	34.9
Mosaic of Uses	1.5	0.2	2.9	4.5	2.3	11.4	0.8	0.7	<0.05	24.4
Urban area	0.2	0.1	0.5	0.8	0.5	1.3	0.4	0.0	0.1	3.8
Mining	-	<0.05	<0.05	<0.05	0.2	0.3	0.1	<0.05	<0.05	0.7
Others	<0.05	<0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	<0.05	<0.05	<0.05	0.5
Herbaceous Pasture	11.5	0.4	6.6	31.1	107.5	107.3	52.9	2.7	15.8	335.7
Shrubs Pasture	0.9	0.1	1.7	7.1	18.0	22.7	6.9	0.9	4.6	62.8
Regeneration with Pasture	0.6	0.3	2.2	8.8	11.2	16.2	5.9	0.9	1.9	48.0
Bare Soil Pasture	<0.05	-	<0.05	<0.05	0.3	0.2	<0.05	-	<0.05	0.6
Secondary Vegetation	3.8	1.0	15.7	21.5	28.0	57.6	13.3	2.5	7.4	150.8
Non-observed area	0.4	0.5	1.7	22.2	2.1	17.4	0.3	0.8	<0.05	45.4
TOTAL	164.2	142.8	1,559.0	250.6	903.4	1,247.8	237.6	224.3	271.8	5,001.4

The three pasture categories (Herbaceous, Shrub and Regeneration with Pasture) cover a total of 79.1% of the deforested area in Rondonia State, 66.9% of the deforested area in Mato Grosso State and 60.6% of the deforested area in Para State. Thus, in Rondonia and Mato Grosso the percentage of deforested area converted to pasture is higher than the Amazon average (62.1%). Conversely, pastures cover only 31.2% and 32.8% of the total deforested areas in Amapa (AP) and Amazonas (AM), well below the Amazonian average.

Secondary Vegetation accounted for 150,800 km² (21%) of the total deforested area. The largest proportion of secondary vegetation was verified in the Amazonas (49%) and in Amapa (37%) States. The lowest values, by contrast, were those in the States of Mato Grosso and Rondonia, with respectively 13.7% and 16.1% of the total deforested area of these States.

Annual crops were observed over an area of 34,900 km² (for comparison, an area approximately as large as the land

area of the Netherlands), mainly in Mato Grosso where the total area amounted to 31,000 km², or approximately 88.6% of the total Amazon annual crop area. Conversely, the State of Acre had no identifiable annual crop cover.

Table 4 reports the classification figures by state; and figure 4 shows the final land use and land cover map in the Brazilian Legal Amazon. Figure 5 highlights the Mato Grosso State land use and land cover.

The TerraClass mapping results were visually verified using SPOT 5 very high spatial resolution (2.5 m) satellite images from which 535 reference sample points were randomly selected from the Para and Mato Grosso States. These States were chosen because they had many high resolution images available, they represent 62% of the Brazilian Legal Amazon and they feature every land use and land cover classes mapped in this study. Based on the 535 reference points, it was possible to determine the classification error showed in Table 5.

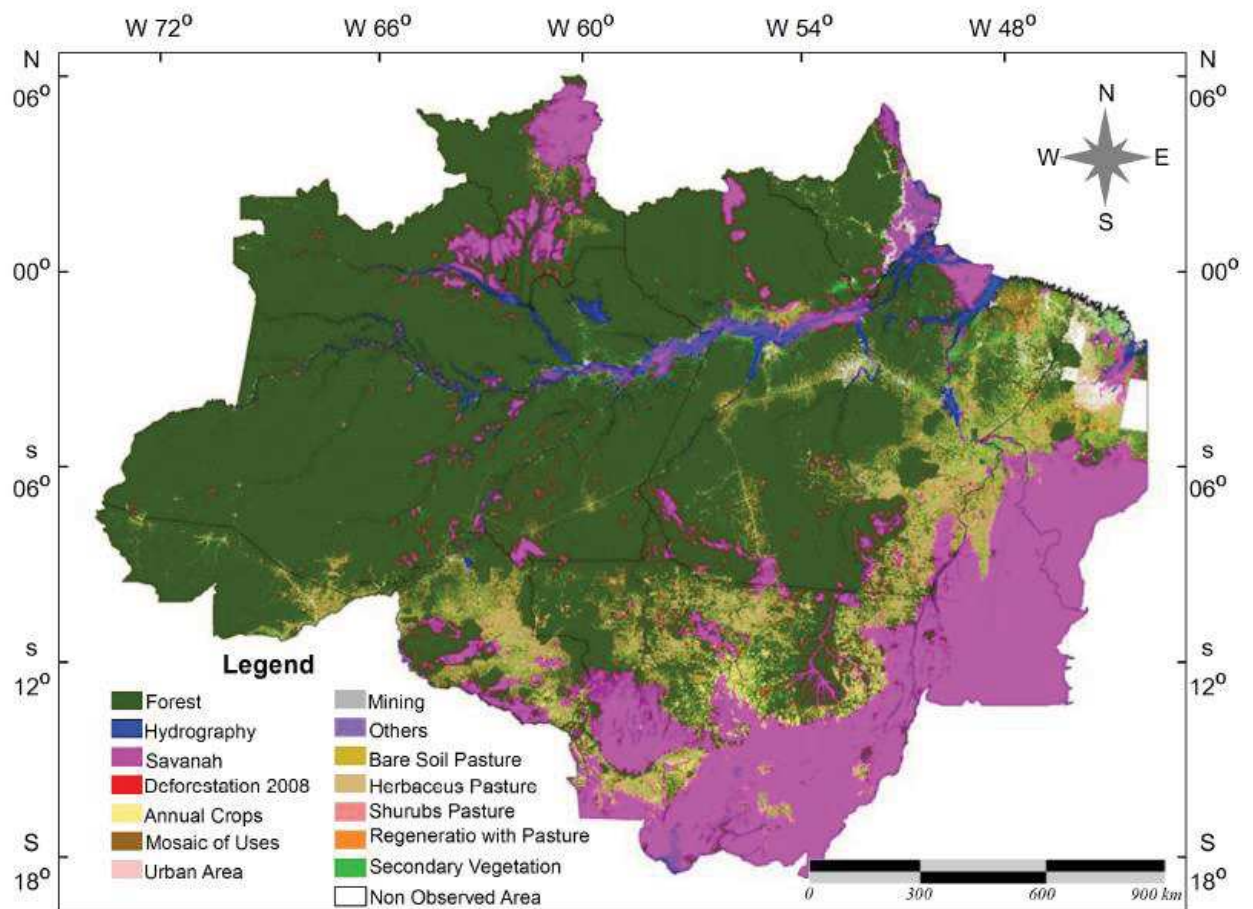


Figure 4. TerraClass 2008 map for the entire Brazilian Amazon. This figure is in color in the electronic version.

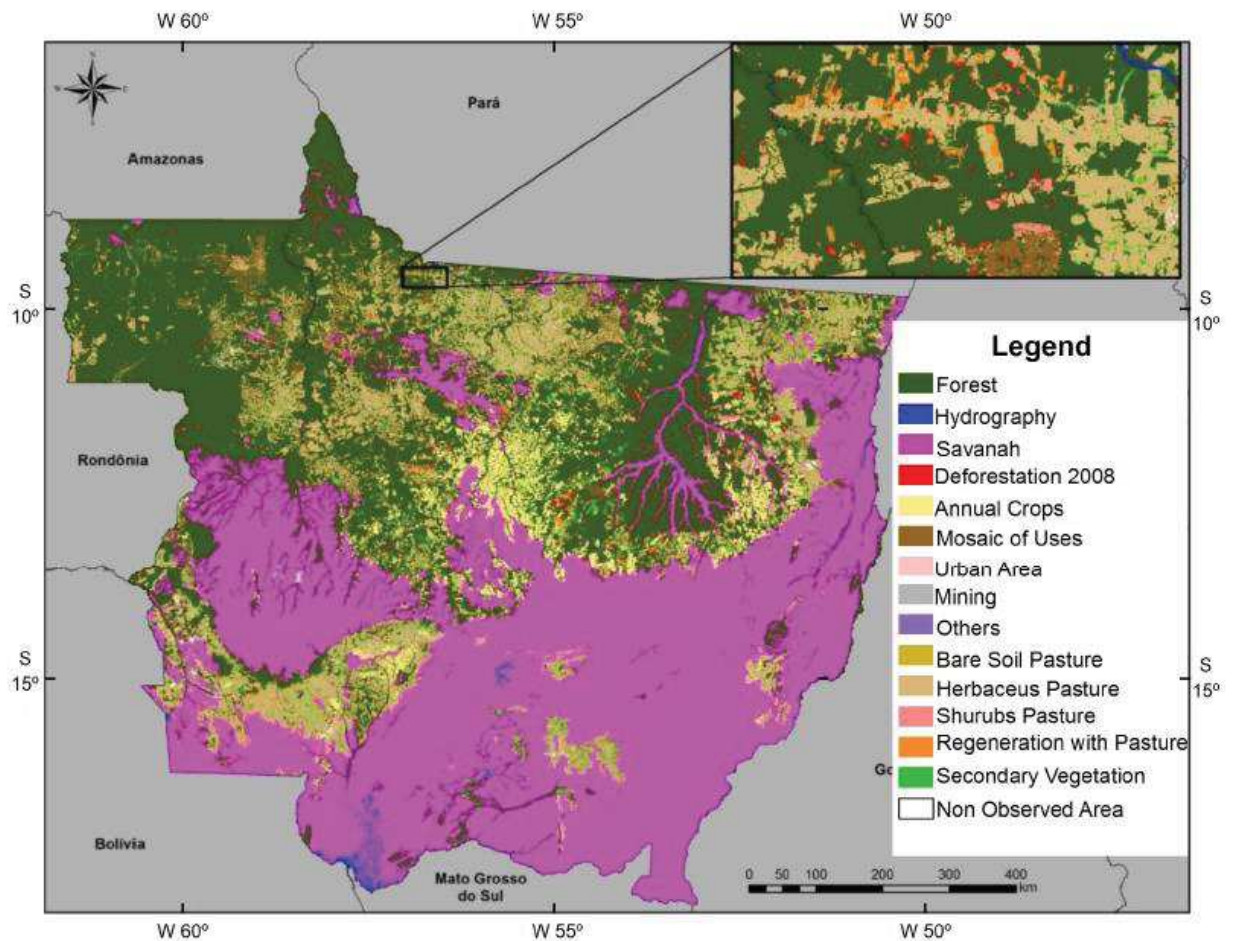


Figure 5. Detailed TerraClass mapping of Mato Grosso (MT). This figure is in color in the electronic version.

Table 5. TerraClass classification validation verified against SPOT satellite images.

Thematic classes	Spot images (Reference)						Total	Inclusion Error (%)
	Annual Crops	Mosaic of Occupations	Herbaceous Pasture	Shrubs Pasture	Pasture with regeneration	Secondary Vegetation		
	AC	MU	HP	SP	PR	SV	Total	Commission Error
Annual Crops (AC)	33		2			1	36	8.3
Mosaic of Uses (MU)		19	1	1		3	24	20.8
Herbaceous Pasture (HP)			199	39	12	10	260	23.5
Shrubs Pasture (SP)		1	10	45	7	5	68	33.8
Pasture with regeneration (PR)			2		19	7	28	32.1
Secondary Vegetation (SV)	1	3	7	6	7	95	119	20.2
Total	34	23	221	91	45	121	535	
Omission Error (%)	2.9	17.4	10.0	50.5	57.8	21.5		
Global accuracy map						76,64%		
Kappa index						0.67		

DISCUSSION

The dominance of pasture-based areas in deforested areas (62.1%) evidence the importance of this land use in the region (Poccard-Chapuis *et al.* 2005; Brandão *et al.* 2006; Bowman *et al.* 2012). Other studies have already suggested that livestock expansion ranks among the most important driver of deforestations in the region (Wassenaar *et al.* 2007; Barona *et al.* 2010; Espindola *et al.* 2012). While the 2008 TerraClass result alone cannot conclusively state that cattle expansion has been causing deforestation, *per se*, it does show that cattle has come to occupy a significant portion of the areas under direct use. Combined with further analysis forwards and backwards in time, researchers can then assess at what point the forest was converted, and which land uses subsequently occurred on those areas.

When merged, two classes of pasture – Shrubs Pasture and Pasture with Regeneration, characteristically with low level of management and consequently low productivity, accounted for 15.42% of the land use in deforested areas. This represents more than three times the area occupied by annual agriculture, and also a third of the area occupied by the other classes of pasture. These figures may suggest that if guided by appropriate public policies, it is feasible to induce the expansion of both agriculture and livestock production with a minor impact on deforestation (Sayer and Cassman 2013; Ceddia *et al.* 2014; Villoria *et al.* 2014).

The second largest land cover is Secondary Vegetation, which represents 21% of the total deforested area – a number that agrees with previous estimates (MMA 2006; Almeida *et al.* 2010). These areas play an important role in biodiversity conservation in tropical forest fragments (Pardini *et al.* 2005).

Yet secondary forests are also affected by their neighbouring land uses: recent studies suggest that secondary forest areas adjacent to areas of high deforestation often suffer a similar fate. (Soler *et al.* 2014; Jakovac *et al.* 2015).

Annual crops thought of by many as a key force for deforestation in the Amazon, covered circa 5% of the area mapped as deforested by PRODES in 2008. This result differs from Morton *et al.* (2006), which suggested that soybeans crops were one of the major deforestation vectors in Mato Grosso, between 2001 and 2004. Part of this difference can be explained by the temporal limitation, 2001 up to 2004, when deforestation data indicated a high rate of forest conversion (INPE 2015). But this period is also marked by a sharp change in the soybean market, caused mainly by the establishment of the soy moratorium by the major traders and the implementation of the Rural Environmental Registry (Rudorff *et al.* 2011; Gibbs *et al.* 2014;). All these types of dynamics underscore the importance of monitoring changes over time within of the Brazilian Amazon so as to assess the advance of agriculture within the Amazon biome in face of other drivers for land use change.

The agreement index between the map obtained by TerraClass and the validation points using SPOT data was 76.64% and the Kappa index 0.67. Over half the classification errors (75 of 125) as consequence of the split of the pasture land use into three categories. These classification errors can be attributed to the difficulty in distinguishing among these classes, as all pasture categories exhibit similar ground structure (grasses, weeds and shrubs), and differ primarily in the relative prevalence of these components. As pointed out by Powell *et al.* (2004), classifying areas by degree of transition frequently involves significant subjective judgment and possibly disagreement even among experienced interpreters. When some time interval rests between mapping and validation, even as little as few months of difference can result in conflicting classification of pastures between the analysis and validation, since distinct management, stocking, or even changes in the rainfall can affect the area's condition. To mitigate this problem in future analyses, detailed spectral characterization of pasture types may help minimize classification errors. Nevertheless TerraClass classification was able to efficiently distinguish major land use and land cover classes. When pasture classes are merged into one single class the agreement rise to 89.7% and the Kappa index increases to 0.79.

CONCLUSIONS

The results of TerraClass 2008 Project showed the predominance of pastures (62%) and secondary vegetation (21%) among the Amazonian post-deforestation landscape. At the same time, annual crop cultivation, historically referred as one of the most important vectors of deforestation, was present in less than 5% of the deforested areas in the Brazilian Legal Amazon in 2008. In general, results from validation with high spatial imagery (SPOT 5) indicate that the TerraClass classification methodology, using MODIS and Landsat data, appears reasonably accurate for the discrimination of the major land use and land cover classes in the Amazon region. Further editions of TerraClass Project opens up new opportunities for scientists and policy makers to track changes in land cover and land use in the Brazilian Amazon at high resolution, as well as to assess the initial drivers of deforestation and monitor how deforestation dynamics may also be changing over time and space.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank the Coordination for the Improvement of Higher Level Personnel (Capes), for providing scholarships (Process BEX 6083/13-3), UMR ESPACE-DEV by hosting the PhD project of the first author. We are thankful to Dr's Dalton Valeriano, David Galbraith, Katia Fernandes, and to Elinor Benami for the many constructive comments and suggestions on the manuscript. The World Bank, the Brazilian Ministry of Science Technology and Innovation, and

the Brazilian Ministry of the Environment are thanked here for the funding of the TerraClass project. By dedication of National Institute for Space Research (INPE) and Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa) technical teams.

REFERENCES

- Adami, M.; Moreira, M.A.; Rudorff, B.F.T.; Freitas, C.C.; Faria, R.T. De 2005. Direct expansion in the estimate of agricultural cultures by regular segments. *Revista Brasileira de Cartografia*, 2: 22–27.
- Almeida, C.A. de; Valeriano, D.M.; Isabel, M.; Escada, S.; Rennó, D., 2010. Estimativa de área de vegetação secundária na Amazônia Legal Brasileira. *Acta Amazonica*, 40, 289–302.
- Arino, O.; Gross, D.; Ranera, F.; Bourg, L.; Leroy, M.; Bicheron, P.; Latham, J. 2007. GlobCover: ESA service for global land cover from MERIS, in: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International, 2412–2415.
- Arvor, D.; Dubreuil, V.; Simões, M.; Bégué, A. 2012a. Mapping and spatial analysis of the soybean agricultural frontier in Mato Grosso, Brazil, using remote sensing data. *GeoJournal* 78, 833–850.
- Arvor, D.; Meirelles, M.; Dubreuil, V.; Bégué, A.; Shimabukuro, Y. 2012b. Analyzing the agricultural transition in Mato Grosso, Brazil, using satellite-derived indices. *Applied Geography*, 32, 702–713.
- Atzberger, C. 2013. Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs. *Remote Sensing*, 5, 949–981.
- Barona, E.; Ramankutty, N.; Hyman, G.; Coomes, O.T. 2010. The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, 5, 024002.
- Bartholome, E., Belward, A.S., Achard, F., Eva, H., Fritz, S., Bartalev, S. 2002. *GLC 2000 Global Land Cover mapping for the year 2000 Project status November 2002*. Institute for Environment and Sustainability (VA) Italy. 62p
- Bodart, C.; Eva, H.; Beuchle, R.; Raši, R.; Simonetti, D.; Stibig, H.J.; Brink, A.; Lindquist, E.; Achard, F. 2011. Pre-processing of a sample of multi-scene and multi-date Landsat imagery used to monitor forest cover changes over the tropics. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, 555–563.
- Bontemps, S.; Defourny, P.; Eric, V.B. 2010. *GLOBCOVER 2009 Products Description and Validation Report*. ESA, Belgium. 30p
- Bowman, M.S.; Soares-Filho, B.S.; Merry, F.D.; Nepstad, D.C.; Rodrigues, H.; Almeida, O.T. 2012. Persistence of cattle ranching in the Brazilian Amazon: A spatial analysis of the rationale for beef production. *Land use policy*, 29, 558–568.
- Brandão, A.S.P.; Rezende, G.C. de; Marques, R.W. da C. 2006. Crescimento agrícola no período 1999/2004: a explosão da soja e da pecuária bovina e seu impacto sobre o meio ambiente. *Economia Aplicada*, 10, 249–266.
- Câmara, G.; Souza, R.C.M.; Freitas, U.M.; Garrido, J.; 1996. Spring: Integrating remote sensing and gis by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, 20, 395–403.
- Ceddia, M.G.; Bardsley, N.O.; Gomez-y-Paloma, S.; Sedlacek, S. 2014. Governance, agricultural intensification, and land sparing in tropical South America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 7242–7247
- Coutinho, A.C. 2009. Condicionantes da expansão da fronteira agrícola em Mato Grosso. *Revista de Política Agrícola*, 17, 80–97.
- Dubreuil, V.; Laques, A.-E.; Nédélec, V.; Arvor, D.; Gurgel, H. 2008. Paysages et fronts pionniers amazoniens sous le regard des satellites : l'exemple du Mato Grosso. *L'Espace Géographique*, 37, 57–74.
- Espindola, G.M.; de Aguiar, A.P.D.; Pebesma, E.; Câmara, G.; Fonseca, L. 2012. Agricultural land use dynamics in the Brazilian Amazon based on remote sensing and census data. *Applied Geography*, 32, 240–252.
- Eva, H.; Carboni, S.; Achard, F.; Stach, N.; Durieux, L.; Faure, J.-F.; Mollicone, D. 2010. Monitoring forest areas from continental to territorial levels using a sample of medium spatial resolution satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, 191–197.
- Fearnside, P.M. 2006. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. *Acta Amazonica*, 36, 395–400.
- Friedl, M.A.; McIver, D.K.; Hodges, J.C.F.; Zhang, X.Y.; Muchoney, D.; Strahler, A.H. 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83, 287–302.
- Friedl, M.A.; Sulla-Menashe, D.; Tan, B.; Schneider, A.; Ramankutty, N.; Sibley, A.; Huang, X. 2010. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114, 168–182.
- Gibbs, H.K.; Rausch, L.; Munger, J.; Schelly, I.; Morton, D.C.; Noojipady, P.; Barreto, P.; Micol, L.; Walker, N.F. 2014. Brazil's Soy Moratorium. *Science*, 347, 377–378.
- IBGE, 2012. IBGE Cidades@ (www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1) Acesso em 27/05/2012.
- INPE, 2015. Projeto PRODES - Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite (www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodesmunicipal.php) Acesso em 12/08/2015.
- Jakovac, C.C.; Peña-Claros, M.; Kuyper, T.W.; Bongers, F. 2015. Loss of secondary-forest resilience by land-use intensification in the Amazon. *Journal of Ecology*, 103, 67–77.
- Jensen, J.R. 2009. *Sensoriamento Remoto do Ambiente*, 2da ed. Parêntese Editora, São José dos Campos, 2009, 598p.
- Kelly, M.; Estes, J.E.; Knight, K.A. 1999. Image Interpretation Keys for Validation of Global Data Sets. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65, 1041–1049.
- Lu, D. 2003. Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification. *Remote Sensing of Environment*, 87, 456–469.
- Margulis, S. 2003. *Causes of Deforestation of the Brazilian Amazon*, World Bank Working Papers. The World Bank, Washington, 80p.
- Mello, E.M.K.; Moreira, J.C.; Santos, J.R. dos; Shimabukuro, Y.; Duarte, V.; Souza, I. de M.; Barbosa, C.C.; Souza, R.C.M.; Paiva, J.A. de C. 2003. Técnicas de Modelo de Mistura Espectral Segmentação e Classificação de Imagens TM/LANDSAT para o

- Mapeamento do Desflorestamento da Amazônia, in: XI SBSR. Belo Horizonte, 2807–2814.
- MMA, 2006. Uso e cobertura da terra na Floresta Amazônica (Subprojeto 106/2004-PROBIO) (http://sistemas.mma.gov.br/sigepro/arquivos/_6/Relatorio_PROBIO_V2.pdf) Acesso em 06/01/2016.
- Morton, D.C.; DeFries, R.S.; Shimabukuro, Y.; Anderson, L.O.; Arai, E.; del Bon Espirito-Santo, F.; Freitas, R.; Morissette, J. 2006. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103, 14637–14641.
- NASA, 2001. Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) (https://lpdaac.usgs.gov/data_access) Acesso em 14/05/2014.
- Novo, E.M.L. de M., 2008. *Sensoriamento Remoto princípios e aplicações*, 3ra ed. Edgar Blusher Ltda, São Paulo, 2008, 364p.
- Pardini, R.; de Souza, S.M.; Braga-Neto, R.; Metzger, J.P. 2005. The role of forest structure, fragment size and corridors in maintaining small mammal abundance and diversity in an Atlantic forest landscape. *Biological Conservation*, 124, 253–266.
- Poccard-Chapuis, R.; Thales, M.; Venturieri, A.; Piketty, M.; Mertens, B.; Veiga, J.B. da; Tourrand, J. 2005. Filières de production et développement La filière viande : un levier pour contrôler les dynamiques pionnières en Amazonie brésilienne ? *Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures*, 14, 53–58.
- Ponzoni, F.J.; Shimabukuro, Y.; Kuplich, T.M.; 2012. *Sensoriamento Remoto da Vegetação*, 2da ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2012, 160p.
- Powell, R.L.; Matzke, N.; de Souza Jr., C.; Clark, M.; Numata, I.; Hess, L.L.; Roberts, D.A. 2004. Sources of error in accuracy assessment of thematic land-cover maps in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 90, 221–234.
- Roerink, G.J.; Menenti, M.; Verhoef, W. 2000. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1911–1917.
- Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W., 1974. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*, in: 3d ERTS-1 Symposium, NASA, Goddard Space Flight Center, United States, 309–317.
- Rozon, C.; Lucotte, M.; Davidson, R.; Paquet, S.; Oestreicher, J.S.; Mertens, F.; Passos, C.J.S.; Romana, C. 2015. Spatial and temporal evolution of family-farming land use in the Tapajós region of the Brazilian Amazon. *Acta Amazonica*, 45, 203–214
- Rudorff, B.F.T.; Adami, M.; Aguiar, D.A.; Moreira, M.A.; Mello, M.P.; Fabiani, L.; Amaral, D.F.; Pires, B.M. 2011. The soy moratorium in the Amazon biome monitored by remote sensing images. *Remote Sensing*, 3, 185–202.
- Sayer, J.; Cassman, K.G. 2013. Agricultural innovation to protect the environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 8345–8348.
- Shimabukuro, Y.; Batista, G.T.; Mello, E.M.K.; Moreira, J.C.; Duarte, V. 1998. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon Region. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 535–541.
- Soler, L.D.S.; Verburg, P.H.; Alves, D. 2014. Evolution of Land Use in the Brazilian Amazon: From Frontier Expansion to Market Chain Dynamics. *Land* 3, 981–1014.
- Uhl, A.C.; Buschbacher, R.; Serrao, E.A.S. 1988. Abandoned Pastures in Eastern Amazonia. I. Patterns of Plant Succession. *Journal of Ecology*, 76, 663–681.
- Verbesselt, J.; Zeileis, A.; Herold, M. 2012. Near real-time disturbance detection using satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 123, 98–108.
- Vieira, I.C.G.; Almeida, A.S. de; Davidson, E.A.; Stone, T.A.; Carvalho, C.J.R. de; Guerrero, J.B. 2003. Classifying successional forests using Landsat spectral properties and ecological characteristics in eastern Amazônia. *Remote Sensing of Environment*, 87, 470–481.
- Villoria, N.B.; Byerlee, D.; Stevenson, J. 2014. The Effects of Agricultural Technological Progress on Deforestation: What Do We Really Know? *Applied Economic Perspectives and Policy*, 36, 211–237.
- Vuolo, F.; Atzberger, C. 2012. Exploiting the Classification Performance of Support Vector Machines with Multi-Temporal Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Data in Areas of Agreement and Disagreement of Existing Land Cover Products. *Remote Sensing*, 4, 3143–3167.
- Wassenaar, T.; Gerber, P.; Verburg, P.H.; Rosales, M.; Ibrahim, M.; Steinfeld, H. 2007. Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. *Global Environmental Change*, 17, 86–104.

Recebido 25/11/2015
Aceito em 04/02/2016

3 TYPOLOGIE ET SPATIALISATION MUNICIPALE DES SYSTEMES DE PRODUCTION AGROPASTORAUX DOMINANTS DE L'ÉTAT DU RONDONIA

Le paysage actuel de l'Amazonie est composé de mosaïques hétérogènes résultantes des interactions entre forêt d'origine et activités productivistes. Reconnaître et quantifier les caractéristiques de ce paysage est essentiel pour mieux appréhender les conséquences socio-économiques de la poursuite de l'expansion agricole, les chaînes de production agropastorales associées, l'impact des politiques publiques sur l'environnement et améliorer la planification des actions futures (Foley et al. 2005; Lambin et al. 2014).

La deuxième phase des travaux de thèse a eu pour principal objectif de construire une méthodologie générique capable d'identifier et de caractériser au niveau du municipe les systèmes de production agropastoraux prédominants pour l'ensemble des municipes de l'État de Rondônia.

L'état du Rondônia a été choisi parce qu'il possède une mosaïque environnementale représentative des différents environnements amazoniens, tels que des surfaces forestières primaires et secondaires ou en voie de déforestation, des pâturages dédiés principalement à l'élevage bovin, des secteurs de production céréaliers. Le tout dans un contexte de petites ou grandes propriétés. La figure 5 montre la carte d'utilisation et d'occupation des sols de l'État du Rondônia en 2010 à une résolution spatiale de 30 m. En haut à droite de l'image, un zoom est fait sur la carte d'occupation et usage des sols, montrant une forme de déforestation dite en "arête de poisson" typique de cette région. La diversité d'environnements et de paysages de cet état va permettre de développer une méthodologie susceptible d'être appliquée aux autres États amazoniens.

Pour caractériser objectivement les municipes et les systèmes de production associés, une grande variété de paramètres quantitatifs a été regroupée en quatre dimensions pour l'année 2010: (i) **la production agricole**, (ii) **l'économie** (dont PIB, crédit agricole, logistique, données fournies par des relevés systématiques de l'IBGE¹⁸), (iii) **les configurations territoriales** des différentes classes d'occupation du

¹⁸ IBGE : l'Institut brésilien de géographie et de statistiques

sol produites dans le cadre des programmes TerraClass (cf. figure 5) et PRODES , (iv) **les caractéristiques sociales.** (tableau 3).

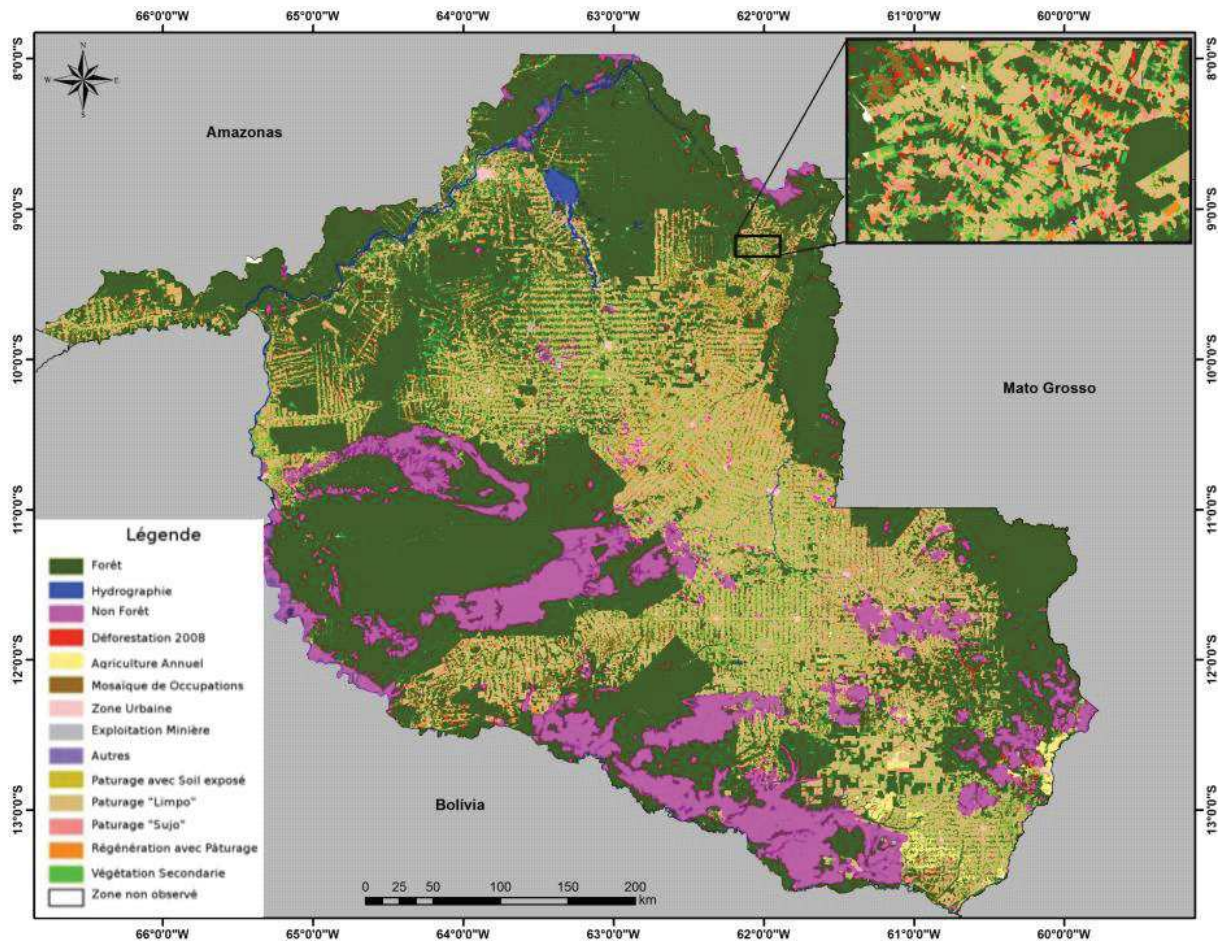


Figure 5 - Carte détaillée de l'occupation et de l'usage des sols de l'État de Rondônia en 2010.
Source: adaptée du Projet TerraClass (INPE 2011)

Les attributs regroupés dans le tableau (3) ont été utilisés à plusieurs étapes du processus de classification des systèmes de production : (i) pour construire un arbre de décision (figure 6), (ii) pour vérifier à partir d'une analyse de variance (ANOVA) les différences entre les profils des systèmes de production, (iii) pour classifier les municipes.

Tableau 3 - Métriques adoptées et unités de mesure (niveau municipale)

Dimension	Attributs	Description	Unité
Production agricole	AMProp	Taille moyenne des propriétés du municipe (surface totale des propriétés / nombre total de propriétés)	km ²
	NbovPast_T2	Capacité moyenne des pâturages TerraClass ("bien entretenu", "embroussaillé", en	Boeuf/ ha

		régénération) = nombre total de bovins dans le municpe en 2010 / Total des pâturages TerraClass en 2010	
	NVacReb_T2	Proportion de vaches laitières au sein de la population bovine totale	%
	AMCafe_T2	Aire moyenne de culture du café dans la municipalité en 2010	ha
	DACafeT2	Pourcentage superficie déboisée de chaque munice cultivée pour le café en 2010	%
Économie PIB	PIB_T2	PIB municipal en 2010	R\$ x 1000
	PIBAgro_T2	PIB municipal du secteur agricole en 2010	R\$ x 1000
	EvPIB_T1T2	Evolution du PIB (2000 à 2010) = PIB 2010 - PIB 2000	R\$ x 1000
	EvPIBAgro_T1T2	Evolution du PIB agricole (2000 à 2010) = PIB agricole 2010 - PIB agricole 2000	R\$ x 1000
	PIBPRD_T2	Relation entre PIB -2010 et déforestation selon PRODES en 2010	R\$ x 1000/km2 PRODES
	EvPIBPRD_T1T2	Evolution du PIBPRD entre 2000 et 2010 = PIBPRD_T2 - PIBPRD_T1	R\$ x 1000/kKm2 PRODES
	PIBAgroPRD_T2	Relations entre PIB agricole 2010 et superficie déboisée PRODES 2010	R\$ x 1000/km2 PRODES
	EvPIBAgroPRD_T1T2	Evolution du PIBAgroPRD entre 2000 et 2010. = PIBAgroPRD_T2 – PIBAgroPRD_T1	R\$ x 1000/km2 PRODES
	PIBHab_T2	Relation entre le PIB 2010 et la population du municpe	R\$ x 1000/hab.
	EvPIBHab_T1T2	Evolution 2000-2010 de la relation entre PIB et population de la municipalité	R\$ x 1000/hab.
	PIBAgroPopR_T2	Relation entre PIB Agricole 2010 et population municpe zone rurale 2010	R\$ x 1000/hab.
	EvPIBAgroPopR_T1T2	Evolution 2000-2010 de la relation entre PIB et population municpe zone rurale	R\$ x 1000/hab.
Économie Crédit agricole	NcrAg_2010	Nombre d'opérations en 2010 de crédit agricole dans le municpe	Unit
	NTCrAg_T1T2	Nombre d'opérations entre 2000-2010 de crédit agricole dans le municpe	Unit
	RsMcrAg_T2	Valeur moyenne des opérations de crédit agricole dans le municpe en 2010	R\$ x 1000
	RsCrAgPRD_T2	Relation en 2010 entre le crédit agricole total et la déforestation (PRODES)	R\$ x 1000/ Km2 Deforest.
	RsmCrAgPRD_T1T2	Rapport moyen entre montant du crédit agricole et déforestation (PRODES) entre les années 2000 et 2010	R\$ x 1000/ Km2 Deforet.
Économie Logistique	DEst	Relation entre le périmètre total de routes et l'aire municipale totale	km / km2
	DHdr	Périmètre total des polygones et des vecteurs liés à l'hydrographie du municpe / surface totale du municpe.	km / km2
Configuration Territoriale (PRODES)	AMPRD_T1T2	Taille moyenne des polygones 2000-2010	km2
	APPRD_T1T2	Moy. Surface/périmètre des polygones 2000-2010	-
	DDesf_T2	% de la déforestation du municpe pour 2010	%

	DDesf_T1T2	Evolution entre 2000 et 2010 du % de déforestation dans le municipe = DDesf_T2 – DDesf_T1	%
	TxMDesf_T1T2	Taux moyen de déforestation annuelle entre 2000-2010.	%
Configuration Territoriale (TerraClass)	AMPTC_T2	Taille moyenne des polygones 2010	km2
	APTC_T2	Moy. Aire / Périmètre des polygones 2010	-
	DPTC_T2	Densité de polygones 2010	Polygones / km2
	DATCAA_T2	Fraction agriculture 2010	%
	DATCMO_T2	Fraction mosaïque d'occupation 2010	%
	DATCPL_T2	Fraction Pâturage "bien entretenu" 2010	%
	DATCPS_T2	Fraction Pâturage "embroussaillé" 2010	%
	DATCRP_T2	Fraction Pâturage en régénération 2010	%
DATCVS_T2	Fraction Végétation Secondaire 2010	%	
Config. Territoriale -UCE¹⁹	DAUPA	% de la superficie des unités de conservation au sein de le municipe	%
Caractéristiques Sociales	IDHM_T2	Indice de développement humain (IDH) pour 2010, calculé à partir de la longévité, l'éducation et le revenu.	Indice (0 to 1)
	IDHM_T1aT2	Evolution 2000-2010 de l'IDH municipal	Indice (0 to 1)
	DPobre_T2	% des adultes ayant un revenu égal ou inférieur à R\$ 140,00 par mois en Août 2010	% de la population municipale
	EvDPobre_T1T2	Variation en % des pauvres entre 2000 et 2010.	% de la population municipale
	DPAss	% aire municipale occupée par les projets de colonisation.	%
	PopR_T2	Population de la zone rurale (recensement démographique 2010)	Unité
	EvPopR_T1T2	Variation de la population en zone rurale 2000-2010	Unité
	PopRP RD_T2	Rapport entre la population de la zone rurale et l'aire de déforestation en 2010 (PRODES)	habitants / km2 déforest.
	EvPopRP RD_T1T2	Variation 2000 et 2010 du rapport entre population de la zone rurale et l'aire déboisée (PRODES)	habitants / km2 déforest.
	EvPopRP RD_T1T2 (%)	% Variation entre 2000 et 2010 du rapport entre la population de la zone rurale et l'aire de déforestation (PRODES)	%

L'utilisation d'un arbre de décision a été privilégiée en raison de sa facilité d'utilisation et de sa robustesse pour la description des types standards (Kotsiantis 2013; Ribeiro 2015). Chaque municipe a pu ainsi être rattaché à l'un des six systèmes de production agricole présents dans l'état du Rondônia (cf. figure 6). Le premier

¹⁹ UCE : Unité de Conservation Environnementale

appelé "Aire de coexistence", est identifié comme un système où coexistent élevage et agriculture intensive (CA). Les deux suivants correspondent à des systèmes semi-intensif destinés à la filière viande (SIB) et à une activité mixte de production de viande et de lait (SIBM). Les deux derniers correspondent à des systèmes d'élevages bovins intensifs destinés uniquement à la production de la viande (IB) et à la production mixte de viande et de lait (IBM). Les systèmes dits intensifs présentent 60 % de pâturages "bien entretenu", mettant en évidence un processus d'intensification de la production.

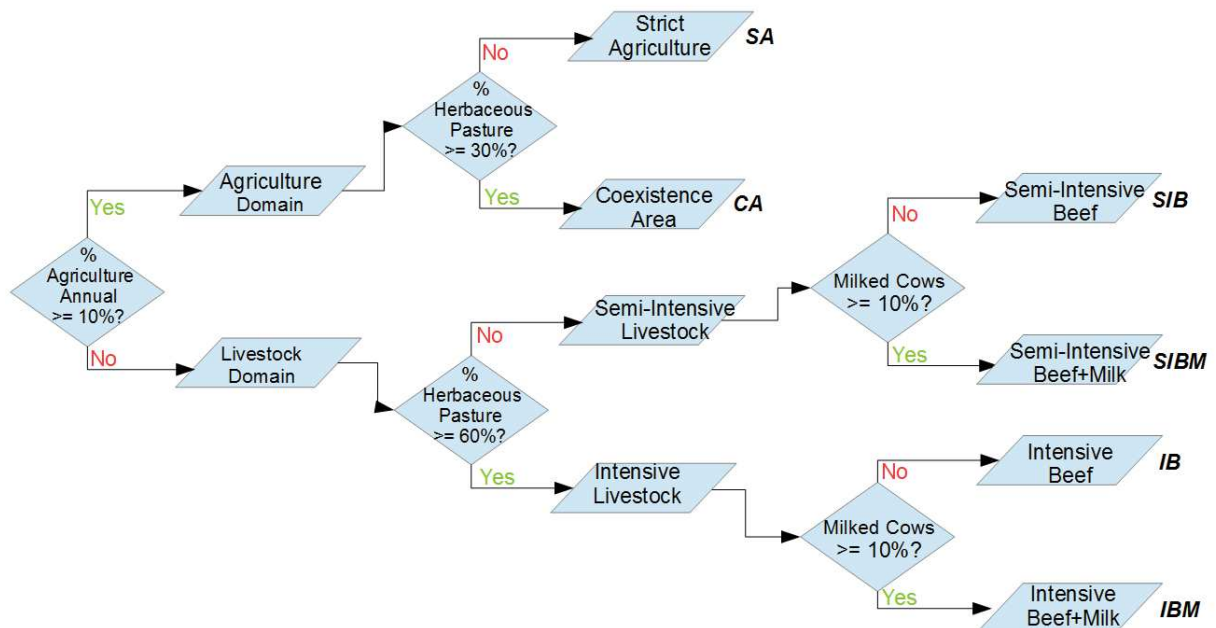


Figure 6 - Arbre de décision pour l'identification des systèmes productifs agropastoraux du Rondônia.

Ce système, appelé également semi-confinement (Barbosa et al. 2015), consiste à maintenir les animaux en régime de pâturage extérieur tout en leur offrant un complément alimentaire, spécialement durant la saison sèche. Il faut signaler que ce système diffère des systèmes à régime de confinement total des animaux, où ceux-ci reçoivent toute leur alimentation directement dans des auges, sans que les animaux soient conduits au pâturage.

L'application de l'arbre de décision à l'ensemble des municipes de l'état du Rondônia (cf figure 7) a permis de déterminer et cartographier la distribution de ses systèmes : 5 d'entre eux ont un type de production mixte "élevage et agriculture intensive" (CA), 17 une production intensive (IB) et 11 semi intensive (SIB) de viande,

13 une production intensive (IBM) et 5 semi intensive (SIBM) des systèmes mixtes viande et lait .

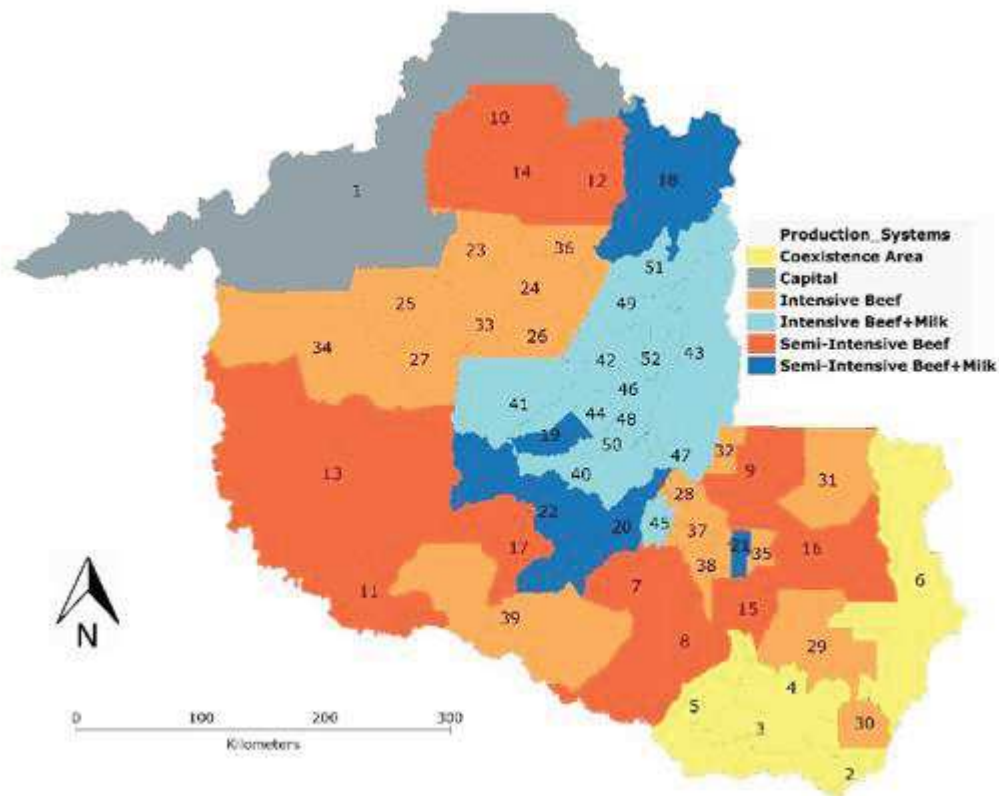


Figure 7 – Distribution des systèmes de production agropastoraux du Rondônia.

Ensuite chaque municipe a été classé en fonction de sa production agricole prédominante (cf. figure 3). Les résultats financiers et la distribution des revenus issus des cinq principales cultures annuelles du Rondônia ont été considérés (riz, haricot, manioc, maïs et soja). Un municipe est classé comme "spécialisé" lorsque sa culture principale concentre plus de 67% des revenus. Quand deux cultures sont de même importance, que leur somme est égale ou supérieure à 84%, le municipe est classée comme "groupé" ; et lorsque une culture dominante n'apparaît pas, il est classé comme "diffus".

Discussion

Les activités de production agropastorale ont façonné plusieurs types de paysages. Au Sud de l'état prédominent les systèmes de production liés à l'agriculture mécanisée. Ce paysage trouve son origine du fait d'une plus grande présence d'immigrants en provenance du Sud du Brésil, la plus grande taille des lots de peuplement et la proximité des autres régions productrices de céréales du Mato Grosso qui ont influencé la mise en œuvre de l'agriculture mécanisée dans la région Sud Rondônia (Droulers, Le Tourneau, & Machado, 2001; Santos & Chediak, 2015; Silva & Burgeile, 2014). Les systèmes basés sur des pâturages gérés de façon précaire sont localisés sur les frontières en expansion.

Dans les municipes où prédominent les systèmes dits "Aire de Coexistence", la culture du soja présente une importance économique plusieurs fois supérieure à celle des autres cultures. Cela corrobore l'idée que les régions à prédominance de culture du soja correspondent à une concentration foncière et à une spécialisation de la production (Becker 2007; R. G. da C. Silva 2014). Le manioc est dominant dans les systèmes où est présent l'élevage bovin, avec des chiffres plus élevés dans le système semi-intensif de bœuf, renforçant l'importance de cette culture en tant que source de revenus complémentaires, notamment dans des systèmes de subsistance (Chomitz and Thomas 2001; Thomas Hurtienne 2005).

Les systèmes productifs de la filière laitière présentent des chiffres de population rurale plus élevés, ce qui peut suggérer une plus grande capacité de ses systèmes à retenir la population en milieu rural. Tous les systèmes de production liés à l'élevage bovin présentent une capacité de charge semblable ou même supérieure aux valeurs moyennes nationales (Euclides 2001; Oliveira et al. 2006; Barbosa et al. 2015).

Le centre de l'état du Rondônia concentre les paysages d'élevage intensif. Cela s'explique par la proximité de l'axe de la route BR-364, où les premiers projets de colonisation ont été installés et aussi par la présence de colons venant des régions du Sud et du Sud-Est du Brésil, avec la tradition de l'élevage (Rodrigues, Souza, and Rodrigues 2014; Paes-de-Souza, Amin, and Gomes 2009; Riva, Coreldiro, and Costa 2008; Pacheco and Pocard-Chapuis 2012). L'élevage semi-intensif est principalement situé à proximité de la frontière Sud-Ouest et dans le Nord de l'Etat. Là

où l'occupation humaine du territoire n'est pas totalement consolidée, la colonisation est plus récente et les infrastructures sont moins importantes.

Ces résultats corroborent la thèse de la prédominance de l'élevage bovin destiné à la filière viande dans l'État du Rondônia (Espindola et al., 2012; Soler, Verburg, & Alves, 2014), complétée par l'activité laitière dans quelques municipes (Paes-de-Souza, Amin, and Gomes 2009; Marcolan et al. 2011; IDARON 2013).

Le résultat le plus significatif concerne la dimension de la configuration territoriale, la relation aire/périmètre variant de façon significative entre les différents systèmes de production. Ce résultat a révélé une gradation de la forme des polygones d'occupation du sol allant de formes plus simples (plus régulières) pour des systèmes de type "Aire de Coexistence" (CA), des valeurs intermédiaires pour les systèmes d'élevage de production de viande de bœuf (IB et SIB) jusqu'à des formes plus complexes (plus irrégulières) pour les systèmes d'élevage bovin des filières viande et lait (IBM et SIBM).

Ce travail a permis de caractériser "l'empreinte" des systèmes productifs agropastoraux en croisant les données socio économiques, le relevé des saisies de la production agropastorale et la configuration du territoire. La description de la méthodologie développée et des résultats associés ont fait l'objet du second article intitulé "Typologies and Spatialization of Agricultural Production Systems in Rondônia, Brazil: Linking Land Use, Socioeconomics and Territorial Configuration" (Almeida et al. 2016b) publié dans la revue Land.

3.1 Typologies and spatialization of agricultural production systems in Rondônia, Brazil: Linking land use, socioeconomics and territorial configuration



Article

Typologies and Spatialization of Agricultural Production Systems in Rondônia, Brazil: Linking Land Use, Socioeconomics and Territorial Configuration

Cláudio Almeida ^{1,*}, Moisés Mourão Jr. ², Nadine Dessay ³, Anne-Elisabeth Lacques ³, Antônio Monteiro ¹, Laurent Durieux ³, Adriano Venturieri ² and Frédérique Seyler ³

¹ National Institute for Space Research—INPE 1, Av. dos Astronautas, 1758 CP. 515, 12227-010 São José dos Campos, SP, Brazil; miguel@dpi.inpe.br

² Brazilian Agricultural Research Corporation—EMBRAPA Eastern Amazon, Trav. Dr. Enéas Pinheiro, s/n^o, Caixa postal 48, 66095-100 Belém, PA, Brazil; moises.mourao@embrapa.br (M.M.); adriano.venturieri@embrapa.br (A.V.)

³ Institut de Recherche pour le Développement—IRD UMR Espace-Dev, 500 rue Jean François Breton, 340930 Montpellier, France; nadine.dessay@ird.fr (N.D.); anne-elisabeth.lacques@ird.fr (A.-E.L.); laurent.durieux@ird.fr (L.D.); frederique.seyler@ird.fr (F.S.)

* Correspondence: claudio.almeida@inpe.br; Tel.: +55-12-3208-6461

Academic Editor: Richard Aspinall

Received: 30 March 2016; Accepted: 13 June 2016; Published: 22 June 2016

Abstract: The current Amazon landscape consists of heterogeneous mosaics formed by interactions between the original forest and productive activities. Recognizing and quantifying the characteristics of these landscapes is essential for understanding agricultural production chains, assessing the impact of policies, and in planning future actions. Our main objective was to construct the regionalization of agricultural production for Rondônia State (Brazilian Amazon) at the municipal level. We adopted a decision tree approach, using land use maps derived from remote sensing data (PRODES and TerraClass) combined with socioeconomic data. The decision trees allowed us to allocate municipalities to one of five agricultural production systems: (i) coexistence of livestock production and intensive agriculture; (ii) semi-intensive beef and milk production; (iii) semi-intensive beef production; (iv) intensive beef and milk production, and; (v) intensive beef production. These production systems are, respectively, linked to mechanized agriculture (i), traditional cattle farming with low management, with (ii) or without (iii) a significant presence of dairy farming, and to more intensive livestock farming with (iv) or without (v) a significant presence of dairy farming. The municipalities and associated production systems were then characterized using a wide variety of quantitative metrics grouped into four dimensions: (i) agricultural production; (ii) economics; (iii) territorial configuration, and; (iv) social characteristics. We found that production systems linked to mechanized agriculture predominate in the south of the state, while intensive farming is mainly found in the center of the state. Semi-intensive livestock farming is mainly located close to the southwest frontier and in the north of the state, where human occupation of the territory is not fully consolidated. This distributional pattern reflects the origins of the agricultural production system of Rondônia. Moreover, the characterization of the production systems provides insights into the pattern of occupation of the Amazon and the socioeconomic consequences of continuing agricultural expansion.

Keywords: Amazon; land use; multidimensionality; socioeconomic; TerraClass

1. Introduction

The colonization of the Brazilian Amazon has directly led to a new geography, with significant impacts on the natural environment and regional development [1,2]. The waves of settlement produced a strong integration of local livestock supply chains with national and international markets, further reinforcing and incentivizing the process of occupation [3–5]. However, the occupation of land has been characterized by different systems of production that generate different costs and benefits for the economy, socioecological systems and farming [6–9]. Such differences in production originate from different land use systems and/or the different techniques adopted for the same land use in different production systems.

An in-depth knowledge of regional geography is therefore fundamental to understand the spatial distribution and evolution of agricultural supply chains, in order to assess the impact of current policies and future actions [10]. Knowledge of the effects of shifting land use is equally important in the search for sustainable solutions for impacted rural communities [11,12], since themes such as climate change, food security, biodiversity and energy sources will also be strongly influenced by regional geographies [13].

Spatial analysis of socioeconomic data is an important element in the construction of rural development indices. Such indices lack robustness if they are based on an insufficient number of metrics/indicators and, ideally, should incorporate measures of land use and landscape characteristics [14]. More generally, the analysis of spatial patterns of socioeconomic indicators contributes to an understanding of the spatial variations of the territory [15].

Agronomic geography concerns the identification and analysis of spatial variation in agricultural practices, uncovering the many factors that contribute to this spatial distribution [16–18]. The formation of different agricultural production regions, within territorial dynamics linking geography and economics [18,19], highlights the importance of studying geographical development at a regional scale.

Previous studies analyze socioeconomic data from the demographic census and/or agricultural census in the context of land use changes in the Amazon [20,21] or to explain poverty among agricultural producers in Brazil [22]. Others employ landscape analysis techniques to study land use changes [23]. In this paper, we explore how spatial analysis of land use and socioeconomic attributes can contribute to the discovery of patterns of distribution of agricultural system productions. Our hypothesis is that it is possible to identify the predominant systems of production in each municipality based on the percentage of annual crop, clean pasture, and dairy cows.

With the aim of contributing to geographical knowledge of agricultural production systems in Rondônia State, Brazil, the objectives of this article are to identify the predominant systems at a municipal scale, and to characterize these systems using a wide variety of quantitative metrics grouped into four dimensions: (i) agricultural production; (ii) economics; (iii) territorial configuration, and; (iv) social characteristics.

2. Materials and Data Preparation

2.1. Study Area

The Brazilian State of Rondônia covers 237,590 km² and is currently divided into 52 municipalities. The state has its origins in the Guaporé territory (formed from parts of Amazonas and Mato Grosso States) that was created in 1943 (Federal Decree No. 5.912, 13 September 1943). In 1956, this territory was renamed Rondônia and was officially converted into a state in 1981 (Complementary Law No. 41, 22 December 1981). Significant colonization of Rondônia began in the early 20th century in response to the growth of latex extraction in the Amazon and facilitated by the construction of the Madeira-Mamore railway. The construction of the BR-364 highway in the 1970s linked the capital, Porto Velho, to the southcentral region of the state and integrated local supply chains with the regional and global market [24,25]. This process of occupation intensified throughout the century, reaching its peak in the 1980s [26,27].

During the 1970s and 1980s, the National Institute of Colonization and Agrarian Reform (INCRA), with the support of national and international banks and (national and international) funding agencies, facilitated the settlement of tens of thousands of families of migrants in Rondônia. The settlement served the dual purpose of supporting the Brazilian Government's Amazon occupation policy to relieve agrarian conflicts in other regions of Brazil, and also to facilitate the integration of the Amazon into Brazilian economic space [10,26,28–30].

This intense process of agricultural colonization was mainly held by small farmers in settlement projects along the state's open road system [24,25]. Inevitably, this process led to profound changes in land cover, especially the conversion of native forest to agricultural land: Rondônia has experienced the third highest percentage reduction of original forest cover in the Brazilian Legal Amazon [31]. This process of configuration/reconfiguration of territory gave rise to regions that specialized in certain production chains, such as the establishment of a grain-producing region in the south of Rondônia [32]. Data from the TerraClass 2008 project confirm such specialization, demonstrating that in 2008 the deforested areas in Rondônia were mainly occupied by pastures (79%), followed by secondary vegetation (16%) and annual (crop-based) agriculture (2%) concentrated in the south of the state [33].

2.2. Metrics to Characterization of Production Systems

In order to perform the regional analysis and further characterize the agricultural production systems, a variety of quantitative metrics (full specifications in Table A1 in Appendix A) were applied at the municipal level. To facilitate analysis and interpretation, these metrics were grouped into four dimensions; (i) agricultural production; (ii) economics; (iii) territorial configuration, and; (iv) social characteristics.

2.2.1. Dimension 1: Agricultural Production

We used data from the survey of municipal agricultural production, coordinated by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) [34] to evaluate agricultural production. Data was retrieved on production of beef and milk cattle, planted area of coffee, and income of the top five annual crops of the state (rice, beans, cassava, corn and soybeans). It should be noted that several other land uses (e.g., annual and perennial crops as well as the economic exploitation of other animals) occur in Rondônia. However, the contribution of cattle (beef and milk) and the above-listed crops represent more than 93% of total agricultural income in the state. For agricultural income, the sum of the value of agricultural production and livestock, available in the literature, was considered [35]. The selected agropastoral activities were present in all municipalities with the exception of soybean production. Although soybean is only grown in 12 out of 52 municipalities, it has a relatively high cultivated area and, where present, makes a significant contribution to the local economy [34,35].

To complement the original IBGE data [34], further metrics were calculated that indicate livestock productivity in relation to pasture area (derived from the TerraClass data) and the number of animals per municipality (data from IBGE). For crops, the financial income generated by each major crop to local agricultural economy was recorded [34], as was the percentage of area occupied by coffee in relation to the total production area of each municipality.

2.2.2. Dimension 2: Economics

2.2.2.1. Gross Domestic Product (GDP)

We used Gross Domestic Product (GDP) as a metric to study the impact and economic contribution of different land uses on the local economy. GDP is the sum of monetary values of all goods and services produced in a given region over a given period. It consists of the gross value added by agricultural activities (Agricultural GDP), the gross value added of industry (Industrial GDP), and gross value added by services (Services GDP).

Municipal GDP data for the years 2000 (T1) and 2010 (T2) were retrieved from the IBGE database [34]. GDP was divided into Agricultural GDP and total GDP for each municipality to

allow calculation of the indirect contributions of the agricultural sector (e.g., sale of fuel, services, etc.). These indirect contributions are not included in the agricultural GDP, but they may be indirectly related to the agricultural production chain and contribute to total GDP.

GDP data is available in the form of an absolute monetary value for the entire municipality. Within each municipality, agricultural production only takes place in deforested areas (the minor exception being timber production or non-timber forest products). Thus, it may be possible to, at least partially, infer the production efficiency of different land use systems by generating new metrics that take into consideration the deforested area of each municipality (GDP per km² deforested and Agricultural GDP per km² deforested). We also estimated the GDP per capita for each municipality and the Agricultural GDP per capita for the rural zone.

2.2.2.2. Agricultural Credit

Brazil's Central Bank produces a statistical yearbook of rural credit which contains information on the number of operations and the resources available for rural credit operations for each Brazilian municipality [36]. Annual data from this dataset were used for the years 2000 to 2010. A statistical relationship was then sought between the amount of credit disbursed and the deforested area at the municipal scale. By dividing the total amount of rural credit in each year by the deforested area in each municipality for that year, we were able to calculate the average value (in R\$) of rural credit per km² deforested.

2.2.2.3. Logistics

To study the relationship between agricultural production and transport infrastructure, data was obtained for the general road network for Rondônia from the Amazon Protection System—SIPAM [37]. We used this data to calculate a metric of municipal road density by dividing the total perimeter of roads in a municipality by the total area of that municipality. We adopted a similar approach to assess hydrographic network: data was retrieved from SIPAM [37] and municipal density of the network was calculated by dividing the total perimeter of the hydrographic network by the total area of the municipality.

2.2.3. Dimension 3: Territorial Configuration

Landscapes are the result of interactions between human societies and the space that surrounds them [38]. Landscape analysis is a way to study the intrinsic spatial heterogeneity within the natural environment [39], revealing territorial configurations. In this study, we apply metrics to allow the description of landscapes' configuration and composition [40]; such metrics have been commonly used to study deforestation and agricultural landscapes [41–44]. These metrics can also be used to identify and quantify spatial heterogeneity, providing a key link between patterns and processes [45]. Three types of territorial configuration data were analyzed: (i) deforested area [31]; (ii) land use distributions [33]; and (iii) environmental conservation units [46].

2.2.3.1. The Amazon Deforestation Monitoring Project (PRODES)

The Amazon Deforestation Monitoring Project (PRODES) [31] has been run by the Brazilian National Institute of Space Research (INPE) since 1988. The project produces annual maps of deforestation in the Brazilian Legal Amazon, and is able to identify deforested areas larger than 6.25 ha. We used these data in their original format of annual deforestation polygons. We also evaluated the full total area deforested, disregarding the date of occurrence.

2.2.3.2. TerraClass

Land use and land cover data are essential for understanding landscape configuration and for revealing the organizational strategies and patterns of agricultural production [47,48]. TerraClass data [33] with a spatial resolution of 30 m allows for both regional level and municipal level analysis

of land use and land cover dynamics. TerraClass 2010 is available and contain the following classes: deforestation up to 2010; crop area (annual); unobserved area; urban area; mining; mosaic occupations; other areas; pasture with exposed soil; clean pasture; “dirty” pasture; regeneration with pasture; reforestation; and secondary vegetation. To study the spatial configuration of these data, the following landscape metrics were calculated: area/perimeter ratio, as an indicator of polygon shape; average area; density of polygons; and density of classes as indicators of landscape fragmentation.

2.2.3.3. Conservation Units

Information on all federal and state conservation units was retrieved from maps provided by the Brazilian Ministry of Environmental [46]. We recorded the percentage of the municipal area designated as a conservation unit.

2.2.4. Dimension 4: Social Characteristics

Socioeconomic development indices can be used as estimators of quality of life, and are relevant in the context of regional socioeconomic development analysis [49], although they should be applied with caution given their many limitations [50]. We used a Municipal Human Development Index (MHDI) and density of people living in poverty (data from the Atlas of Human Development in Brazil [51]) to assess whether the specialization in certain agricultural production systems was associated with social differences between groups of municipalities. We also retrieved data on the total number of inhabitants and the number of inhabitants in the rural zone for each municipality (data from a population estimates conducted by the IBGE [34]), and the areas of settlement projects within each municipality.

Although the MHDI is insufficient to fully capture the level of municipal human development, it does provide a synthetic view of some of the key development issues such as health, education and income [50]. A similar procedure was used for GDP and Agricultural Credit (see Sections 2.2.2.1. and 2.2.2.2.) which were used to create an index to represent the population from the deforested area within each municipality.

We also collected data of the boundaries of settlement projects for agrarian reform, aimed to account for the percentage on the municipality occupied by such projects. Polygons of the settlements were downloaded from the website of the National Institute of Colonization and Agrarian Reform (INCRA), a Brazilian federal agency responsible for agrarian reform and land consolidation [52].

Appendix A provides Table A1 with the assigned name of each metric (metric), a brief description, and the unit of measurement.

3. Metrics and Data Analysis

3.1. Identification of Agricultural Production Systems

Despite having major limitations, GDP is a key indicator of regional economic development [49]. To identify the predominant agricultural production system in each municipality, a metric was created to serve as an indicator of the economic efficiency of land use. This metric was derived from the hypothesis that Agricultural GDP 2010 divided by the deforested area 2010 in each municipality (metric PIBAgroPRD_T2 in Appendix A) can be used to support the identification of agricultural production systems, because different productions systems should result in different economical improvements.

In our initial analysis, we treated PIBAgroPRD_T2 as a dependent variable and, using the 2010 TerraClass data, we performed an exploratory analysis to identify key trends (following [15]). In this exploratory analysis, we perceived that the percentage of clean pasture, dirty pasture and annual agriculture were an important factor for the separation of the municipalities in groups. Using an expert approach, we empirically arbitrate the classification of municipalities based on the proportional area of this land use/land cover classes. The analysis indicated the existence of three main groups: (1) The first group was associated with annual crop activity; (2) The second group with the predominance of “clean pastures”—characteristic of intensive livestock farming; and (3) The third group was associated with “dirty pastures”—characteristic of semi-intensive livestock farming. The identification of metrics

and their value in classifying these three main groups was optimized empirically using specialized literature, empirical knowledge and exploratory analysis of the database, applied in the construction of the decision tree, which was designed from a set of rules defined by the expertise of the authors and other researchers. Its construction was guided by the “rule-based” approach [53].

In Rondônia, as throughout the Brazilian Amazon, there is a clear predominance of cattle pasture for beef production [54–56]. There are also areas characterized by a predominance of small farms, where dairy farming has significant local importance [57–59]. Unfortunately, it is not possible to separate pastures for beef production from those used for milk production using only TerraClass data. However, IBGE publishes annual figures for the size of cattle herds and the number of cows milked for each municipality. These two datasets can be combined to create a new metric that quantifies the relationship between the number of cows milked and the size of the local herd (metric NVacReb_T2 in Appendix A). This metric allowed a new level of the decision tree to be added that was able to distinguish municipalities where dairy farming coexists with beef farming from those where dairy farming is rare or non-existent. Moreover, municipalities with dairy farming could be split between those under semi-intensive production systems and those with intensive production systems.

3.2. Characterization of Agricultural Production Systems

3.2.1. Concentration of Annual Crops and Coffee

Each production system uses different strategies that can be translated into greater or lesser specialization in production. These specializations lead to differences in the degree of concentration in the production of annual and/or perennial crops. Knowing the degree of this concentration thus strengthens the understanding of production systems.

We sought to identify the predominant annual crop by comparing the production value (in 2010; R\$) of five main annual crops (rice, beans, cassava, corn and soybeans). These crops were chosen because they are the most commonly used annual crops in the state [35]. Using data on annual income (in 2010; R\$) for each crop from IBGE’s municipal agricultural research database [34], we calculated the percentage share of the production value for each of the five crops, identifying the culture with the largest financial contribution in each municipality.

Degree of diversification of agricultural activity was calculated based on the percentage share of each crop. Municipalities were classified as “concentrated” where agricultural income was predominantly derived from a single crop. In such concentrated municipalities, the financial importance of the main crop (C_1) accounted for over 67% of the total income generated by the five crops (e.g., the main crop generates more than twice the income of the remaining four crops). In 2010, the average percentage contribution of the first (C_1) and second (C_2) most important crop was 61% and 23%, respectively, which together accounted for 84% of total income. Municipalities were classified as “conjugated” when the main culture contributed less than 67% of total crop income and the sum of the percentages of the first and second culture was greater than 84% (i.e., crop activity was concentrated in two main crops). The remaining municipalities were classified as “diffused,” reflecting that crop income was fairly evenly distributed between three or more crops. This set of rules is summarized in Table 1.

Table 1. Rules to classification degree of concentration crops.

Rules	Class of Concentration	Number of Principal Crops
$C_1 \geq 67\%$	“concentrated”	one crop
$C_1 < 67\%$ and $C_1 + C_2 \geq 84\%$	“conjugated”	two crops
$C_1 + C_2 < 84\%$	“diffused”	three or more crops

Coffee has an historical importance in agricultural production in Rondônia, ever since occupation of the territory in the 1970s [26]. The importance of coffee was estimated as its percentage of land cover in each municipality, calculated as: planted area of coffee [34] divided by the total area occupied by agriculture [33] in each municipality.

3.2.2. Verification of Metrics

We use analysis of variance (ANOVA) to identify differences between the profiles of agricultural production systems at the municipal level based on the metrics used to characterize the four dimensions of these systems (see Appendix A). The average values of these profiles were ordered in order to establish a possible hierarchy (significance level of 5% – $\alpha = 0.05$; LSD test).

4. Results

4.1. Localization of Agricultural Production Systems

We successfully identified various metrics and values to be used as separation criteria in the decision tree. The main criterion branch was based on the land cover of annual crops and livestock rearing. Municipalities with annual crop land cover values above or equal to 10% were classified as belonging to the crop agriculture domain; below this figure they were classified as belonging to the livestock domain. These two domains were then further subdivided.

In the crop agriculture domain, municipalities characterized by less than 30% “clean” pasture were classified as strictly linked to crop agriculture (Dominant Crop Agriculture—DCA). Municipalities where mechanized crop agriculture coexists with substantial pasture areas (where the percentage of “clean” pasture is equal to or greater than 30%) were classified as coexistence zones between crop agriculture and the livestock domain (Coexistence Area—CA).

The livestock domain was subdivided based on presence of more than 60% of “clean” pasture. Municipalities meeting this criterion were characterized as intensive livestock farming. Municipalities with less than 60% of “clean” pasture were classified as semi-intensive livestock farming.

The presence of dairy farming was identified by the percentage of animals milked within the municipal flock. Municipalities with 10% or more milked animals were classified as having a significant presence of dairy farming; below this value they were classified as without a significant presence of dairy farming.

The above classification was applied to both the intensive and semi-intensive livestock systems to generate four groups; (i) intensive livestock farming without significant dairy farming (Intensive Beef—IB); (ii) intensive livestock farming with significant dairy farming (Intensive Beef Milk—IBM); (iii) semi-intensive livestock farming without significant dairy farming (Semi-Intensive Beef—SIB); and (iv) semi-intensive livestock farming with significant dairy farming (Semi-Intensive Beef Milk—SIBM). This decision tree is shown in Figure 1.

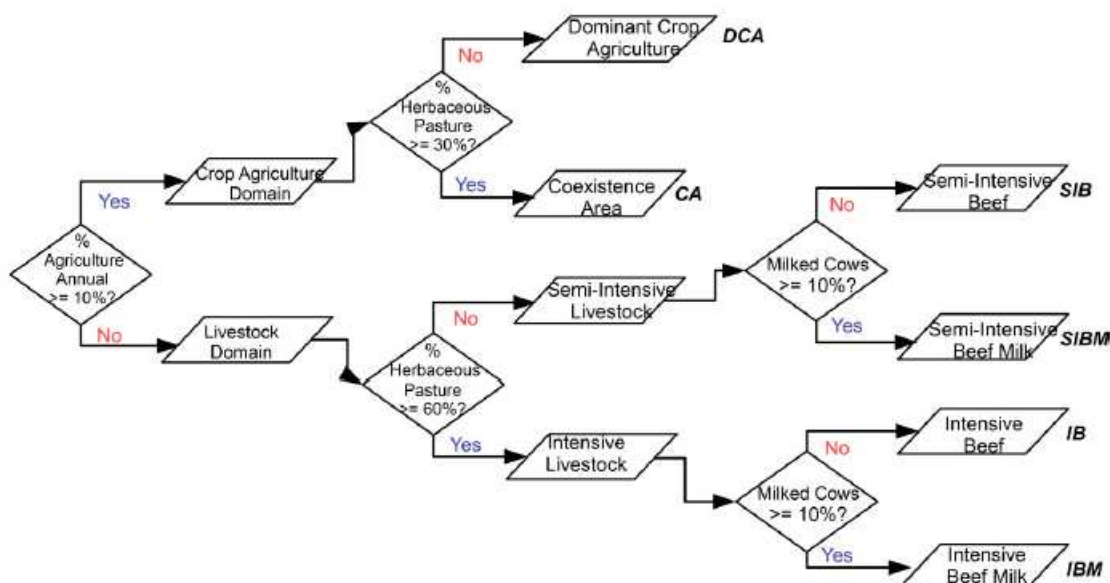


Figure 1. Decision tree to identify municipal agricultural systems in the State of Rondônia.

All the municipalities of Rondônia were classified into agricultural production systems using the decision tree (Figure 2) except from the capital city, Porto Velho, which has unique socioeconomic characteristics that led us to create the special class name *Capital*.

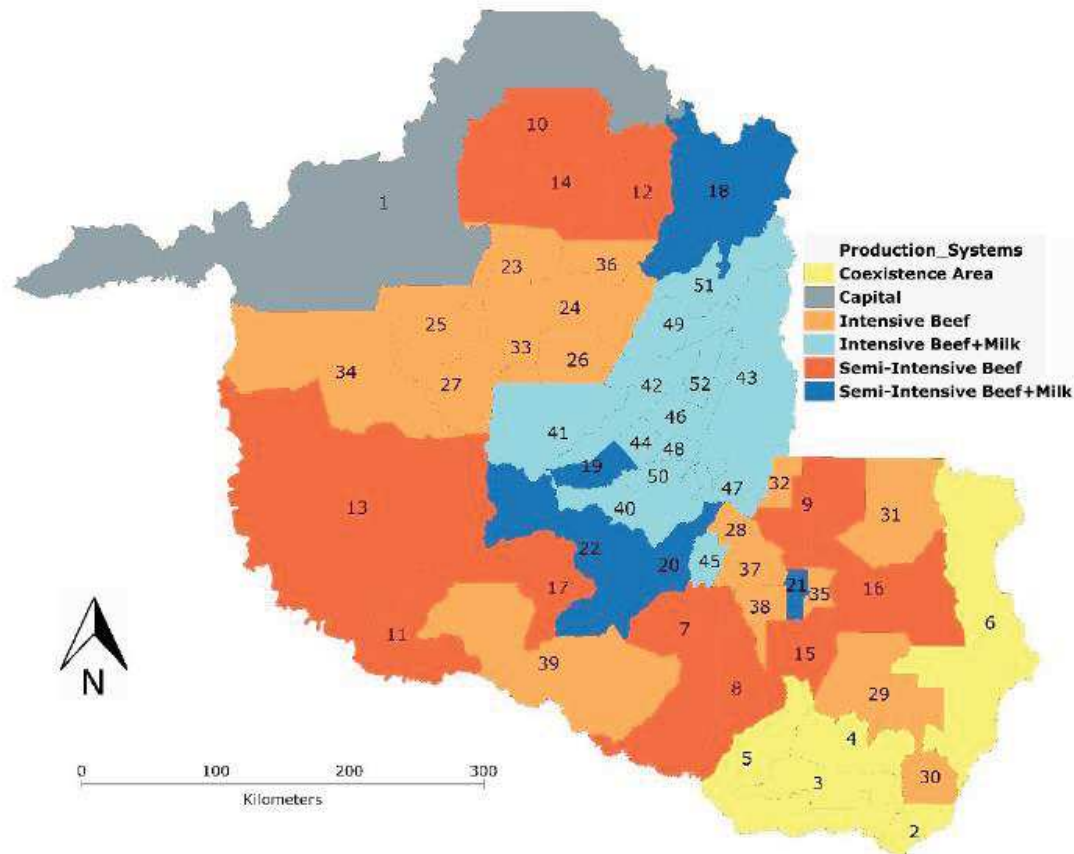


Figure 2. Distribution of agricultural production systems in Rondônia.

The numbers in Figures 2 and 3 represent the municipality name. The names of municipalities can be found in Table 2.

4.2. Characterization of Agricultural Production Systems

4.2.1. Concentration of Annual Crops

Following the methodology described in Section 3.2.1, the degree of concentration of the main five crops' production was identified (Table 2; Figure 3). In total, 18 municipalities were classified as "concentrated," 7 as "conjugated," and 26 as "diffused." "Concentrated" municipalities were mainly located near state boundaries, while soybean (7 municipalities) and corn (6 municipalities) were mainly in the south of the state of respectively, corroborating both the literature [60] and land use data from the TerraClass project [33]. Cassava predominated in all regions of the state, except for the south, and was the main crop in 32 municipalities. Table A2 in the appended material shows the proportional economic contribution of the five major crops for each municipality.

Table 2. Concentration of the five major crops.

Production System	Concentration	Principal Crop	Municipality
CA	"concentrated"	Soybean	Cabixi (2), Cerejeiras (3), Corumbiara (4), Pimenteiras do Oeste (5), Vilhena (6)
	"conjugated"	Cassava	Rio Crespo (36)
		Corn	Espigão D'Oeste (31)
IB	"concentrated"	Cassava	Alto Paraiso (23), Buritis (25), Cacaulândia (26), Nova Mamoré (34)
	"diffused"	Rice	Ariquemes (24), Primavera de Rondônia (35), São Francisco do Guaporé (39)
		Cassava	Campo Novo de Rondônia (27), Castanheiras (28), Ministro Andreazza (32), Montenegro (33), Rolim de Moura (37)
		Corn	Santa Luzia D'Oeste (38)
	"conjugated"	Soybean	Chupinguaia (29), Colorado do Oeste (30)
		Rice	Presidente Medici (47)
IBM	"concentrated"	Corn	Vale do Paraiso (52)
		Cassava	Ji-Paraná (43), Ouro Preto do Oeste (46)
	"diffused"	Cassava	Alvorada D'Oeste (40), Gov. Jorge Teixeira (41), Jaru (42), Nova União (44), Novo Horizonte do Oeste (45), Teixeiraópolis (48), Theobroma (49), Vale do Anari (51)
		Corn	Urupa (50)
	"conjugated"	Cassava	Cacoal (9), Costa Marques (11)
SIB	"concentrated"	Cassava	Candeias do Jamari (10), Cujubim (12), Guajara-Mirim (13), Itapuã do Oeste (14), Pimenta Bueno (16), Seringueiras (17)
	"diffused"	Cassava	Parecis (15)
		Corn	Alta Floresta do Oeste (7), Alto Alegre do Parecis (8)
SIBM	"conjugated"	Rice	São Miguel do Guaporé (22)
	"concentrated"	Cassava	Machadinho D'Oeste (18)
	"diffused"	Rice	São Felipe D'Oeste (21)
		Cassava	Mirante da Serra (19), Nova Brasilândia D'Oeste (20)

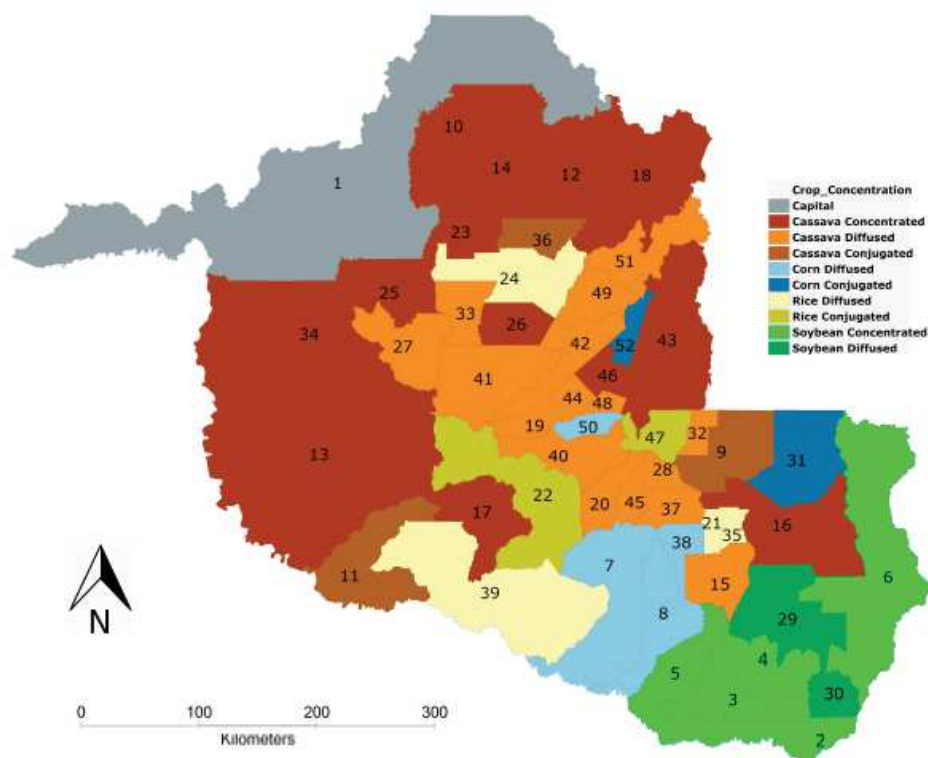


Figure 3. Localization and specialization of the five major crops in Rondônia (see text).

4.2.2. Quantitative Analysis of Production Systems

The methodology applied in this study allowed evaluating the performance of 49 calculated metrics, distributed in four dimensions. This result showed how each production system impacted the territory studied in the agricultural production, economic, territorial configuration and social characteristics. Table 3 shows these results in seven columns. The first shows the dimension and data source according to definitions adopted in Section 2.2. The second column identifies the metric name. The three to seven columns show the mean value of the attributes in production systems CA, IB, IBM, SIB and SIBM. The differences between production systems are shown in ascending order of average values by use of letters, where groups marked with the same letter are not significantly different from each other. Metrics where no production system differed from any other were not marked with letters (see Section 3.2.2).

Table 3. Mean values and statistical significance of metrics of different agricultural production systems.

Dimension	Metric	Agricultural Production System				
		CA	IB	IBM	SIB	SIBM
agricultural production (Section 2.2.1)	AMProp	2.65 (a)	1.24 (b)	0.69 (b)	1.45 (ab)	0.59 (b)
	NbovPast_T2	1.74 (ab)	2.05 (ab)	2.21 (a)	1.62 (b)	1.91 (ab)
	NvacReb_T2	5.49 (c)	5.93 (c)	19.67 (a)	4.87 (c)	15.18 (b)
	AMCafe_T2	50 (c)	2487 (bc)	3043 (abc)	3346 (ab)	7376 (a)
	DACafe_T2	0.04	0.11	2.21	2.66	2.27
economics (Section 2.2.2) <i>PIB (Sections 2.2.2.1.)</i>	PIB_T2	414,322.20	343,418.94	329,017.15	267,644.00	196,971.80
	PIBAgro_T2	98,103.80	87,592.06	72,330.62	80,524.00	75,123.80
	EvPIB_T1T2	292,951.80	246,097.56	222,601.00	211,807.58	145,211.20
	EvPIBAgro_T1T2	72,661.80	67,386.13	49,017.15	68,555.92	59,915.20
	PIBPRD_T2	286.55	184.94	195.06	160.52	201.73
	EvPIBPRD_T1T2	181.39	121.63	125.18	111.32	142.16
	PIBAgroPRD_T2	73.90	53.54	56.13	47.08	81.36
	EvPIBAgroPRD_T1T2	49.86	37.67	36.25	36.33	64.37
	PIBHab_T2	22.21 (a)	15.04 (ab)	12.26 (b)	13.95 (ab)	14.68 (ab)
	EvPIBHab_T1T2	16.71	10.95	8.61	10.26	11.27
economics (Section 2.2.2) <i>agricultural credit (Section 2.2.2.2.)</i>	PIBAgroPopR_T2	34.54 (a)	12.66 (b)	8.44 (b)	13.64 (b)	9.56 (b)
	EvPIBAgroPopR_T1T2	26.51 (a)	10.09 (b)	6.45 (b)	11.56 (b)	8.09 (b)
	NcrAg_T2	397.80	453.65	474.00	458.00	667.20
	NTCrAg_T1T2	4522.00	4582.00	6675.92	5673.55	8361.40
	RsMcrAg_T2	56.13 (a)	30.79 (ab)	29.45 (ab)	31.23 (ab)	12.56 (b)
economics (Section 2.2.2) <i>logistics (Section 2.2.2.3.)</i>	RsCrAgPRD_T2	15.35 (a)	7.38 (b)	10.23 (ab)	6.19 (b)	8.36 (a)
	RsMcrAgPRD_T1T2	8.95 (ab)	4.11 (ab)	4.58 (ab)	3.10 (b)	10.05 (a)
	DEst	7.95	6.97	6.76	15.36	8.59
territorial configuration (Section 2.2.3) <i>PRODES (Section 2.2.3.1.)</i>	DHDr	0.058	0.047	0.061	0.062	0.066
	AMPRD_T1T2 (km ²)	0.220 (a)	0.183 (b)	0.140 (c)	0.179 (b)	0.150 (c)
	APPRD_T1T2	62.02 (a)	60.36 (b)	52.81 (e)	59.41 (c)	55.94 (d)
	DDesf_T2 (%)	41.5 (b)	66.7 (a)	71.4 (a)	32.4 (b)	54.4 (ab)
	DDesf_T1T2 (%)	4.9	10.4	6.3	11.6	8.3
territorial configuration (Section 2.2.3) <i>TerraClass (Section 2.2.3.2.)</i>	TxMDesf_T1aT2 (%)	1.4 (b)	3.0 (a)	3.4 (a)	2.0 (ab)	2.3 (ab)
	AMPTC_T2 (km ²)	0.712	0.651	0.413	0.418	0.360
	APTC_T2	44.67 (a)	42.53 (c)	38.26 (e)	43.42 (b)	40.94 (d)
	DPTC_T2	1.94 (b)	3.17 (ab)	3.40 (a)	2.07 (ab)	3.18 (ab)
	DATCAA_T2	24.12 (a)	1.19 (b)	0.07 (b)	0.72 (b)	0.52 (b)
	DATCMO_T2	0.22 (b)	1.43 (b)	2.33 (ab)	1.58 (b)	6.23 (a)
	DATCPL_T2	45.07 (c)	68.79 (a)	73.52 (a)	52.90 (bc)	56.10 (b)
	DATCPS_T2	6.07 (b)	7.16 (b)	5.55 (b)	13.32 (a)	11.42(ab)
	DATCRP_T2	8.47 (a)	3.01 (b)	2.25 (b)	9.01 (a)	7.30 (a)
DATCVS_T2	13.90	16.37	15.79	19.44	17.72	
territorial configuration (Section 2.2.3) <i>conservation units (Section 2.2.3.3.)</i>	DAUPA (%)	29.1 (ab)	12.2 (b)	16.5 (b)	43.9 (a)	27.9 (ab)
social characteristics (Section 2.2.4)	IDHM_T2	0.67	0.65	0.64	0.63	0.64
	IDHM_T1aT2	0.16	0.17	0.18	0.16	0.18
	DPobre_T2	16.76	19.87	23.33	23.13	26.52
	EvDPobre_T1T2	-17.85	-15.89	-15.83	-16.45	-13.32
	DPass	0.20	0.47	0.52	0.20	0.28
	PopR_T2	3486.00 (b)	7387.81 (ab)	8449.85 (ab)	6695.25 (ab)	9964.40 (a)
	EvPopR_T1T2	-657.80	-1141.31	-2959.54	408.42	-684.60
	PopRPRD_T2	2.62 (c)	4.81 (b)	6.97 (a)	4.24 (b)	8.08 (a)
	EvPopRPRD_T1T2	-0.99 (a)	-2.05 (ab)	-3.36 (bc)	-1.83 (a)	-3.59 (c)
EvPopRPRD_T1T2 (%)	-24.31	-27.37	-32.48	-26.07	-29.06	

5. Discussion

In this section, we discuss the differences between production systems in the context of the four analyzed dimensions.

5.1. Agricultural Production

For areas of coexistence between livestock production and intensive agriculture (CA), the predominant crop was soybean (Figure 4). In contrast, in all other production system-based livestock farming (SIBM, IB, SIB, IBM), cassava was the most important annual crop (Figure 4), thus reflecting its importance as a subsistence crop and its role in providing a supplementary income [57,61].

As with cassava, coffee cultivation predominated in cattle-based production systems (Figure 4), and only 0.04% of the area of municipalities was dominated by coexistence agriculture (CA). The area occupied by coffee was slightly higher in production systems that involve a substantial element of milk production (IBM and SIBM), perhaps indicating a greater compatibility in the production of these basic agricultural products.

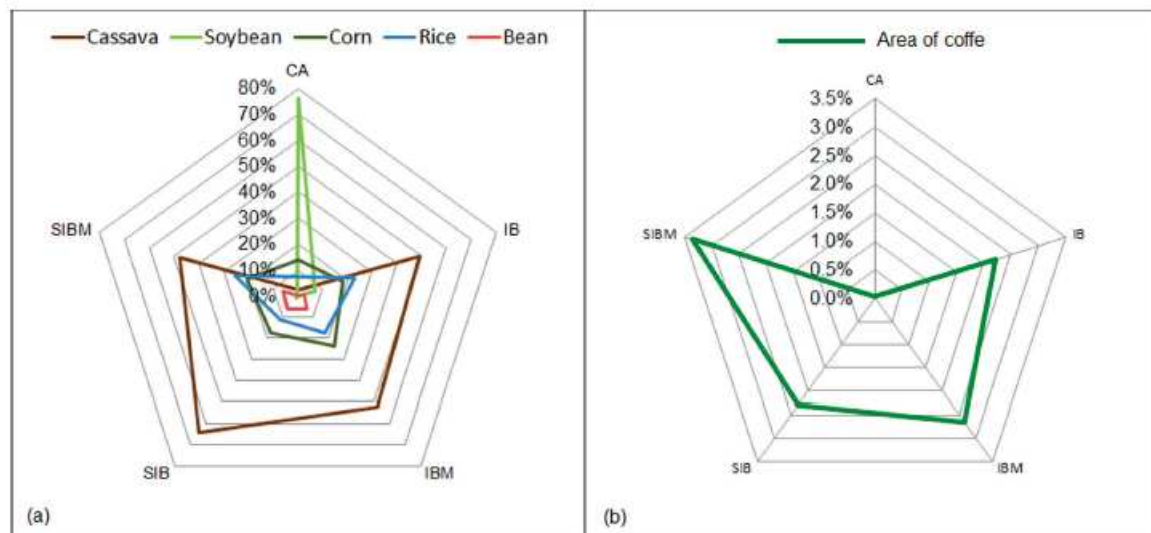


Figure 4. (a) Mean percentage of income generated from each major crop within each production system; (b) Mean percentage of area occupied by coffee in each production system.

The average size of the properties (AMProp) was higher for the CA Production System. This is in line with expectations, as grain crops require investment in larger tracts to increase profitability [62]. The SIB system had the second highest average area of property, probably because traditional livestock farming is characterized by low stocking densities which require extensive areas [63]. Moreover, smallholders use milk production to supplement their income [59]. The number of animals per grazing unit (NbovPast_T2) and the percentage of cows milked (NvacReb_T2) are also consistent with values reported in the literature, showing that municipalities with a predominance of “clean pastures” and dairy farming contribute to the increase in stocking. Indeed, stocking rates are higher than the national average and compatible with evolved technological systems [64,65].

5.2. Economics

GDP measures the economic value of agricultural, industrial and service activities [66]. Although the literature indicates that there is a relationship between GDP derived from agricultural activities and local development [19,67,68], we found no significant differences in average values of economic metrics for municipalities with different production systems, except for Agricultural GDP per capita for rural areas (PIBAgroPopR_T2) and changes in this metric between 2000 and

2010 (EvPIBAgroPopR_T1T2). In both metrics, the CA production system presented significantly higher values. This result supports the analysis of Le Tourneau [69], who demonstrated that highly mechanized production systems tend to have low population density, leading to higher values of GDP per capita.

Large variation in the absolute values of economic metrics linked to the GDP, may be associated with large variation in municipal land area and the size of the municipal population. Another problem is the estimate limitations of agricultural GDP, which may cause underestimates among sectors such as the subsistence economy in rural areas and the informal sector [49]. Regardless of consequences, this high variability contributed to the lack of statistical correlations related to metrics of GDP.

Average value per transaction of agricultural credit (RsMCRag_T2) was highest in the CA production system, probably due to the high proportion of cultivated areas and the increased use of technology (e.g., seed and agricultural inputs with high cost production). The SIBM production system had the lowest value of RsMCRag_T2, indicating that producers of this system when accessing the official agricultural credit, get smaller amounts of resources.

The amount of agricultural credit applied per km² deforested (RsCrAgPRD_T2) was also higher in the CA production system. For livestock systems, there was a difference between systems with and without a significant presence of dairy farming, with higher credit for those with dairy farming, and slightly higher values for intensive systems compared to semi-intensive systems.

Regarding the logistics segment, where we try to infer the degree of accessibility in the predominant production systems, no significant difference has been reported. Part of this result can be attributed to the heterogeneity of the surface extension of the municipalities. Perhaps a new form of consideration in the classification of the “order” of the access segment (rivers and roads), as well as the separate assessment of conservation areas can offer better results.

5.3. Territorial Configuration

Previous studies using deforestation data have demonstrated increased intensification of land use near established agricultural frontiers [70–72], as indicated by increases in local infrastructure and the price of land, or the lack of new areas to deforest. We found higher values for the percentage of deforested area in 2010 (DDesf_T2) for the IB and IBM production systems. These systems have the highest percentage of *clean pasture*, corroborating that a more intensive use of pasture is mainly associated with the lack of new areas for expansion [72]. While production systems SIBM, SIB and CA have the lowest deforestation values, the SIB system has higher levels of “dirty pasture”, i.e., “regenerating pasture” that are indicative of instability to the agricultural frontier. Unlike in IB or IBM land use systems, municipalities with the SIB system also tend to have significant portions of their territory within protected areas (as indicated by the DAPUC metric) that are not subject to legal deforestation. The low value of DDesf_T2 in municipalities with the CA system, where annual crops are of great importance, may be a consequence of the conversion of low quality pastures for grain production systems. However, more data on temporal patterns of land use and land cover are needed to confirm this hypothesis.

In the Amazonian context, variations of the average rate of deforestation between 2000 and 2010 (TxMDesf_T1aT2) are small, and are concentrated in the beginning of the period. Rates were below 1% for all systems between 2009 and 2010, indicating a likely stabilization of deforestation in Rondônia State, since the current control and supervision policies are maintained. There was a higher average rate of deforestation for production systems linked to livestock compared to those linked to crop agriculture. This result supports the argument that intensification of land use has mainly occurred in well-established frontier areas. The change in deforested percentages between 2000 and 2010 (Ddesf_T1aT2) did not differ between production systems, although systems more closely associated with beef cattle had slightly higher values.

There was a lower proportion of protected areas (DAPUC) in municipalities with the IB and IBM production systems, thereby strengthening the association between these systems and the proportion of deforested areas (see above).

The average area in relation to the area/perimeter of "PRODES" polygons (comprising the annual polygons including deforestation before 2000) did not differ within the five production systems. This can be explained by the large aggregation of PRODES data before 2000. Deforestation data were aggregated into a single class containing all (deforested) polygons detected between 1988 and 1997. This aggregation added many polygons and misrepresented the results of the landscape analysis.

When only the polygons of the period from 2000 to 2010 were analyzed, the average area of deforested polygons (AMPRD_T1aT2) was lower in production systems with significant milk production. This result is in accordance with the claim that milk production occurs mainly in small properties that produce small clearings. In contrast, municipalities with the CA production system contain larger polygons, and systems linked to meat production show intermediate values. The value of the ratio area/perimeter of deforested polygons between 2000 and 2010 (APPRD_T1T2) was different in all production systems, following the same trend as for average size of polygons: average value was highest for municipalities with the CA system, followed by systems linked to the production of meat and, finally, systems related to the production of milk.

The average size of TerraClass 2010 polygons (AMPTC_T2) showed no statistical differences between production systems. The mean area/perimeter of TerraClass polygons 2000 to 2010 (APTC_T1T2) showed statistical differences between all systems, with higher values for the CA system, intermediate values for beef-associated systems, and the lowest values for milk-associated systems. These trends follow those for the PRODES data and are consistent with expectations: the polygons in municipalities with the CA system are more regular, presumably due to the high level of mechanization in this production system. Municipalities with milk-associated production systems had lower values, indicating more irregularly shaped polygons associated with a greater reliance on manual labor.

5.4. Social Characteristics

The metrics associated with the human development index (HDI) and density of people living in poverty showed no statistically significant differences between municipalities with different production systems, neither for the 2010 data, nor for the evolution of the HDI between 2000 and 2010. Although quality of life may be associated with agricultural income [67], production systems alone did not seem to strongly influence development metrics.

The rural populations in 2010 (T2) were lower in municipalities with the CA production system, indicating a low level of manpower in areas with a predominance of mechanized agriculture. Conversely, municipalities with milk-associated systems had higher rural populations because of their greater need for manual labor. All production systems showed a decrease in rural population (ranging from -24.31% to -32.48%) in relation to the deforested area between 2000 and 2010 (PopRPRD_T1aT2), thereby indicating a displacement of the rural population during this period even as deforestation and agricultural production increased. Other factors may have contributed to this displacement of the rural population, such as the installation of enormous hydroelectric plants of Jirau and Santo Antonio. Such mega-projects significantly impacted migration and work availability in the region [73,74]. These results are in agreement with results of other studies in the State of Rondônia [7,75].

6. Conclusions

Deforested areas in Rondônia have been converted into a variety of agricultural uses. Using a combination of land use and socioeconomic data, we were able to identify five main production systems associated with mechanized agriculture (CA), livestock farming in semi-intensive (SIB and SIBM) or intensive (IB and IBM) regimes, with or without the presence of dairy farming.

Production systems linked to mechanized agriculture and clean pastures were predominantly found in the consolidated region of the agricultural frontier, while pasture-based systems with “dirty pasture” tended to be located in regions of recent agricultural expansion. Moreover, production systems linked to milk production had a higher rural population. The methodology we adopted, using municipal administrative boundaries as a unit of analysis, was not sufficiently sensitive to detect significant differences in GDP generated by the different production systems. All production systems linked to livestock had stocking rates similar to or better than the national averages. Our landscape analysis indicated that the relationship area/perimeter of PRODES and TerraClass data varied significantly, with higher values in regions with predominantly mechanized agriculture and lower values for regions characterized by beef farming and, especially, milk production. This pattern was also reflected in a gradation in the shape of area polygons, with simpler, more regular forms associated with the CA system and more complex, irregular forms associated with the IBM and SIBM systems.

The results in the dimension territorial configuration were promising, even at the scale of sociopolitical units of municipalities. From these results, the possibility of a landscape analysis with a more detailed level, performed by using cell arrays, is inferred.

The results of this study can serve as a valuable baseline for future studies that utilize predictive models to assess the impact of expansion or contraction of certain production systems. By assessing the consequences of different plausible scenarios of agricultural development, such studies have the potential to provide a robust system for the evaluation of public policies.

Acknowledgments: The authors wish to thank the Coordination for the Improvement of Higher Level Personnel (Capes), for providing scholarships process BEX 6083/13-3, and the Institute of Research for Development through the unit ESPACE_DEV by host of the Ph.D. project of the first author. To Renne Pocard-Chapuis for the constructive comments and suggestions on the manuscript.

Author Contributions: Cláudio Almeida and Moisés Mourão Jr. engaged in case selection, data collection and analysis. The other authors made contributions to the search for relevant case studies; all authors contributed to preparation of the manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

EMBRAPA	Brazilian Agricultural Research Corporation— <i>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária</i> (in Portuguese)
GDP	Gross Domestic Product— <i>Produto Interno Bruto</i>
IBGE	Brazilian Institute of Geography and Statistics— <i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
INCRA	National Institute of Colonization and Agrarian Reform— <i>Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária</i>
INPE	Nacional Institute for Space research— <i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
MHDI	Municipal Human Development Index— <i>Índice de Desenvolvimento Humano Municipal</i> (in portuguese)
PRODES	Project for the Monitoring of Brazilian Amazon Forest by satellite— <i>Projeto de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite</i>
SIPAM	Amazon Protection System— <i>Sistema de proteção da Amazônia</i>
TerraClass	Project for Monitoring the Land Use Land Cover in Brazilian Amazon— <i>Projeto de Monitoramento do Uso e Cobertura da terra na Amazônica Brasileira</i>

Appendix A

Metrics

Table A1 provides the names of the variables analyzed, organized by dimension, and gives a small description of each metric and its respective measurement unit.

Table A1. Metrics adopted and units of measurement.

Dimension	Metric	Description	Unit
agricultural production (Section 2.2.1)	AMProp	Mean area of properties within municipality (total area of properties/ total number of properties)	km ²
	NbovPast_T2	Average capacity of TerraClass (Clean, dirty and regenerating) pastures = Total number of cattle in municipality 2010/ Total number of TerraClass pastures in 2010	Cattle/ha
	NVacReb_T2	Proportion of milk cows within the total cattle population	%
	AMCafe_T2	Mean cultivation area of coffee in the municipality in 2010	ha
	DACafeT2	Percent of deforested area in each municipality cultivated by coffee in 2010	%
economics (Section 2.2.2) PIB (Section 2.2.2.1.)	PIB_T2	Municipal GDP in 2010	R\$ × 1000
	PIBAgro_T2	Municipal GDP for agricultural sector in 2010	R\$ × 1000
	EvPIB_T1T2	Evolution of GDP (2000 to 2010) = GDP 2010 – GDP 2000	R\$ × 1000
	EvPIBAgro_T1T2	Evolution of agricultural GDP (2000 to 2010) = agricultural GDP 2010 – agricultural GDP 2000	R\$ × 1000
	PIBPRD_T2	Relationship between GDP in 2010 and mean deforestation from PRODES in 2010	R\$ × 1000/km ² PRODES
	EvPIBPRD_T1T2	Evolution of PIBPRD between 2000 and 2010 = PIBPRD_T2 – PIBPRD_T1	R\$ × 1000/km ² PRODES
	PIBAgroPRD_T2	Relationship between agricultural GDP in 2010 de 2010 and mean deforestation from PRODES in 2010	R\$ × 1000/km ² PRODES
	EvPIBAgroPRD_T1T2	Evolution of PIBAgroPRD between 2000 and 2010. = PIBAgroPRD_T2 – PIBAgroPRD_T1	R\$ × 1000/km ² PRODES
	PIBHab_T2	Relationship between GDP 2010 and human population of municipality	R\$ × 1000/hab.
	EvPIBHab_T1T2	Evolution of the relationship between GDP and human population of municipality 2000–2010	R\$ × 1000/hab.
economics (Section 2.2.2) agricultural credit (Section 2.2.2.2.)	NcrAg_2010	Mean number of agricultural credit operations in municipality in 2010	Unit
	NTCrAg_T1T2	Mean number of agricultural credit operations in municipality 2000–2010	Unit
	RsmCrAg_T2	Mean value of agricultural credit operations in municipality in 2010	R\$ × 1000
	RsmCrAgPRD_T2	Relationship between total agricultural credit in 2010 and mean deforestation up to 2010 from PRODES	R\$ × 1000/km ² Deforest.
	RsmCrAgPRD_T1T2	Relationship between total agricultural credit in 2010 and mean deforestation between 2000 and 2010 from PRODES	R\$ × 1000/km ² Deforet.
economics (Section 2.2.2) Logística (Section 2.2.2.3.)	DEst	Relationship between the total perimeter of roads and the total municipal area	km/km ²
	DHdr	Total perimeter of polygons and vectors for hydrography of municipality/ total area of municipality	km/km ²
territorial configuration (Section 2.2.3) PRODES (Section 2.2.3.1.)	AMPRD_T1T2	Mean area of PRODES polygons 2000–2010	km ²
	APPRD_T1T2	Area/Perimeter of PRODES polygons 2000–2010	-
	DDesf_T2	% deforestation in municipality from PRODES for 2010	%
	DDesf_T1T2	Evolution of % deforestation in municipality from PRODES between 2000 and 2010 = DdesfT2 – DdesfT1	%
	TxMDesf_T1T2	Mean rate of annual deforestation 2001–2010 from PRODES.	%

Table A1. Cont.

Dimension	Metric	Description	Unit
territorial configuration (Section 2.2.3) <i>TerraClass (Section 2.2.3.2.)</i>	AMPTC_T2	Mean area of TerraClass 2010 polygons	km ²
	APTC_T2	Area/Perimeter of TerraClass 2010 polygons	-
	DPTC_T2	Density of TerraClass 2010 polygons	poligons/km ²
	DATCAA_T2	Density of annual crop class from TerraClass 2010	%
	DATCMO_T2	Density of mosaic occupation class from TerraClass 2010	%
	DATCPL_T2	Density of clean pasture class from TerraClass 2010	%
	DATCPS_T2	Density of dirty pasture class from TerraClass 2010	%
	DATCRP_T2	Density of regenerating pasture class from TerraClass 2010	%
territorial configuration (Section 2.2.3) <i>Unidades Conservação Ambiental (Section 2.2.3.3.)</i>	DATCVS_T2	Density of secondary vegetation class from TerraClass 2010	%
	DAUPA	% area of conservation units within municipality	%
Social characteristics (Section 2.2.4)	IDHM_T2	Human development index (HDI) for 2010, composed of three dimensions of human development: longevity, education and income	Index (0 to 1)
	IDHM_T1aT2	Evolution of municipal HDI between 2000–2010	Index (0 to 1)
	DPobre_T2	% of adults with an income equal to or below R\$14,000 per month in August 2010	% of municipal population
	EvDPobre_T1T2	Change in % of people living under poverty between 2000 and 2010	% of municipal population
	DPAss	% municipal area occupied by settlement projects	%
	PopR_T2	Population of the rural zone (demographic census 2010)	Unit
	EvPopR_T1T2	Change in population in rural zone 2000–2010	Unit
	PopRPRD_T2	Relationship between population of the rural zone and mean deforestation to 2010 from PRODES	inhabitants /km ² Deforest.
	EvPopRPRD_T1T2	Change in relationship between population of the rural zone and deforested from PRODES data, areas between 2000 and 2010	inhabitants /km ² Deforest.
EvPopRPRD_T1T2 (%)	% change in relationship between population of the rural zone in 2010 and mean deforestation from PRODES until 2010	%	

Table A2 provides the proportional economic contribution of the five major crops' unit, and the classification of crop concentration in each municipality.

Table A2. Proportional economic contribution of the five major crops.

Municipality	Production System	% Economic Contribution					Concentration	Principal Crop
		Rice	Beans	Cassava	Corn	Soybean		
Cabixi	CA	4%	0%	4%	13%	79%	"conjugated"	Soybean
Cerejeiras		11%	0%	2%	20%	67%	"concentrated"	Soybean
Corumbiara		12%	0%	3%	11%	74%	"concentrated"	Soybean
Pimenteiras do Oeste		7%	0%	1%	2%	90%	"concentrated"	Soybean
Vilhena		3%	0%	1%	25%	71%	"concentrated"	Soybean
Rio Crespo	IB	40%	1%	50%	8%	1%	"conjugated"	Cassava
Espigão D'Oeste		14%	1%	42%	43%	0%	"conjugated"	Corn
Alto Paraiso		11%	1%	85%	3%	0%	"concentrated"	Cassava
Buritis		6%	2%	76%	15%	0%	"concentrated"	Cassava
Cacaulândia		1%	0%	96%	4%	0%	"concentrated"	Cassava
Nova Mamoré		1%	1%	91%	7%	0%	"concentrated"	Cassava
Ariquemes		44%	2%	26%	18%	10%	"diffused"	Rice
Primavera de Rondônia		48%	1%	33%	18%	0%	"diffused"	Rice
São Francisco do Guaporé		41%	0%	31%	28%	0%	"diffused"	Rice
Campo Novo de Rondônia		26%	3%	42%	29%	0%	"diffused"	Cassava
Castanheiras		28%	0%	56%	16%	0%	"diffused"	Cassava
Ministro Andreazza		12%	5%	62%	21%	0%	"diffused"	Cassava
Montenegro		30%	4%	43%	24%	0%	"diffused"	Cassava
Rolim de Moura		19%	7%	53%	21%	0%	"diffused"	Cassava
Santa Luzia D'Oeste		21%	15%	29%	35%	0%	"diffused"	Corn
Chupinguaia		18%	0%	3%	14%	65%	"diffused"	Soybean
Colorado do Oeste		29%	1%	19%	8%	44%	"diffused"	Soybean

Table A2. Cont.

Municipality	Production System	% Economic Contribution					Concentration	Principal Crop
		Rice	Beans	Cassava	Corn	Soybean		
Presidente Medici		46%	1%	42%	11%	0%	"conjugated"	Rice
Vale do Paraíso		6%	3%	24%	67%	0%	"conjugated"	Corn
Ji-Paraná		2%	1%	83%	14%	0%	"concentrated"	Cassava
Ouro Preto do Oeste		2%	1%	92%	6%	0%	"concentrated"	Cassava
Alvorada D'Oeste		38%	3%	39%	19%	0%	"diffused"	Cassava
Gov. Jorge Teixeira		8%	24%	45%	23%	0%	"diffused"	Cassava
Jaru	IBM	11%	12%	61%	16%	0%	"diffused"	Cassava
Nova União		12%	13%	56%	18%	0%	"diffused"	Cassava
Novo Horizonte do Oeste		34%	6%	38%	22%	0%	"diffused"	Cassava
Teixeirópolis		14%	3%	49%	35%	0%	"diffused"	Cassava
Theobroma		20%	3%	55%	22%	0%	"diffused"	Cassava
Vale do Anari		24%	2%	58%	17%	0%	"diffused"	Cassava
Urupa		9%	10%	39%	42%	0%	"diffused"	Corn
Cacoal		13%	2%	58%	27%	0%	"conjugated"	Cassava
Costa Marques		24%	2%	66%	8%	0%	"conjugated"	Cassava
Candeias do Jamari		4%	0%	95%	1%	0%	"concentrated"	Cassava
Cujubim		14%	5%	77%	5%	0%	"concentrated"	Cassava
Gujara-Mirim		1%	0%	93%	5%	0%	"concentrated"	Cassava
Itapuã do Oeste	SIB	12%	4%	72%	3%	9%	"concentrated"	Cassava
Pimenta Bueno		10%	0%	80%	9%	0%	"concentrated"	Cassava
Seringueiras		15%	1%	74%	9%	0%	"concentrated"	Cassava
Parecis		14%	3%	46%	37%	0%	"diffused"	Cassava
Alta Floresta do Oeste		7%	27%	20%	46%	0%	"diffused"	Corn
Alto Alegre do Parecis		10%	24%	26%	40%	0%	"diffused"	Corn
São Miguel do Guaporé		44%	1%	43%	11%	0%	"conjugated"	Rice
Machadinho D'Oeste		10%	3%	76%	12%	0%	"concentrated"	Cassava
São Felipe D'Oeste	SIBM	41%	13%	8%	38%	0%	"diffused"	Rice
Mirante da Serra		15%	8%	51%	26%	0%	"diffused"	Cassava
Nova Brasilândia D'Oeste		18%	5%	62%	16%	0%	"diffused"	Cassava

References

1. Droulers, M. *L'Amazonie Vers un Développement Durable*, 1st ed.; Armand Colin: Paris, France, 2004.
2. Becker, B.K. *Amazônia: Geopolítica na Virada do III Milênio*; Editora Garamond: Rio de Janeiro, Brazil, 2004.
3. Becker, B.K. A Amazônia e a política ambiental brasileira. *Geografia* **2004**, *6*, 7–20.
4. Aguiar, A.P.D.; Câmara, G.; Escada, M.I.S. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity. *Ecol. Model.* **2007**, *209*, 169–188. [CrossRef]
5. Richards, P.D.; Walker, R.T.; Arima, E.Y. Spatially complex land change: The Indirect effect of Brazil's agricultural sector on land use in Amazonia. *Glob. Environ. Chang.* **2014**, *29*, 1–9. [CrossRef] [PubMed]
6. Brondizio, E.S.; Moran, E.F. Human dimensions of climate change: The vulnerability of small farmers in the Amazon. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* **2008**, *363*, 1803–1809. [CrossRef] [PubMed]
7. Browder, J.O.; Pedlowski, M.A.; Walker, R.; Wynne, R.H.; Summers, P.M.; Abad, A.; Becerra-Cordoba, N.; Mil-Homens, J. Revisiting theories of frontier expansion in the Brazilian amazon: A survey of the colonist farming population in Rondônia's post-frontier, 1992–2002. *World Dev.* **2008**, *36*, 1469–1492. [CrossRef]
8. De Assis Costal, F. Mercado e produção de terras na Amazônia: Avaliação referida a trajetórias tecnológicas. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi Ciênc. Hum.* **2010**, *5*, 25–39.
9. Santos Junior, R.A.O.; Costa, F.D.A.; Aguiar, A.P.D.; de Toledo, P.M.; Vieira, I.C.G.; Câmara, G. Desmatamento, trajetórias tecnológicas e metas de contenção de emissões na Amazônia. *Cienc. Cult.* **2010**, *62*, 56–59.
10. De Mello, N.A.; Théry, H. L'État brésilien et l'environnement en Amazonie: Évolutions, contradictions et conflits. *L'esp. Géogr.* **2003**, *32*, 3–20.
11. Perz, S.G. The effects of household asset endowments on agricultural diversity among frontier colonists in the Amazon. *Agrofor. Syst.* **2005**, *63*, 263–279. [CrossRef]
12. Williams, K.J.H.; Schirmer, J. Understanding the relationship between social change and its impacts: The experience of rural land use change in south-eastern Australia. *J. Rural Stud.* **2012**, *28*, 538–548. [CrossRef]
13. Woods, M. Rural geography III: Rural futures and the future of rural geography. *Prog. Hum. Geogr.* **2012**, *36*, 125–134. [CrossRef]

14. Li, Y.; Long, H.; Liu, Y. Spatio-temporal pattern of China's rural development: A rurality index perspective. *J. Rural Stud.* **2015**, *38*, 12–26. [CrossRef]
15. Anselin, L.; Sridharan, S.; Gholston, S. Using exploratory spatial data analysis to leverage social indicator databases: The discovery of interesting patterns. *Soc. Indic. Res.* **2007**, *82*, 287–309. [CrossRef]
16. Grigg, D. *An introduction to Agricultural Geography*, 2nd ed.; Routledge: London, UK, 2003.
17. Pacione, M. *Progress in Agricultural Geography*, 1st ed.; Routledge: New York, NY, USA, 2013.
18. Pecqueur, B. Esquisse d' une géographie économique territoriale. *L'Espace. Géogr.* **2014**, *43*, 198–214.
19. De Souza, E.C.; da Silva, G.J.C. Dinâmica espacial e formação de clusters significativos no setor agropecuário de Minas Gerais. *Rev. Econ. Tecnol.* **2012**, *6*, 107–116. [CrossRef]
20. Soler, L.S.; Verburg, P.H. Combining remote sensing and household level data for regional scale analysis of land cover change in the Brazilian Amazon. *Reg. Environ. Chang.* **2010**, *10*, 371–386. [CrossRef]
21. Espindola, G.M.; de Aguiar, A.P.D.; Pebesma, E.; Câmara, G.; Fonseca, L. Agricultural land use dynamics in the Brazilian Amazon based on remote sensing and census data. *Appl. Geogr.* **2012**, *32*, 240–252. [CrossRef]
22. Helfand, S.M.; Moreira, A.R.B.; Figueiredo, A.M.R. Explicando as diferenças de pobreza entre produtores agrícolas no Brasil: Simulações contrafactuais com o censo agropecuário 1995–1996. *Rev. Econ. Sociol. Rural* **2011**, *49*, 391–418. [CrossRef]
23. Southworth, J.; Munroe, D.; Nagendra, H. Land cover change and landscape fragmentation—Comparing the utility of continuous and discrete analyses for a western Honduras region. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2004**, *101*, 185–205. [CrossRef]
24. Becker, B.K. *Amazônia*; Editora Ática: São Paulo, Brazil, 1990.
25. Théry, H. Routes et déboisement en Amazonie brésilienne, Rondônia 1974–1996. *Mappemonde* **1997**, *97*, 35–40.
26. Théry, H. *Rondônia, Mutations d'un Territoire Fédéral en Amazonie Brésilienne*; Université Panthéon-Sorbonne—Paris I: Paris, France, 1976.
27. Coy, M. Desenvolvimento regional na periferia amazônica: Organização do espaço, conflitos de interesses e programas de planejamento dentro de uma região de 'fronteira': O caso de Rondônia. In *Fronteiras*; Editora Universidade de Brasília: Brasília, Brazil, 1988; pp. 167–194.
28. Théry, H. Situações da Amazônia no Brasil e no continente. *Estud. Av.* **2005**, *19*, 37–49. [CrossRef]
29. Xavier, A.D.S. *Fronts Pionniers D'amazonie, Les Dynamiques Paysannes au Brésil*, 1st ed.; CNRS Editions: Paris, France, 2006.
30. Fiori, M.F.; Fiori, L.E.; Nenevé, M. Colonização agrícola de Rondônia e (não) obrigatoriedade de desmatamento como garantia de posse sobre a propriedade rural. *Novos Cad. Naea* **2013**, *16*, 9–22. [CrossRef]
31. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Projeto PRODES—Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite. 2015. Available online: <http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodesmunicipal.php> (accessed on 12 August 2015).
32. Da Coata Silva, R.G. A regionalização do agronegócio da soja em Rondônia. *GEOUSP Espaç. Tempo (Online)* **2014**, *18*, 298–312. [CrossRef]
33. De Almeida, C.A.; Coutinho, A.C.; Esquerdo, J.C.D.M.; Adami, M.; Venturieri, A.; Diniz, C.G.; Dessay, N.; Durieux, L.; Gomes, A.R. High spatial resolution land use and land cover mapping of the 1 Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. *Acta Amaz.* **2016**, *46*, 291–302.
34. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). IBGE Cidades@. 2012. Available online: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php> (accessed on 27 May 2012).
35. Tsunehiro, A.; Coelho, P.J.; Miura, M. Valor da produção agropecuária no Brasil, por unidade da federação em 2008. *Rev. Inf. Econ.* **2010**, *40*, 62–79.
36. Bacen. Anuário Estatístico do Crédito Rural. 2015. Available online: <http://www.bcb.gov.br/?RELRURAL> (accessed on 19 February 2015).
37. Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM). Malha Viária Geral do Estado de Rondônia. 2010. Available online: <http://www.metadados.inde.gov.br/geonetwork/srv/por/metadados.show?id=17627&currTab=simple> (accessed on 23 February 2015).
38. Naveh, Z. From biodiversity to ecodiversity: A landscape-ecology approach to conservation and restoration. *Restor. Ecol.* **1994**, *2*, 180–189. [CrossRef]
39. Wiens, J.A. What is landscape ecology, really? *Landsc. Ecol.* **1992**, *7*, 149–150. [CrossRef]
40. Cruz, C.; Madureira, H.; Marques, J. Análise espacial e estudo da fragmentação da Paisagem da Aboboreira. *Rev. Geogr. Ordenam. Territ.* **2013**, *1*, 57–82. [CrossRef]

41. Carrão, H.M.S.; Caetano, M.; Neves, N. LANDIC—Cálculo de indicadores de paisagem em ambiente SIG. In Proceedings of Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica—ESIG 2001, Oeiras, Portugal, 28–30 November 2001.
42. Pereira, J.L.G.; Batista, G.T.; Thalès, M.C.; Roberts, D.A.; Venturieri, A. Métricas da paisagem na caracterização da evolução da ocupação da Amazônia. *Geografia* 2001, 26, 59–90.
43. Johan, O.; Xavier, A.D.S.; Thibaud, D.; Valery, G.; Michel, G.; Antoine, L.; Rennes, U.; Moal, L.; Letg, U.M.R.; Cnrs, U.M.R.; et al. Utilisation de la télédétection et de données socio-économiques et écologiques pour comprendre l'impact des dynamiques de l'occupation des sols a Pacajà (Brésil). *Rev. Fr. Photogramm. Télédétec.* 2012, 198–199, 8–24.
44. Ziolkowski, D.; Turlej, K.; Bochenek, Z. Indicators of landscape diversity derived from remote sensing based land cover maps—Spatial and thematic aspects. *Ecol. Quest.* 2013, 17, 113–129. [CrossRef]
45. Gustafson, E. Quantifying landscape spatial pattern: What is the state of the art? *Ecosystems* 1998, 1, 143–156. [CrossRef]
46. Ministério do Meio Ambiente. Cadastro Nacional de Unidade de Conservação. 2015. Available online: <http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs/dados-georreferenciados> (accessed on 18 May 2016).
47. Ceron, A.O.; de Oliveira Girardi, L.H. Geografia agrária e metodologia de pesquisa/agrarian geography and research methodology. *CAMPO-TERRITÓRIO Rev. Geogr. Agrár.* 2007, 2, 4–16.
48. Coelho, V.H.R.; Montenegro, S.M.G.L.; de Almeida, C.N.; de Lima, E.R.V.; Neto, A.R.; de Moura, G.S.S. Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* 2014, 18, 64–72. [CrossRef]
49. Siedenberg, D.R. Indicadores de desenvolvimento socioeconômico. *Desenvolv. Quest.* 2003, 1, 45–71.
50. Jannuzzi, P.D.M. Considerações sobre o uso, mau uso e abuso dos indicadores sociais na formulação e avaliação de políticas públicas municipais. *Rev. Adm. Pública* 2002, 36, 51–72.
51. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD); Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA); Fundação João Pinheiro. O Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil. 2015. Available online: http://www.atlasbrasil.org.br/2013/pt/o_atlas/o_atlas/ (accessed on 19 February 2015).
52. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). Acervo Fundiário. *Acervo Fundiário I3Geo*; 2015. Available online: <http://acervofundiario.incra.gov.br/i3geo/interface/incra.html?63t9hg62kbb1eulgspj2ue5ui6> (accessed on 23 February 2015).
53. Ligêza, A. Logical foundations for rule-based systems. In *Logical Foundations for Rule-Based Systems*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2006; pp. 191–198.
54. Geist, H.J.; Lambin, E.F. *What Drives Tropical Deforestation?*; LUCC Report Series, No 4; LUCC International Project Office: Louvain-la-Neuve, Belgium, 2001.
55. Margulis, S. *Causes of Deforestation of the Brazilian Amazon*; The World Bank: Washington, DC, USA, 2003.
56. Godar, J.; Gardner, T.A.; Tizado, E.J.; Pacheco, P. Actor-specific contributions to the deforestation slowdown in the Brazilian Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2014, 111, 15591–15596. [CrossRef] [PubMed]
57. Chomitz, K.M.; Thomas, T.S. *Geographic Patterns of Land Use and Land Intensity in the Brazilian Amazon*; World Bank Policy Research Working Paper No. 2687; The World Bank: New York, NY, USA, 2001.
58. Agência de Defesa Sanitária Agrosilvopastoril do Estado de Rondônia (IDARON). Levantamento de Dados Sobre a Produção de Leite em Rondônia. 2013. Available online: http://www.idaron.ro.gov.br/Multimedia/downloads/docs/Producao_de_leite_em_Rondonia-divulgacao.pdf (accessed on 19 February 2015).
59. Soler, L.D.S.; Verburg, P.H.; Alves, D. Evolution of land use in the Brazilian Amazon: From frontier expansion to market chain dynamics. *Land* 2014, 3, 981–1014. [CrossRef]
60. Da Costa Silva, R.G. Amazônia globalizada: Da fronteira agrícola ao território do agronegócio—O exemplo de Rondônia. *Confins* 2015, 23. [CrossRef]
61. Hurtienne, T.P. Agricultura familiar e desenvolvimento rural sustentável na Amazônia. *Novos Cad. Naea* 2005, 8, 19–71. [CrossRef]
62. Becker, B.K. Reflexões sobre a Geopolítica e a logística da soja na Amazônia. In *Dimensões Humanas da Biosfera-Atmosfera na Amazônia*; Edusp: São Paulo, Brazil, 2007; p. 176.
63. Simon, M.F.; Garagorry, F.L. The expansion of agriculture in the Brazilian Amazon. *Environ. Conserv.* 2006, 32, 203–212. [CrossRef]
64. Euclides, V.P.B. Produção intensiva de carne bovina em pasto. *Simp. Prod. Gado Corte* 2001, 2, 55–82.

65. Oliveira, R.L.; de Freitas Barbosa, M.A.A.; Ladeira, M.M.; da Silva, M.M.P.; Ziviani, A.C.; Bagaldo, A.R. Nutrição e manejo de bovinos de corte na fase de cria. *Rev. Bras. Saúde Prod. Anim.* **2006**, *7*, 57–86.
66. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Série Relatórios Metodológicos. Produto Interno Bruto dos Municípios*; IBGE: Rio de Janeiro, Brazil, 2004.
67. Bonelli, R. *Impactos Econômicos e Sociais de Longo Prazo da Expansão Agropecuária no Brasil: Revolução Invisível e Inclusão Social*; Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada: Rio de Janeiro, Brazil, 2001.
68. De Janvry, A.; Sadoulet, E. Agricultural growth and poverty reduction: Additional evidence. *World Bank Res. Obs.* **2010**, *25*, 1–20. [[CrossRef](#)]
69. Le Tourneau, F. La distribution du peuplement en Amazonie brésilienne: L'apport des données par secteur de recensement contexte pionnier de l'Amazonie brésilienne, et nous proposons quelques La représentation de la population en Amazonie et ses enjeux. *L'esp. Géogr.* **2009**, *38*, 359–375.
70. Alves, D.S.; Escada, M.I.S.; Pereira, J.L.G.; de Albuquerque Linhares, C. Land use intensification and abandonment in Rondônia, Brazilian Amazônia. *Int. J. Remote Sens.* **2003**, *24*, 899–903. [[CrossRef](#)]
71. Soler, L.D.S.; Escada, M.I.S.; Verburg, P.H. Quantifying deforestation and secondary forest determinants for different spatial extents in an Amazonian colonization frontier (Rondonia). *Appl. Geogr.* **2009**, *29*, 182–193. [[CrossRef](#)]
72. Vale, P.M.; Andrade, D.C. Comer carne salva a Amazônia? A produtividade da pecuária em Rondônia e sua relação com o desmatamento. *Estud. Soc. Agric.* **2012**, *20*, 381–408.
73. Bermann, C. Impasses e controvérsias da hidreletricidade. *Estud. Av.* **2007**, *21*, 139–153. [[CrossRef](#)]
74. Tilt, B.; Braun, Y.; He, D. Social impacts of large dam projects: A comparison of international case studies and implications for best practice. *J. Environ. Manag.* **2009**, *90*, S249–S257. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
75. Browder, J.O.; Pedlowski, M.A.; Summers, P.M. Land use patterns in the Brazilian Amazon: Comparative farm-level evidence from Rondônia. *Hum. Ecol.* **2004**, *32*, 197–224. [[CrossRef](#)]



© 2016 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

4 DETERMINATION DE L'EMPRENTE PAYSAGERE DES SYSTEMES DE PRODUCTION AGROPASTORAUX DE L'ETAD DU RONDONIA

Contexte

Le chapitre précédent a montré que les systèmes de production agropastoraux reflètent différentes configurations territoriales. Dans ce chapitre nous avons affiné cette échelle de résolution spatiale et proposé une méthodologie capable d'une part de distinguer les différents systèmes de production agropastoraux et d'autre part de déterminer une empreinte paysagère des systèmes de production agropastoraux à l'échelle d'une cellule de 10 x 10 km pour l'ensemble de l'état du Rondônia.

Données, méthodologie

Les données d'occupation et d'usage du sol (TerraClass) produites à une résolution de 30m ont été utilisées pour calculer la prédominance des types d'occupation du sol. Les données de déforestation (PRODES) ont permis de calculer la densité et la superficie des polygones déforestée. Les matrices de distance ont été créées à partir de la géolocalisation des industries laitières²⁰, routes et abattoirs.

Parce que l'échelle de travail est un facteur très important dans l'analyse des métriques du paysage (Lausch and Herzog 2002; Šímová and Gdulová 2012), l'ensemble de données décrit dans le paragraphe précédent, a été croisée avec une grille régulière à deux dimensions de cellule : 25 x 25 km et 10 x 10 km. Cette dernière dimension d'analyse a été retenue pour calculer les valeurs d'attributs indiqués dans le tableau 4 pour chaque cellule. Cet ensemble d'attributs permet d'analyser la diversité, la forme, la taille et, la concentration entre les autres paramètres. Il répond aux principales métriques susceptibles de permettre la caractérisation du paysage (Riitters et al. 1995; DGAGRI, Eurostat, and Ispra 2000; Carrão, Caetano, and Neves 2001).

²⁰ Industrie laitière : toute installation réceptionnant du lait cru en vue de sa transformation industrielle, telles que les industries de produits lactés, les coopératives de produits lactés et apparentés.

Tableau 4 - Métriques adoptées et unités de mesure (niveau cellulaire)

Source	Attributs	Description	Unités
PRODES	PFO	% d'origine de la forêt dans une cellule	%
	PD_97	% de la déforestation dans une cellule en 1997	%
	PD_T2	% de la déforestation dans une cellule en 2010	%
	TMD_T1T2	Taux moyen de déforestation annuel de 2001 à 2010	%
	IMPRD_T2	Age moyen de la déforestation en 2010	ans
	APPRD_T1T2	Valeur moyenne de la relation Aire/Périmètre de déforestation annuelle de 2001 à 2010	unité
	NPPRD2_km2	Densité de polygones de déforestation en 2010 par km ²	unité / km ²
	AMPRD_T1T2	Surface moyenne des polygones de déforestation 2001-2010	m ²
TerraClass	ATTCP_T2	Surface totale TerraClass Production ²¹ 2010	m ²
	PTCP_T2	% de la surface totale TerraClass 2010 occupée par TerraClass Production	%
	PAATC_T2	% de la surface totale TerraClass 2010 occupée par la classe agriculture annuelle	%
	PMOTC_T2	% de la surface totale TerraClass 2010 occupée par la classe mosaïque d'occupation du sol	%
	PPLTC_T2	% de la surface totale TerraClass 2010 occupée par la classe Pâturage "bien entretenu"	%
	PPSTC_T2	% de la surface totale TerraClass 2010 occupée par la classe Pâturage "embroussaillé"	%
	PRPTC_T2	% de la surface totale TerraClass 2010 occupée par la classe pâturage en voie de régénération	%
	PVSTC_T2	% de la surface totale TerraClass 2010 occupée par la classe végétation secondaire	%
	PPTC_T2	% de la surface totale TerraClass 2010 occupée par la classe Pâturage	%
	IPPL_T2	Indice de Pâturage "bien entretenu"	0.536(a)
	APTCP_T2	Valeur moyenne du rapport Aire/Périmètre de TerraClass Production	unité
	NPTCPT2_km2	Densité de polygones TerraClass Production 2010 par km ²	unité / km ²
	NCTCP_T2	Nombre de classe TerraClass Production 2010 dans la cellule	unité
	AMTCP_T2	Surface moyenne des polygones de TerraClass Production 2010	m ²
Distance	DMR_T2	Distance moyenne de la cellule à une route départementale ou fédérale	m
	DMU_T2	Distance moyenne de la cellule à un polygone de zone urbaine	m
	DMA_T2	Distance moyenne de la cellule à un abattoir	m
	DML_T2	Distance moyenne de la cellule à une industrie laitière	m

²¹ TerraClass Production comprend les classes suivantes : agriculture annuelle, pâturage "bien entretenu", pâturage "embroussaillé", pâturage en voie de régénération, mosaïque d'occupations du sol et végétation secondaire.

Ce tableau a permis de construire ensuite un arbre de décision adapté cette fois à cette échelle d'agrégation et de classer les systèmes de production agropastoraux prédominants dans chaque cellule. Sept classes de systèmes de production agropastoraux ont été identifiés: agriculture stricte, agriculture dominante, aire de coexistence, élevage bovin non intensifié, élevage bovin non intensifié (viande + lait), élevage bovin intensifié, élevage bovin intensifié (viande + lait et deux classes de systèmes basés sur la couverture forestier (domaine forestier, front initial) (cf. figure 8).

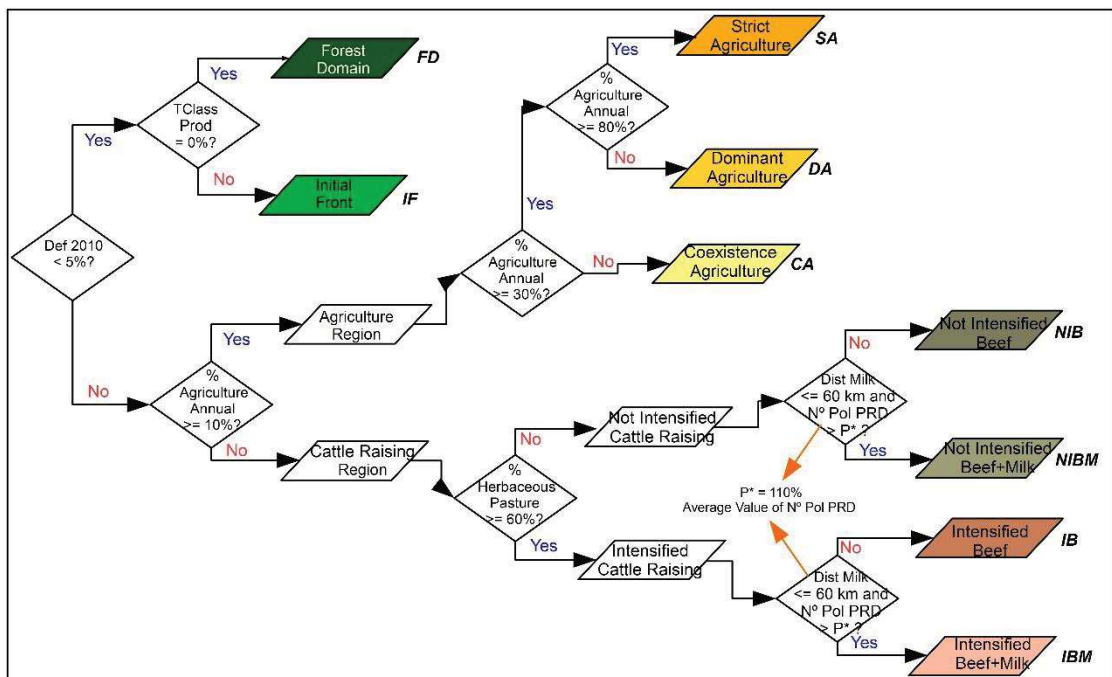


Figure 8 – Arbre de décision pour l'identification des systèmes productifs agropastoraux du Rondônia au niveau cellulaire.

L'étape suivante a été de classer à l'échelle du Rondônia le système productif prédominant dans chaque cellule (cf. figure 9).

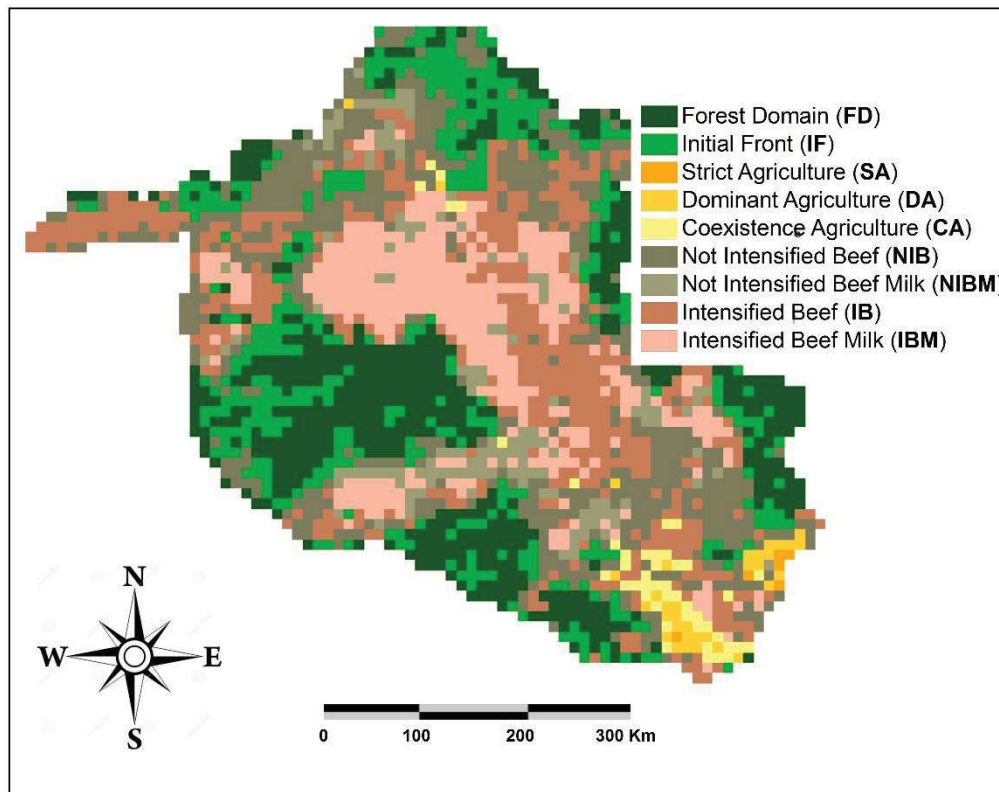


Figure 9 – Résultat de la spatialisation des systèmes productifs dans l'espace cellulaire du Rondônia.

En suite des valeurs moyennes des attributs paysagers de chaque système de production ont été calculées (tableau 2, Almeida et al. 2016c), et une analyse en composantes principales (ACP) a ensuite été réalisée. L'ACP révèle six axes de variables qui sont : taille de polygones, extension des pâturages, âge et diversité de classes des polygones, forme de polygones, extension de la végétation secondaire et distance aux infrastructures. Les deux composantes principales de l'ACP expliquent respectivement 40,9% et 10,9% de la classification des systèmes de production agropastoraux. Une fois les cellules classées, les différences entre les attributs ont été analysées pour chacun des systèmes productifs. Un test ANOVA a été réalisé avec 5% de signification pour identifier la différence des valeurs moyennes des attributs de chaque système productif.

Pour réaliser la validation de la classification, une mission de terrain a été réalisée entre le 09 au 16 octobre 2015. Un ensemble d'échantillons distribués sur la totalité du territoire de l'État du Rondônia a été tiré au sort, en utilisant comme élément de stratification les polygones des classes reliées aux systèmes productifs agropastoraux des données TerraClass 2010. Dans cette thèse ce sous-ensemble est appelé

TerraClass Production²² ou, simplement, TClassProd. Douze points d'échantillonnage pour chaque classe du TClassProd sont tirés au sort, de façon à couvrir toutes les régions productives de l'État, totalisant 72 échantillons. À partir des 72 échantillons tirés au sort a été réalisé le relevé de terrain effectué exclusivement par voie terrestre. Lorsqu'il était impossible d'atteindre la zone à échantillonner, le point le plus proche possible de cette zone a été documenté et photographié. La figure 10 montre l'itinéraire de terrain et la localisation des échantillons.

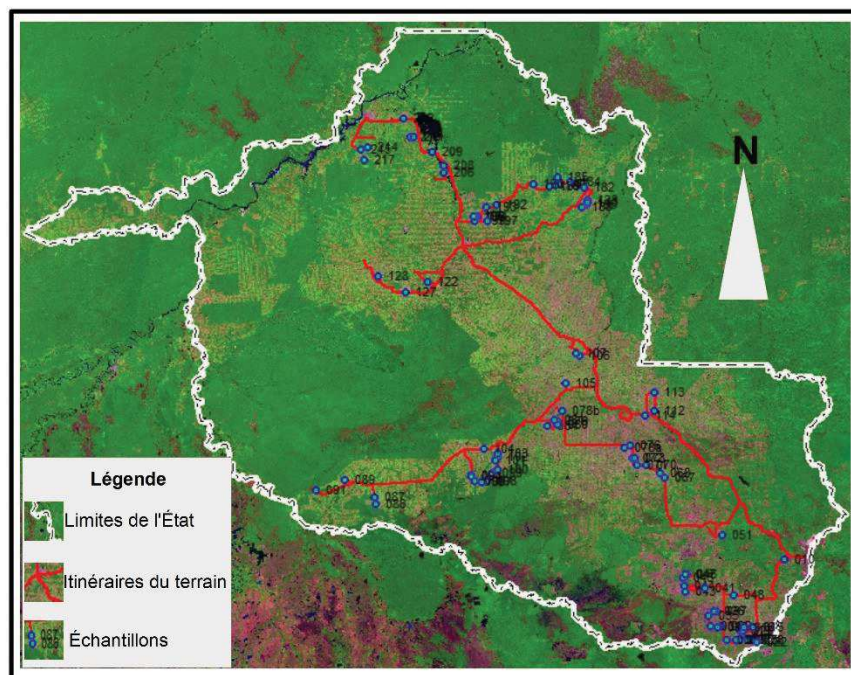


Figure 10 – Itinéraire et échantillons de terrain

Cette mission de terrain a été également l'occasion de documenter des points mettant en évidence des changements d'usage du sol (comme par exemple des reconversions de pâturages en parcelles agricoles). Un peu plus de 7.900 km ont été parcourus, au cours desquels ont été visités et photographiés 90 points. Postérieurement ceux-ci ont été classés en 4 groupes selon les paysages agricoles rencontrés sur le terrain : agriculture exclusive ; zone de coexistence agriculture-pâturages ; pâturages bien entretenus et pâturages mal entretenus. Les points ont été groupés selon le système productif de la cellule d'origine, et les paysages trouvés sur

²² TerraClass Production comprend les classes suivantes : agriculture annuelle, pâturage "bien entretenu", pâturage "embroussaillé", pâturage avec régénération, mosaïque d'occupations et végétation secondaire

le terrain ont été comparés à la classification attribuée à la cellule. Les cellules ont été classées en fonction du système productif prédominant. Il est ainsi possible de rencontrer dans une même cellule des paysages non caractéristiques du système productif prédominant. Pour évaluer de manière globale la classification les critères du tableau 5 sont utilisés :

Tableau 5 – Règles pour la validation des échantillons de terrain

Système Productif prédominant dans la cellule	Paysages compatibles sur le terrain
Agriculture Stricte(SA)	Agriculture exclusive
Agriculture Dominante (DA)	Agriculture, coexistence agriculture/pâturages
Alre de coexistence (CA)	Agriculture, coexistence agriculture/pâturages
Elevage intensifié de bœuf (IB)	Pâturages bien entretenus, coexistence agriculture/pâturages
Elevage intensifié de bœuf et vache laitière (IBM)	Pâturages bien entretenus, coexistence agriculture/pâturages
Elevage non intensifié de bœuf (NIB)	Pâturages mal entretenus, coexistence agriculture/pâturages
Elevage non intensifié de bœuf et vache laitière (NIBM)	Pâturages mal entretenus, coexistence agriculture/pâturages

Dans le but de quantifier la robustesse de la classification en cellules avec la réalité trouvée sur le terrain, ont été considérés pertinents les échantillons où ont les paysages sont compatibles. Le tableau 6 montre les résultats obtenus.

Tableau 6 – Résultats pour la validation de terrain

Système Productif Prédominant dans la Cellule	Classification du terrain					Total	% "Correct"
	Agriculture	Agriculture /Pâturage	Pâturage Bien géré	Pâturage Mal géré			
Agriculture Stricte(SA)	0	0	0	0	0	0	-
Agriculture Dominante (DA)	6	2	1	0	9	9	89
Aire de coexistence (CA)	9	3	2	0	14	14	86
Elevage intensifié de bœuf (IB)	1	3	7	8	19	19	53
Elevage intensifié de bœuf et vache laitière (IBM)	1	5	12	5	23	23	74

Elevage Non intensifié de bovin (NIB)	2	4	1	8	15	80
Elevage non intensifié de bœuf et vache laitière (NIBM)	0	3	0	7	10	100
Total	19	20	23	28	90	77%

La valeur moyenne de concordance entre la classification du système productif et le paysage trouvé sur le terrain a été de 77%, ce qui montre une bonne concordance. Il faut prendre également en compte que les données utilisées pour la classification des cellules datent de 2010, et que le travail de terrain a été réalisé en 2015, il est donc possible que quelques-uns des points échantillonnés présentent des évolutions paysagères.

Discussion des résultats

La méthodologie développée permet d'une part d'identifier, de quantifier et de comprendre la configuration spatiale des systèmes de production agropastoraux et d'autre part de caractériser le paysage en fonction des "empreintes spatiales" laissées par l'évolution du système d'utilisation des terres. Elle montre les relations étroites existant entre les métriques calculées à partir des polygones de déforestation, d'occupation et d'usage du sol et des matrices de distances aux infrastructures (routes, usine de production de lait et abattoirs) et les systèmes de productions agropastoraux. La principale avancée méthodologique est la possibilité d'identifier un système productif agropastoral sans utiliser de données socio-économiques.

L'application d'une grille de cellules de 10 x 10 km, par rapport aux cellules de 25 x 25 km, permet une analyse plus fine des systèmes agropastoraux. Parmi les neuf systèmes de production cartographiés, seulement deux systèmes liés aux systèmes forestiers ont présenté des variations supérieures à 10% lorsque ont été comparés les deux tailles de résolution de cellules. Il en résulte que plus la cellule est grande, plus est faible la possibilité de trouver une cellule presque entièrement couverte de forêts et sans aucune activité productiviste. Ainsi un nombre significatif de cellules classées comme "Domaine Forestier" à partir des cellules de 25 x 25 km, ont été classées comme "Front Initial" dans celles mesurant 10 x 10 km. Dans les systèmes liés à la

production agropastorale les différences dans le pourcentage de classification sont moindres.

Les résultats obtenus à partir de la classification par cellules sont cohérents avec ceux de la classification utilisant les limites administratives municipales. Les systèmes liés à la production de grains sont concentrés dans le Sud de l'État. A cette échelle plus fine (10 x 10 km), il est possible maintenant d'observer ces cellules plus au Nord de l'État. Elles peuvent signaler une migration et extension de la production de grains vers de nouvelles régions de l'Etat. Des observations avec les nouvelles données TerraClass de 2012 et 2014 pourront confirmer ou infirmer cette tendance. Les cellules avec une prédominance de systèmes "agriculture annuelle" ont présenté des valeurs moyennes pour la relation aire/périmètre supérieures à celles des autres systèmes de production, ainsi qu'une taille moyenne des polygones plus grande. Ces deux constats s'accordent avec ce qui était attendu, à savoir que l'agriculture pour la production de grains dans l'Amazonie est pratiquée sur de grandes surfaces et est hautement mécanisée.

Les cellules, où les activités liées à la chaîne de production laitière sont significatives, présentent une densité plus élevée de polygones de déforestation, ainsi qu'une valeur moyenne de la relation aire/périmètre inférieure à celle des cellules où l'activité laitière est non-significative. Cette configuration du territoire est en conformité avec les caractéristiques des producteurs laitiers de la région, car les petits propriétaires fonciers trouvent dans l'activité laitière une source complémentaire de revenus (Paes-de-Souza, Amin, and Gomes 2009; IDARON 2013; Rodrigues, Souza, and Rodrigues 2014; Soler, Verburg, and Alves 2014).

Les systèmes d'élevage bovin semi-intensifiés présentent un pourcentage de végétation secondaire plus élevé, ce qui confirme ainsi l'hypothèse que les processus d'intensification de la production conduisent à une plus importante occupation des sols et en conséquence à une diminution des aires en processus de régénération forestière (Alves et al. 2003; Almeida et al. 2010; Jakovac et al. 2015; Almeida et al. 2016a).

Les systèmes d'élevage intensifiés se situent principalement dans le centre de l'État, à la proximité des principaux axes routiers, alors que les systèmes semi-intensifiés se trouvent en périphérie et plus proches des zones de forêts. De nouvelles observations avec des données TerraClass plus récentes permettront d'assurer le

suivi et de vérifier s'il y a expansion ou non de cette frontière, ainsi que des changements affectant les systèmes de production. La valeur moyenne du taux de déforestation entre 2000 et 2010 a été plus élevée dans les systèmes liés à l'élevage bovin, et l'âge moyen de déforestation est plus petit, ce qui suggère que l'élevage bovin est un des principaux moteurs de la déforestation dans la région, en accord avec la littérature (Mertens et al. 2002; Piketty et al. 2005; Bowman et al. 2012; Pacheco 2012).

Les résultats obtenus dans cet article ont montré le potentiel élevé de la méthodologie développée pour le suivi des changements d'usage et d'occupation des sols. Elle permettra une observation du paysage plus détaillée et plus fréquente, condition sine qua non pour la planification et la proposition de politiques publiques, et une surveillance constante de questions touchant aux propositions d'un développement durable.

Cette méthodologie fait l'objet d'un troisième article intitulé "LULC footprints to identification of crop, intensified and not intensified cattle raising production systems in the Brazilian Amazon. A case study in Rondônia" soumis à la revue *Journal of Rural Studies*.

4.1 LULC footprints to identification of crop, intensified and not intensified cattle raising production systems in the Brazilian Amazon: A case study in Rondônia

LULC footprints to identification of crop, intensified and not intensified cattle raising production systems in the Brazilian Amazon: A case study in Rondônia

Cláudio Aparecido de Almeida^a, Moisés Mourão Jr.^b, Nadine Dessay^c, Luciana Soler^a, Anne Elisabeth Lacques^c, Adriano Venturieri^b, Frédérique Seyler^c

^a National Institute for Space Research-INPE, Av. dos Astronautas, 1758 CP. 515, 12227-010 São José dos Campos, SP, Brazil

^b EMBRAPA Eastern Amazon Trav. Dr. Enéas Pinheiro, s/n°, Caixa postal 48, 66095-100, Belém, PA, Brazil

^c IRD UMR Espace-Dev 500 rue Jean François Breton, 340930, Montpellier, France

Abstract.

This article introduces the concept of LULC footprint through the analyses of the ‘scars’ left by the different land use types using decision tree classification methods to differentiate agropastoral production systems at the cellular level in Rondônia State, in the Brazilian Amazon. The method adopted developed landscape metrics based on deforestation (PRODES data), land use/cover (TerraClass data) and distance matrices to landscape elements of regional infrastructure of roads and agricultural manufacture plants of local production. The mean values of such metrics retrieved from land use/cover data were used in a decision tree classification method allowing the identification of seven classes of agricultural production systems plus two other classes of forest domain. There was a predominance of cattle raising activities with more intensified systems in the central region of Rondônia located closer to better developed roads and infrastructure, including urban areas, milk production plants and slaughterhouses. Production systems based on annual agriculture were concentrated in the south region. The Principal Component Analysis (PCA) revealed clusters of metrics, which were evaluated within six axes considering the following variables: area of LULC features, pasture extent, age and class diversity of LULC features, shape of LULC features, secondary vegetation extent and distance to infrastructure and highways. The first and second components of PCA explained 40,9 and 10,9% respectively of the classification of agricultural production systems. This study demonstrates an intimate relationship among landscape metrics extracted from features of deforestation, land use land cover data, as well as those extracted from distance to infrastructure and highways. The combination of such relationship represents the LULC footprint and is proven here to be efficient in classifying different agricultural production systems in the Brazilian Amazon. The classification of agricultural productive systems allowed us to identify, quantify and qualify their spatial configuration as well as to characterize the landscape regarding the ‘scars’ left by the evolution of land systems.

Keywords: Land use land cover, Amazon, TerraClass, Landscape analysis, production systems

1. Introduction

The study of landscape should be facilitated when taking into account three main issues: an integrated comprehension of facts that may have driven ecological, cultural and historic matters; an understanding of current landscape structure and the spatial-temporal relationships of its components; and the perception of how landscape evolve in time as a response of human-environmental interactions (Martins et al. 2004; Rindfuss et al. 2004; Verburg et al. 2015). Since the advent of agriculture and animal grazing during the new stone age (~12000 BC), humans have been a core driver of changes by transforming natural landscapes into diverse land cover and land use systems that are intricately linked to their socioeconomic and cultural systems. (Mazoyer and Roudart 2008; Vizzari and Sigura 2015).

The exponential increase of world population has pushed the incorporation of larger/new areas into land use systems, mostly for food and energy production (Rathmann et al. 2010; Tilman et al. 2009). Human-environmental interactions have turned natural landscapes into agricultural and livestock land uses, whose deep impacts on local to global environmental services have increased in magnitude and intensity, especially after the 18th century (Antrop 2005; Ramankutty et al. 2006).

In the Brazilian Amazon, land appropriation of natural landscapes by European colonizers date from the XVI century (Gadelha 2002). However, it was only after the 1950s that land occupation policies boosted colonization by improving accessibility from the Southern Brazil to many Amazonian areas through a road network, which has caused profound alterations in the forest cover change (Aguiar et al. 2007; Becker 1990).

Monitoring land use/cover changes linked to agricultural systems, as well as their related human-environmental interactions are core to provide policy makers information about available active/passive assets. These relevant information can help developing mechanisms to promote more sustainable production systems that cope with limited natural resources, i.e. that guarantee the maintenance of ecosystem services (Goosen 2012; Kuemmerle et al. 2013; NIJOS and OECD 2002).

In order to promote more sustainable production systems it is mandatory to understand the spatial distribution together with the links and interdependency of the current production systems relevant at

local and regional scales. Despite the understanding of socioeconomic status and land use/cover dynamics are key to build regionally adapted policies that promote fairer market chains and stronger networks among stakeholders (Liu et al. 2007; van der Zanden et al. 2016). The spatial configuration of current production systems account for the understanding of how their environmental dependency can be a negotiable factor to promote stakeholders to engage in more sustainable land use systems, which might be more economically attractive once it should be more socioeconomically resilient and less reactive to external factors like climate change and international economy shifts inter (de Barros Ferraz et al. 2005; Lemos and Roberts 2008).

Under this context, Almeida et al. (2016) adopted spatialized concepts to classify deforested portions of Rondônia into six production systems most regionally representative at the municipal administrative level. These production systems include both systems of mechanized agriculture and intensive/semi-intensive cattle raising for milk and/or beef. This classification allowed the understanding of spatial configuration and major production systems, in each municipality in Rondônia, through the characterization of production systems into four dimensions: agricultural production, economic outputs, territorial and social configuration. However, the outcomes obtained based on data aggregation at this level is limited as spatial heterogeneity of land use patterns and drivers are relevant at more detailed levels of analysis (Aguilar et al. 2007; Browder et al. 2004; Espindola et al. 2012; Perz 2001; Soler et al. 2009).

Initially defined as the appropriated carrying capacity, the concept of ecological footprint was developed to be an environmental indicator able to put into scale the ecological debts of different population's way of life to the biosphere, as well as to quantify how much such lifestyles jeopardize socioeconomic and environmental sustainability (Wackernagel and Rees 1998). Thus, in this manuscript we adopted the ecological footprint perspective, named here LULC footprint, which assumes that land use systems leave 'scars' in the landscape that can be translated by a certain organization and the diversity level of land use/cover types and infrastructural elements; and whose principal component analysis can bring hints to identify drivers that lead to particular production systems.

In this study the adoption of the concept of LULC footprint included the search for a spatial strategy to deal with limitations of administrative borders of municipality units, which allowed us to test the hypothesis that it is possible to classify core production systems based on cellular spatial units throughout land use/cover 'scars' these systems print over the landscape and existing infrastructure. Thus, the main objective was to classify core production systems by means of a decision tree technique using as input landscape metrics retrieved from deforestation maps, land cover land use maps and infrastructure data translated into a cellular database. In brief, to obtain LULC footprints, decision tree classification methods were applied to a cellular database where each cell was built based on appropriate strategies consistent with input data of deforestation and land use maps, as well as data on existing infrastructure (distance to urban areas, roads, slaughterhouses and milk production plants).

2. Materials

2.1 The case study of Rondônia

Rondônia State represents 237.590 km² of the Brazilian Legal Amazon, a political border of the Brazilian portion of the Amazon biome (Brasil 1953, 1966, 1977). Rondônia went through a forty-year process to reach its political independence beginning in 1943 with a formal detached from Mato Grosso State (Brasil 1943), and concluded in 1981 when Rondônia became a Federal State, which is nowadays composed by 52 municipalities (Brasil 1981). Its occupation started in the 17th century with mining activities, followed by two colonization processes linked to rubber cycles in the end of the 19th century, and later during the II World War (Coy 1988). In the 1970s, the opening of roads allowed an integration of local production chains to national and global markets, especially through road BR-364 linking the capital Porto Velho to the Southern Brazil (Becker 1990; Théry 1997). Such integration associated to policies of rural settlements carried out by INCRA (National Institute for Colonization and Agrarian Reform) lead to a significant migration of peasants and capitalized farmers who were established along the main and secondary roads (Becker 1990; Browder et al. 2008; Théry 1976, 1997).

This colonization process resulted in an intensive forest removal followed by a number of land transitions in Rondônia State (Almeida, Coutinho, et al. 2016; INPE 2015a). Until 2014 the total area deforested in Rondônia represented 41,43% of its original forest coverage. The land use transitions that followed huge deforestation rates are intricately connected to production chains established over the years dependant partially or totally on small scale agriculture, large scale cropping of grains, and mostly milk and beef production (Alves et al. 2003; Browder et al. 2008; IDARON 2013; Soler et al. 2014).

2.2 Data source

The inner concept of polysemy in landscapes indicate its constant mutation, as they result from continuous and dynamic interactions within the human-environmental systems (Antrop 2005; Naveh 1994). To study human-environmental interactions, it was analysed deforestation data from PRODES Project (INPE 2015a), land use and land cover maps from TerraClass project (Almeida, Coutinho, et al. 2016) and maps of mean distance values from each cell to the closest urban areas, roads, slaughterhouses or milk production plants. In this study we define milk production plants, as units to reception and industrial processing of raw milk, both officially registered in the Nacional Inspection System (SIF), a governmental institution that periodically certifies the quality of food and goods from animal origins and is under the Ministry of Agriculture, Animal Husbandry and Supply (MAPA 2015).

Based on the above mentioned data the appropriate clipping was performed and spatial cellular database was built within Rondônia State borders, and whose attributes were used to calculate landscape metrics required for landscape analysis (Cruz et al. 2013).

2.2.1 Deforestation data

PRODES project (INPE, 2015a) is performed by INPE since 1988 and produces annual maps of deforestation to Brazilian Legal Amazon considering rainforest removal features from 6,25 ha. These maps are produced based on semi-automatic image classification and interpretation of Landsat/TM and CBERS/CCD imagery (Shimabukuro et al. 1998) were used in features

(vector) format at spatial resolution of 30 m. Thus annual deforestation data for 1997 to 2010 were the input for analysing the amount of deforested area, the size of deforested features as well as their age and shape. Further studies have also adopted deforestation data as a landscape descriptor, where significant relationships were found between deforestation patterns and landscape metrics (Pereira et al. 2001; Saito et al. 2011).

2.2.2 Land use land cover data

Land use and land cover can be taken as the physical expression of human-environmental interactions enclosing the ecological, agrarian, political and socioeconomic enhancements achieved in the region (Johan et al. 2012; NIJOS and OECD 2002; Rizzo et al. 2013). Data from TerraClass project, produced at 30 m of spatial resolution, show land use/cover maps and statistics among classes including their extension and relative proportions within all nine Federal States that enclose the Brazilian Amazon. The thematic maps of TerraClass used in this analysis comprise the year of 2010 and contain the following classes: 1) deforested areas in 2010; 2) annual agriculture; 3) urban areas; 4) clean pasture; 5) dirty pasture; 6) pasture within bare soil; 7) pasture within secondary forest; 8) secondary forest; 9) reforestation; 10) mosaic (standing for mixed signals of dirty pasture, small scale agriculture and land abandonment); 11) mineral exploitation areas; 12) other uses; 13) non-observed areas (intensive cloud recurrence).

2.2.3 Spatial Cellular Database

The working space was prepared building two cellular grids of 10 x 10 km and 25 x 25 km. In the first grid of 10 km a total of 2536 cells were needed to enclose Rondônia State, while in the second grid of 25km a total of 459 cells were required. These cells were identified in a matricial system of lines and columns with address coding, and were automatically generated based on a mask of the study area using the *Create cells* function from TerraView software. (INPE 2015b).

2.2.4 Distance matrices (Infrastructure and highways)

The proximity of landscape elements as urban areas and roads are usually linked to further deforestation patterns and agricultural intensification through area expansion (Alves et al. 2003; Aguiar, Câmara, and Escada 2007; Soler et al 2014). Also, distance to beef and mainly milk production plants are limiting factors to further deforestation and land use change, given the required production logistics (Martins et al. 2004; Zucchi et al. 2011). In order to evaluate such distances, we produced four matrices meaning mean distance values from each cell relative to urban areas, state and federal roads, milk production plants and slaughterhouses.

3. Methods

3.1 Strategies for building cellular databases

In order to compare the differences in capturing production systems within scale of analysis, we chose to build two cellular databases at 10 and 25 km cell resolution (respective area of 100 and 625 km²). Cells in both databases were filled using similar strategies based on previously explained attributes of deforestation aspects, land use/cover characteristics, and the distance to landscape elements of regional infrastructure of roads and agricultural manufacture plants of local production. The cells were filled by such attributes according to different strategies to mention percentage of land use/cover classes, mean values and number of features, according to Table 3. Regarding the distance matrices it was adopted the strategy of mean value relative to different elements (see Table 3 in Annex).

3.2 Classification of predominant production systems at cellular level

Decision trees are used in classification systems that combine a sequence of simple tests where each test compares a numerical attribute to a threshold value or a nominal attribute against a set of possible values (Kotsiantis 2013). At every new test - called knot – the individuals are subdivided into subgroups named brands until the system obtain the final

classification. Due to its simple application and understanding decision trees are used in classification algorithms for different fields of study from health to environmental issues among others (Le Clec'H et al. 2013; Silva et al. 2008; Smadja et al. 2013).

In this study, in order to distinguish the agricultural production systems from each other, referential attribute rules were chosen based in previous work (Almeida et al. 2016), and are illustrated in Figure 1.

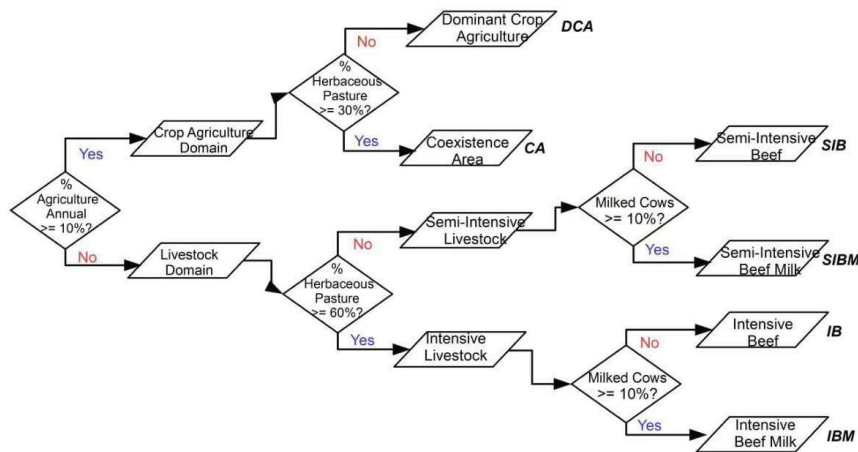


Figure 1 – Decision tree adopted to identify the agricultural production systems at the municipality level in Rondônia State.

(Source: Almeida et al 2016).

In order to distinguish between cattle raising for either milk or beef production, the decision tree adopts as the key attribute the percentage of milked cows, according to Municipal Agricultural Production data (IBGE 2012). Such data is only provided at the municipality level, which spatial scale is not suitable to be inserted to the cellular databases adopted here. Thus, to solve it we adopted two attributes, available at a better spatial scale, to play the role for milked cows: number of deforestation features per km² and the mean distance from each cell to milk production plant. Another important aspect to be tackled was dealing with

extensive still forested areas with low anthropogenic impact, as this is hard to achieve when adopting the unit of analysis as administrative borders of municipalities. Therefore, two new knots were inserted to the decision tree, which allowed the partition between cells with highly preserved forest from those still under initial steps of occupation. The resulting decision tree after the insertion of these new rules is illustrated in Figure 2.

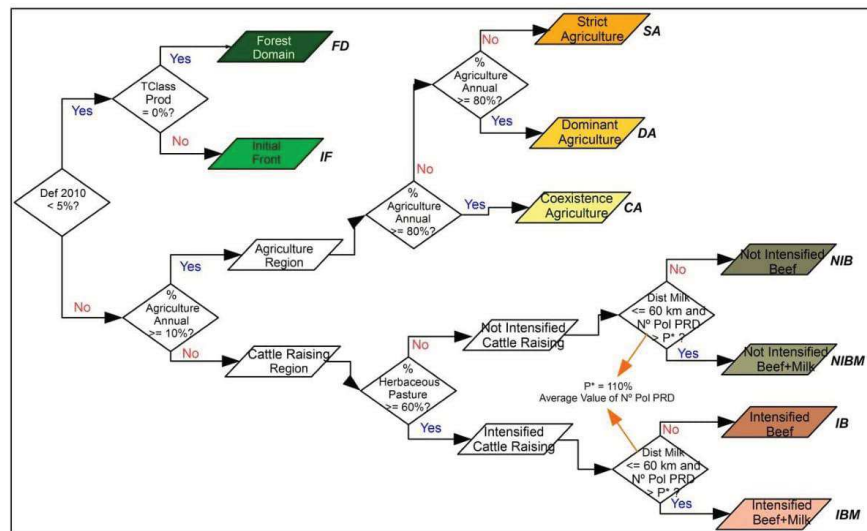


Figure 2 – Decision tree adopted to identify the agropastoral production systems at the cellular level.

As the first criterion to ramification of this new decision tree, it was tested the percentual of deforested area in the cells, in 2010. Cells presenting deforestation percentage less than 5% were classified as belonging to a forest region. Cells inside this region were then classified as Forest Domain (**FD**) or Initial Front (**IF**), due to the absence or presence of land use features from the group called TerraClass Production (i.e. the total occupied areas by anthropogenic land use types denoting agricultural production – annual agriculture, mosaic, clean pasture, dirty pasture, pasture within regeneration and secondary forest).

Cells presenting deforestation percentage equal or higher than 5% in 2010 were classified to the production domain. This domain was divided into two subgroups having as ramification criterion a threshold of at least 10% of annual agriculture out of the total area occupied by TerraClass Production. Thus, cells presenting such threshold less than 10% of annual agriculture were classified as pasture domain and those equal or higher than 10% were classified as agriculture domain. After that these both domains were again subdivided.

Regarding the agriculture domain, cells presenting a percentage of occupation of annual agriculture of the total area occupied by TerraClass Production lower than 30% were classified as a co-existing zone between agriculture and pasture (*Coexistence Area – CA*). This threshold was calculated based on official data from the Department of Agrarian Economy belonging to Ministry of Agriculture, Livestock and Supply (MAPA 2012a). Such data show a national agricultural GDP higher than R\$ 99 billions Brazilian Reais) in 2006 cropped in 76.697.324 ha, meaning an agricultural production profits of 1294,18 R\$/ha. Similarly, cattle raising GDP in 2006 was R\$ 68billions (Brazilian Reais) under a grazing area of 172.333.073 ha, resulting in much lower profits of 396,97 R\$/ha. Taking these figures into account, it can be observed that an area of at least 30% occupied by annual agriculture shall return considerably higher profits than cattle raising activities.

Cells presenting annual agriculture occupation within 30 and 80% within the agriculture domain were classified as strongly attached to agricultural practices (*Dominant Agriculture – DA*), while cells presenting equal or higher than 80% were classified as strictly attached to annual agriculture (*Strict Agriculture – SA*).

When analysing the pasture domain, cells presenting percentage of herbaceous pasture equal or higher than 60% were classified as intensified cattle raising while cells under this limit were classified as not intensified cattle raising.

Once defined intensified or not intensified cattle raising domains, new rules were defined aiming to identify cells with significant milk production by adopting the combination of two attributes, as mentioned before: number of deforestation polygons and the mean distance from each cell to milk production plants.

Two criteria were adopted in this step to identify the significant presence of dairy farming, which were based on cells with an average distance to a milk production plant (attribute DML_T2) no more than 60 km (based on empirical measures (R. S. Martins et al. 2004)). At the same time, the second criteria considered cells presenting deforested features density (attribute NPPRDT2_km2) higher than 110% when compared to the mean value of such attribute in all cells of this study (based on empirical measures (Almeida et al. 2016)). These cells were associated with cattle raising systems with a significant presence of dairy farming. Thus, cells that did not meet both criteria were classified as not presenting significant milk production.

This same classification was applied to intensified or not intensified cattle raising domains. At last cattle raising domain was divided into four subgroups: intensified cattle raising with no significant milk production (Intensified Beef – **IB**) or with significant milk production (Intensified Beef Milk – **IBM**); and not intensified cattle raising with no significant milk production (Not Intensified Beef – **NIB**) or with significant milk production (Not Intensified Beef Milk – **NIBM**).

3.3 Variance analysis of attributes of production systems

By means of variance analysis (ANOVA) we investigated different characteristics among the agricultural production systems at the cellular level. In order to perform that we applied ANOVA analysis to the attributes listed in Table 3, whose mean values were ranked to establish their hierarchy to the significance level of 5% ($\alpha=0.05$).

Finally, by using factor analysis of principal components (PCA) technique the values of these attributes were aligned to the axes of metrics polarization revealing the importance and inherent polarization among groups of metrics. We took into account only eigenvalues higher than 1.0 and eigenvectors equal or higher than 0.5 ($|\lambda| \geq 0,50$).

4. Results

4.1 Spatial configuration of production systems

The first result obtained can be considered as the adaptation of decision tree rules at municipal level (Figure 1), to make it possible the use of landscape and territorial configuration metrics. This result is illustrated in Figure 2 where the adapted decision tree to cellular level is shown.

We performed the attribute values calculation (described in Table 3) for all cells from both spatial cellular database at 10 and 25 km resolution. These two sets of data were applied to the decision tree at the cellular level (Figure 2), being each of the database cells classified to one out of nine classes described in section 3.3. The classification results are shown in Figure 3.

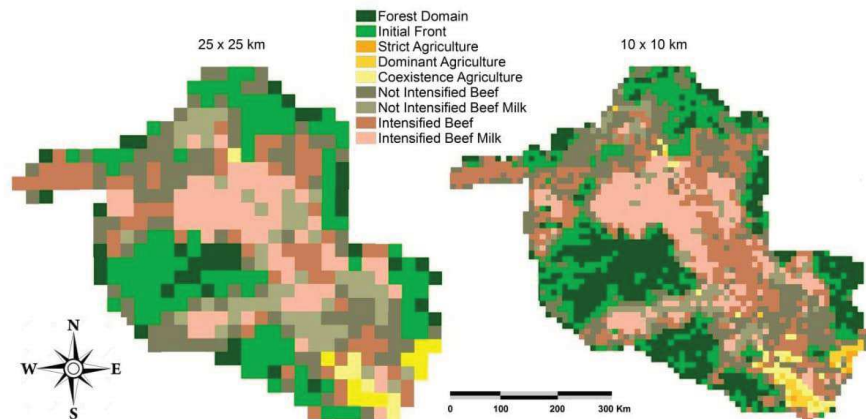


Figure 3 – Results of decision tree classifications representing the spatial configuration of agricultural production systems in Rondônia State at the cellular level at 10 x 10 km (right) and 25 x 25 km (left).

A visual comparison between the classifications results shown in Figure 3 indicate the method were suitable to capture the core shape and location of production systems at both spatial resolutions. It is obvious that the classification at higher spatial resolution (10 km) present further spatial heterogeneity among classes of production systems, as a result of a 6,25 times more detailed analysis. Once performed the classification of production systems at both spatial cellular databases, the proportional variations of number and percentage of cells were compared among the two sets of cells of both resolutions. Table 1 lists the proportional variations between the two sets of classified cells based on production systems obtained in this study retrieved from landscape and territorial configuration attributes.

Table 1– Proportional classification variations between the two sets of cell attributes at 10 or 25 km resolution.

Production Systems	Cells 10 x 10 km		Cells 25 x 25 km		%Variation between 10 and 25 km cells
	# Cells	% Cells	# Cells	% Cells	
Forest Domain (FD)	518	20.43%	38	8.28%	12.15%
Initial Front (IF)	391	15.42%	111	24.18%	-8.76%
Strict Agriculture (SA)	6	0.24%	0	0.00%	0.24%
Dominant Agriculture (CA)	34	1.34%	10	2.18%	-0.84%
Coexistence Area (CA)	46	1.81%	7	1.53%	0.28%
Intensified Beef (IB)	470	18.53%	67	14.60%	3.93%
Intensified Beef Milk (IBM)	367	14.47%	71	15.47%	-1.00%
Not Intensified Beef (NIB)	557	21.96%	101	22.00%	-0.04%
Not Intensified Beef Milk (NIBM)	147	5.80%	54	11.76%	-5.96%

When comparing the results between the two cellular databases it can be realized that five production systems presented a variation equal or minor than 1%. The major differences were observed in the systems with predominance of forest land cover, where the Forest Domain presented an area underestimate while the Initial Front was overestimated. The production systems regarding annual agriculture kept a variation no more than 1% between the two datasets, except from Strict Agriculture that was not mapped at the 25 km resolution. Production systems linked to cattle raising activities presented intermediary values of variation between the two cellular databases. Some of this difference can be attributed to

fragmentation of landscapes. Production systems linked to annual agriculture with less fragmentation showed minor differences. Land systems with forest predominance, but with intense fragmentation showed the greatest differences when comparing the two cell resolutions.

4.2 Characterization of production systems

The choice for a cellular spatial resolution is dependent on the process to be mapped (Saito et al. 2011; Soares Filho et al. 2007). In this study we analysed cells at 10 and 25 km of spatial resolution. As presented in Figure 3, cells at 10 km presented a higher level of detail and heterogeneity of production systems, while using the database at 25 km it was not possible to classify any cell as belonging to the production system *Strict Agriculture*. Therefore, we decided to evaluate the mean values and the significance of landscape metrics in terms of production systems only at 10 km (see Table 2).

Table 2 – Mean values and significance of landscape attributes of production systems considering the cellular database at 10 km

Source	Metrics	Productiv Systems								
		FD	IF	NIB	NIBM	IB	IBM	CA	DA	SA
PRODES	PFO	0.743(c)	0.87(bc)	0.89(bc)	0.957(a)	0.946(a)	0.978(a)	0.944(ab)	0.843(bc)	0.896(abc)
	PD1997	0(c)	0.005(c)	0.206(b)	0.343(a)	0.394(a)	0.409(a)	0.561(a)	0.456(a)	0.595(a)
	PD2010	0(d)	0.014(d)	0.368(c)	0.649(b)	0.604(b)	0.739(a)	0.725(ab)	0.618(b)	0.731(ab)
	TMD_T1T2	0(d)	0.001(d)	0.039(cd)	0.114(b)	0.098(b)	0.151(a)	0.07(bc)	0.045(cd)	0.037(cd)
	IMPRD_T2	0.303(c)	8.695(b)	9.3(b)	10.18(b)	10.51(b)	10.52(b)	11.95(a)	11.07(ab)	11.48(ab)
	APPRD_T1T2	1.846(c)	55.27(b)	65.75(b)	56.36(b)	68.25(b)	56.69(b)	107(a)	103(a)	86.03(ab)
	NPPRDT2_km2	0.001(d)	0.097(d)	1.001(c)	2.284(a)	1.206(b)	2.367(a)	0.887(c)	0.916(c)	0.412(cd)
	AMPRD_T1T2	92730(c)	120900(c)	202700(bc)	142200(c)	218900(b)	148900(c)	335400(a)	184900(bc)	216000(bc)
TerraClass	ATTCP_T2	0(d)	1046000(d)	31670000(c)	65960000(a)	55060000(b)	70890000(a)	66450000(a)	49620000(b)	44510000(bc)
	PTCP_T2	0(c)	0.94(ab)	0.931(b)	0.965(a)	0.98(a)	0.975(a)	0.981(a)	0.957(ab)	0.903(b)
	PAATC_T2	0(d)	0(d)	0.002(d)	0.004(d)	0.002(d)	0.001(d)	0.22(c)	0.455(b)	0.867(a)
	PMOTC_T2	0(c)	0.072(a)	0.038(b)	0.056(ab)	0.008(c)	0.013(c)	0.005(c)	0.003(c)	0(c)
	PPLTC_T2	0(f)	0.091(e)	0.357(d)	0.474(c)	0.724(a)	0.728(a)	0.543(b)	0.161(e)	0.01(ef)
	PPSTC_T2	0(c)	0.043(b)	0.143(a)	0.14(a)	0.061(b)	0.06(b)	0.059(b)	0.078(b)	0.007(bc)
	PRPCT_T2	0(d)	0.094(ab)	0.117(a)	0.1(ab)	0.042(c)	0.032(c)	0.055(bc)	0.128(a)	0.029(cd)
	PVSTC_T2	0(e)	0.701(a)	0.342(b)	0.227(c)	0.163(d)	0.167(d)	0.117(d)	0.175(cd)	0.087(de)
	PPCT_T2	0(f)	0.228(e)	0.618(c)	0.712(b)	0.827(a)	0.82(a)	0.657(bc)	0.367(d)	0.046(ef)
	IPPL_T2	0(a)	2.243(a)	5.42(a)	21.71(a)	147.6(a)	26.75(a)	8.06(a)	1.945(a)	0.536(a)

Distance	APTCP_T2	0(b)	45.56(a)	41.51(a)	40.87(a)	40.74(a)	38.22(a)	44.37(a)	45.69(a)	47.63(a)
	NPTCPT2_km2	0(d)	0.132(d)	1.925(c)	3.625(a)	2.474(b)	3.304(a)	2.475(b)	1.953(bc)	0.852(cd)
	NCTCP_T2	0(d)	2.189(c)	4.239(b)	4.646(a)	4.251(b)	4.373(b)	5(a)	5(a)	4.5(ab)
	AMTCP_T2	0(f)	109400(e)	158000(d)	186500(d)	251400(bc)	229600(c)	310900(b)	271600(bc)	575300(a)
	DMR_T2	57660(a)	46430(b)	22850(c)	16320(d)	15650(d)	13170(d)	16750(cd)	9302(d)	5147(d)
	DMU_T2	68940(a)	63480(a)	46530(b)	27750(d)	38910(c)	23980(d)	27850(cd)	26130(d)	19100(d)
	DMA_T2	122800(a)	115800(a)	81060(b)	55820(c)	66540(c)	62470(c)	59100(c)	53770(c)	29440(c)
	DML_T2	91550(a)	92180(a)	68840(b)	32480(d)	56220(c)	29370(d)	39980(d)	42980(cd)	54710(cd)

Note: Values signalized with similar letters in the same line do not present high significance level ($\alpha = 0.05$).

In the factor analysis the results of principal components showed 6 core components were retrieved out of 27 landscape metrics, and explained about 71% of the total data variation. Due to the significance criterion of eigenvalues ($|\lambda| \geq 0,50$), the results described here are restricted to the PCA I (first) and PCA II (second), which correspond respectively to 41 and 11% of total data variation.

PCA I presented mean distance metrics (DMU_T2, DMA_T2, DML_T2 and DMR_T2) as significant metrics having a negative orientation in the explanation of data variability. On the other hand the most metrics of deforestation (PD2010, PD1997, TMD_T1T2, IMPRD_T2, APPRD_T1T2 and NPPRD_T2), and a number/extension of agriculture or pasture land use metrics (ATTCP_T2PTCP_T2, PPLTC_T2, PPTC_T2, APTCP_T2, NPTCPT2_km2, NCTCP_T2 and AMTCP_T2) were significant with a positive orientation in explaining data variability. Regarding PCA II the significant metrics were mostly regarding area/perimeter of deforested or agricultural features (APPRD_T1T2, APTCP_T2) and percentage of secondary vegetation or occupied by TerraClass Produção within TerraClass (PVSTC_T2, and PTCP_T2), which presented a negative orientation regarding the explanation of data variability.

Once defined the significant positive or negative signals of eigenvectors, six main axes were put into evidence revealing how close relationships among metrics analysed are. These six axes were defined as: I) *area of LULC features*; II) *pasture extent*; III) *age and class diversity of features*; IV) *shape of features*; V) *secondary vegetation extent*; VI) *distance to infrastructure and highways*.

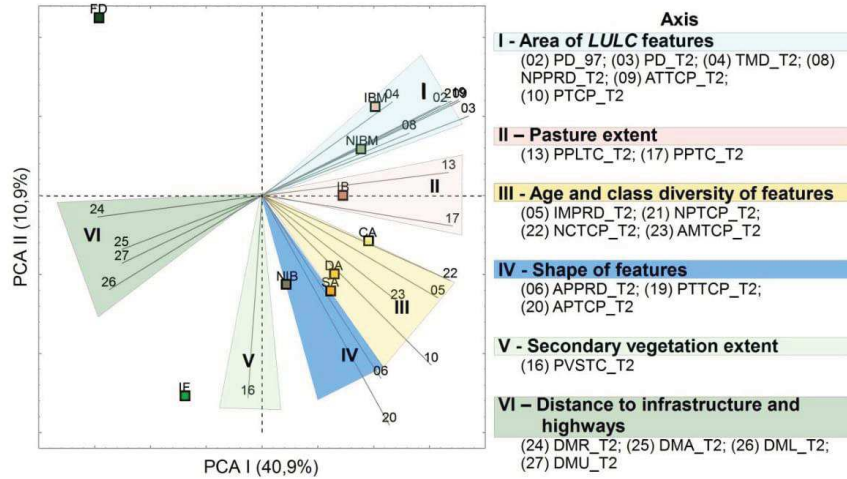


Figure 4 – Factor analysis of principal components, regarding the first and second principal components (PCA I and II), of metrics and orientation of significant eigenvalues of axis.

5. Discussion

It can be seen by the decision tree at cellular level (Figure 2) that the production systems are contained within three regions: first the native forest dominance called here *Forest Region*, then pasture areas for cattle raising named *Livestock Region*, and the areas with significant extent of annual agriculture named *Agricultural Region*. In this section we discuss the behaviour of each production system within these regions regarding the results obtained in the metric analyses performed.

5.1 Forest Region

Concerning the areas under protection in Rondônia State (Figura 5) it can be observed that cells classified as Forest Domain (FD) or Initial Front (IF) are mostly within official conservation units, which stress their importance as key policies able to promote species and environmental services conservation. However, it also reveals the need for policies to diminish pressure over these areas considering the amount of disturbed forest represented by *IF* cells located in the inner borders of conservation units in the fringes of production systems within Livestock or Agricultural Regions.

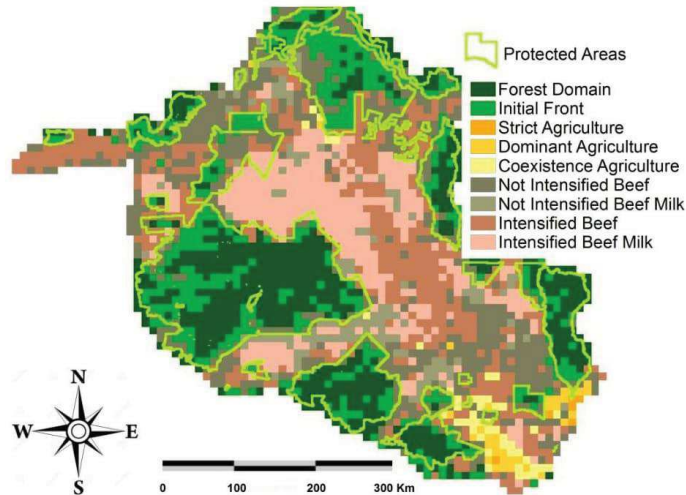


Figure 5 – Location of conservation units relative to production systems identified in Rondônia State.

Deforestation inside conservation units is significant once the majority of *IF* cells are located inside these areas supposedly under protection. Also it is observed some cells of production systems linked to pasture land inside conservation units limits.

The production systems *FD* and *IF* present an insignificant number of deforested areas or agricultural production systems, and are located next to Rondônia political borders, farther from main infrastructure network as also observed in other studies (Aguiar et al. 2007).

5.2 Livestock Region

In the pasture domain mean deforestation rates between 2000 and 2010 (**TMD-T1T2**) were higher than other agricultural systems, and so were the number of deforested features per km² (**NPPRDT2_km2**). On the other hand the mean age of deforested areas (**IMPRD_T2**) was smaller in areas dominated by pasture, which corroborates cattle raising activities as an important driver of deforestation in the study area (Bowman et al. 2012; Mertens et al. 2002).

The percentage of secondary vegetation (**PVSTC_T2**) was higher in the not intensified production systems. This is in agreement to previous analysis that show land use intensification due to area expansion rather than yield increase can lead to losses of secondary vegetation (Diogenes Salas Alves et al. 2003; Jakovac et al. 2015). The intensification of

cattle raising systems within the *Livestock Region* due to area expansion is indicated by the high values of clean pasture (**PPLTC_T2**) and also of total pasture (**PPTC_T2**), added to smaller values of mosaic (**PMOTC_T2**), dirty pasture (**PPSTC_T2**) and pasture within secondary vegetation (**PRPTC_T2**). All these clear correlation between specific production systems and deforestation/land use metrics suggest an intensification of land use process through pasture expansion.

Agropastoral production systems linked to cattle raising for both beef and milk production presented a larger number of features of TerraClass Production (**NPTCPT2_km2**), when compared to production systems linked only to cattle for beef. This indicates the production systems that meet both functions (beef and milk) are distributed within a larger number of properties, as also suggested by other authors (Marcolan et al. 2011; Rodrigues et al. 2014; Soares and Salman 2005). This distribution in a larger number of properties probably can indicate a higher labour demand, because usually small properties use more manual labour than medium or big properties.

Regarding distance to infrastructure and highways, on the whole the production systems with milk production tend to be closer to urban areas and highways when compared to production systems exclusively focused on meat production.

5.3 Agriculture Region

Regarding the production systems linked to annual agriculture the area/perimeter ratio of deforested features within 2000-2010 (**APPRD_T1T2**) was significantly higher than in other systems, and the average size of TerraClass polygons (**AMTCP_T2**) was higher for production systems linked to agriculture. This is an indication that deforested areas within Agricultural Region are bigger and more regular than in other deforested areas, which is associated to large amounts of deforestation and adoption of highly mechanized land use practices.

The percentage of secondary vegetation (**PVSTC_T2**) and mosaic (**PMOTC_T2**) were similar within the production systems of the Agriculture Region. These attributes presented smaller values to production systems linked to annual agriculture than to cattle raising. The behaviour of area/perimeter ratio of deforested features, number of TerraClass Production features, secondary vegetation and mosaic metrics indicate the specialization of production systems into annual agriculture leading to a significant loss of forest and secondary

vegetation, as observed in the literature (Almeida et al. 2010; Diogenes S Alves et al. 2009; Diogenes Salas Alves and Skole 1996; Diogenes Salas Alves et al. 2003; Jakovac et al. 2015)

When analysing the spatial distribution of production systems, cells where production systems are dominated by annual agriculture are concentrated in the South of Rondônia. However, some of these cells are observed in the central portion of the State along the main road BR-364, indicating the expansion of commercial grain crops farther north into the Amazon (Almeida, Coutinho, et al. 2016; Gibbs et al. 2015; Morton et al. 2006; Rudorff et al. 2011; Walker et al. 2009). Therefore, supplementary analysis are needed to identify agricultural production systems to the whole Amazon, able to embed information of initial fronts of grain crops beforehand the establishment of commercial agriculture at large scale.

5.4 Factor analysis of principal components

The analysis of outcomes of principal components, shown in Figure 4, indicate the PCA I and PCA II explain respectively 40,9% and 10,9% of the total variance of attributes. We evaluate the orientation and relative position of attributes' axes, i.e. their spatial organization, relative to PCA I and PCA II. Through this evaluation we verified that relative to axis (I) the extension of the deforested area is more significant in productive systems linked to beef and milk cattle raising, both intensified [IBM] or not intensified [NIBM] systems. The metrics aligned to axis (II), point to a specialization in intensified production system exclusively for meat production [IB], which is indicated by the significant alignment of percentage of pasture land to that axis.

Represented by the axis (III) age and diversity of feature classes were significant, to mention the production systems associated to areas of strict [SA], Dominant [DA] or Coexistence [CA] Agriculture. Production system of Coexistence Agriculture [CA] was reasonably correlated to axis II, and so was strict agriculture [SA] to axis IV (Figure 4). In axis (IV), the shape of deforestation or land use features were elements of emphasis, being the [NIB] production system the most correlated to this axis.

The production system Initial Front [IF] showed high correlation to axis (V), named here the secondary vegetation component. Thus, it can be observed that land uses over less intensified production systems, such as [IF] and [NIB], are enough linked to secondary vegetation (Figure 4). Finally, the axis (VI), was reasonably correlated to metrics of mean distance to

attributes of infrastructure and highways. However, no production system was highly correlated to that axis.

6. Synthesis and conclusion

In this study we analysed landscape metrics applied to deforestation data and land use/cover change data to identify the agricultural production systems, adopting the concept of LULC footprint. This procedure allowed us to infer the occurrence, at a detailed level of analysis, of production systems taking as the starting point land systems footprints left in the territorial configuration.

This proposed methodology based in landscape metric analysis allowed a better spatial explicitation of production systems through the conception of a monitoring tool able to provide information at detailed level and at regular time interval, and only dependable of land use/cover data availability. Such tool can be taken of easy interpretation for decision makers and stakeholders, useful not only for policy building at large scale (e.g. zoning, infrastructure planning, credits and conservation of environmental services), but also for detailed scale (e.g. local zoning and rural planning, stakeholders' network building).

The adoption of a tree classifier turned it possible to adapt a classification method at municipal level to a tree classification at the cellular level. Such adaptation capacity of the method facilitates further explorations to other regions in the Amazon and other places with similar data, opening an umbrella for possibilities of method application.

The LULC footprint concept applied to Rondônia State has followed the same classification pattern to the municipal level, but allowed a consistent change of scale of analysis. Out of nine classes of production systems were identified, being seven classes of agropastoral production systems and two classes of forest domain. These classes presented a spatial configuration distributed into three main regions: forest, cattle raising and agricultural regions.

A total of 2536 cells enclosing Rondônia State were analysed at 10 km resolution, being the majority of cells (60,76%) classified as cattle raising production systems. Out of which 33,00% were classified as intensified and 27,76 % as not intensified production systems. These figures promote the idea that agricultural frontier is partially driven by land

speculation, which is boosted by large portions of forested areas under poor territorial control there are governance; occupied pasture and cropped areas still have significant potential to land use intensification through yield increase with no need for further deforestation.

The cells linked to annual agriculture represented 3,39%, from which 1,81% consisted of co-existence of annual agriculture and cattle raising production systems; and the remaining 1,58% stood for production systems under dominance of annual agriculture.

Among production systems with dominant or strict presence of annual agriculture, as well as with intensified cattle raising, there was a decrease in the presence of secondary vegetation and mosaic occupations. This points to a land intensification process that replaces such land cover usually linked to low productivity and land abandonment to land use types providing significant economic revenue. The usual development paradigm prevents large scale adoption of land use practices like agroforestry that promote vegetation regrowth, and reinforce the benefits of pasture renewal to increase stocking rates or pasture replacement to annual agriculture as land intensification standards. In this context, recent policies of low carbon agriculture, agroforestry and payment for ecosystem services can help spreading practices of more sustainable agricultural systems, and promote the search for a sustainable development paradigm (MAPA 2012b; MAPA et al. 2013)

The remaining 35,85% of cells not belonging to agricultural production systems were predominantly occupied by the Forest Domain. The occurrence of [FD] almost exclusively inside conservation units and their inner borders dominated by [IF] brings the discussion of the need to increase forest conservation actions in Rondônia to guarantee ecosystem services that allow the sustainability of current agricultural production systems. Beyond that, governance over Forest Domain areas must shift from the concept of isolating pristine forest areas to innovative agro-ecological land use/cover systems where human-environmental interactions guarantee and even increase the availability of environmental services.

The principal component analysis shows data variance concentrated in two main axes, but significant correlation of evaluated metrics can be found up to the fifth axis. The alignment of certain groups of metrics to six axes reveals the relative higher importance of pasture and annual agriculture production systems to deforestation and land systems. However, the analysis of such metrics can provide insights and new possibilities for future studies, such as

the use of landscape metrics applied to the temporal series of vegetation indices to reveal intensification process of both vegetation regrowth and traditional land use systems.

It can be concluded that the methodology proposed in this study can be an important tool to develop public policies to promote specific land systems in the Amazon region under different levels of intensification. This is because the presented tool make it possible a spatially explicit evaluation of policy effects on the intensification of agricultural production or forest based systems. The classification and landscape metric analysis of production systems can help strengthening actions to increase pasture and agriculture yield rather than area extent, which by themselves contribute to promote economic development together with food security, ecosystem services and biodiversity.

Annex

Table 3 – Description and characteristics of attributes adopted as landscape metrics.

Source data	Attribute	Description	Measure unit
PRODES	PFO	Percentage of original forest coverage measured as the portion of forest within the cell	%
	PD1997	Percentage of deforestation inside cells in 1997	%
	PD2010	Percentage of deforestation inside cells in 2010	%
	TMD_T1T2	Mean deforestation rate inside cells between 2000 and 2010	%
	IMPRD_T2	Mean age of deforested areas inside cells in 2010	years
	APPRD_T1T2	Mean value of area/perimeter of deforestation polygons inside cells between 2000 and 2010	Index
	NPPRDT2_km ²	Number of deforestation polygons per km ² inside cells until 2010	Unit
	AMPRD_T1T2	Mean area of deforestation polygons inside cells between 2000 and 2010	m ²
TerraClass 2010	ATTCP_T2	TerraClass Production - Total occupied areas inside cells of TerraClass subset of land use classes: annual agriculture, mosaic, dirty pasture, clean pasture, pasture within secondary vegetation and secondary vegetation	m ²
	PTCP_T2	Percentage of deforested area in 2010 occupied by TerraClass Production in 2010	%
	PAATC_T2	Percentage of annual agriculture TerraClass land use inside cells in 2010.	%
	PMOTC_T2	Percentage of mosaic TerraClass land use inside cells in 2010	%

	PPLTC_T2	Percentage of clean pasture TerraClass land use inside cells in 2010	%
	PPSTC_T2	Percentage of dirty pasture TerraClass land use inside cells in 2010.	%
	PRPTC_T2	Percentage pasture within secondary vegetation land use inside cells TerraClass in 2010.	%
	PVSTC_T2	Percentage inside cells occupied by secondary vegetation land use from TerraClass in 2010.	%
	PPTC_T2	Percentage inside cells occupied by total pasture land (sum of land use classes - clean pasture, dirty pasture and pasture within secondary vegetation).	%
	IPPL_T2	Clean pasture Index –the value given by the fraction of clean pasture relative to the sum of dirty pasture plus pasture within secondary vegetation inside cells	Index
	APTCP_T2	Mean value of area/perimeter of TerraClass Production features inside cells in 2010	Index
	NPTCP_T2_km ²	Number of TerraClass production polygons per km ² inside cells in 2010	Unit
	NCTCP_T2	Number of TerraClass production land use classes inside cells in 2010	Unit
	AMTCP_T2	Mean value of area inside cells of TerraClass Production features in 2010	m ²
Distance maps	DMR_T2	Mean value of distance from the cell to the nearest state or federal highway in 2010	m
	DMU_T2	Mean value of distance from the cell to the nearest urban area in 2010	m
	DMA_T2	Mean value distance from the cell to the nearest slaughterhouse granted the official operating license by SIF (Nacional Inspection System)	m
	DML_T2	Mean value distance from the cell to the nearest milk plant production granted the official operating license by SIF	m

Referências Bibliográficas

- Aguiar, A. P. D., Câmara, G., & Escada, M. I. S. (2007). Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity. *Ecological Modelling*, 209(2-4), 169–188. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.06.019
- Almeida, C. A. de, Coutinho, A. C., Esquerdo, J. C. D. M., Adami, M., Venturieri, A., Diniz, C. G., et al. (2016). High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. *Acta Amazonica*, 46(3), 291–302. doi:10.1590/1809-4392201505504
- Almeida, C. A. de, Jr, M. D. O., Dessay, N., Laques, A.-E., Monteiro, A. M. V., Durieux, L., et al. (2016). Typologies and Spatialization of Agricultural Production Systems in Rondônia, Brazil: Linking Land Use, Socioeconomics and Territorial Configuration. *Land*, 5(2), 18. doi:10.3390/land5020018
- Almeida, C. A. de, Valeriano, D. M., Escada, M. I. S., & Rennó, C. D. (2010). Estimativa de área de vegetação secundária na Amazônia Legal Brasileira. *Acta Amazonica*, 40(2), 289–302. <http://www.scielo.br/pdf/aa/v40n2/v40n2a07.pdf>
- Alves, D. S., Escada, M. I. S., Pereira, J. L. G., & Linhares, C. de A. (2003). Land use intensification and abandonment in Rondônia, Brazilian Amazônia. *International Journal of Remote Sensing*, 24(4), 899 – 903. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0143116021000015807>
- Alves, D. S., Morton, D. C., Batistella, M., Roberts, D. A., & Souza, C. (2009). The Changing Rates and Patterns of Deforestation and Land Use in Brazilian Amazonia. In *Amazonia and Global Change* (pp. 11–23). American Geophysical Union. doi:10.1029/2009GM000902
- Alves, D. S., & Skole, D. L. (1996). Characterizing land cover dynamics using multi-temporal imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 17(4), 835–839. doi:10.1080/01431169608949049
- Antrop, M. (2005). Why landscapes of the past are important for the future. *Landscape and Urban Planning*, 70(1–2), 21–34. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.10.002>
- Becker, B. K. (1990). *Amazônia*. (Atica, Ed.). São Paulo.
- Bowman, M. S., Soares-Filho, B. S., Merry, F. D., Nepstad, D. C., Rodrigues, H., & Almeida, O. T. (2012). Persistence of cattle ranching in the Brazilian Amazon: A spatial analysis of the rationale for beef production. *Land Use Policy*, 29(3), 558–568. doi:10.1016/j.landusepol.2011.09.009
- Brasil. Cria os Territórios Federais do Amapá, do Rio Branco, do Guaporé, de Ponta Porã e do Iguassú (1943). Rio de Janeiro. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1937-1946/De15812.htm
- Brasil. Dispõe sobre o Plano de Valorização Econômica da Amazônia, cria a superintendência da sua execução e dá outras providências. (1953). Rio de Janeiro. <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1950-1959/lei-1806-6-janeiro-1953-367342-publicacaooriginal-1-pl.html>
- Brasil. Dispõe sobre o Plano de Valorização Econômica da Amazônia; extingue a Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia (SPVEA), cria a Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM), e dá outras providências. (1966). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L5173.htm

- Brasil. Cria o Estado de Mato Grosso do Sul, e dá outras providências. (1977). Brasília.
https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp31.htm
- Brasil. Cria o Estado de Rondônia, e dá outras providências. (1981). Brasília.
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LCP/Lcp41.htm
- Browder, J. O., Pedlowski, M. A., & Summers, P. M. (2004). Land Use Patterns in the Brazilian Amazon: Comparative Farm-Level Evidence from Rondônia. *Human Ecology*, 32(2), 197–224. doi:10.1023/B:HUEC.0000019763.73998.c9
- Browder, J. O., Pedlowski, M. a., Walker, R., Wynne, R. H., Summers, P. M., Abad, A., et al. (2008). Revisiting Theories of Frontier Expansion in the Brazilian Amazon: A Survey of the Colonist Farming Population in Rondônia's Post-Frontier, 1992-2002. *World Development*, 36(8), 1469–1492. doi:10.1016/j.worlddev.2007.08.008
- Coy, M. (1988). Desenvolvimento regional na periferia amazônica: organização do espaço, conflitos de interesses e programas de planejamento dentro de uma região de "fronteira": O caso de Rondônia. In *Fronteiras* (pp. 167–194). Brasília. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_03_01/37780.pdf
- Cruz, C., Madureira, H., & Marques, J. (2013). Análise espacial e estudo da fragmentação da Paisagem da Aboboreira. *Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, (4), 57–82. doi:10.17127/got/2013.4.003
- de Barros Ferraz, S. F., Vettorazzi, C. A., Theobald, D. M., & Ballester, M. V. R. (2005). Landscape dynamics of Amazonian deforestation between 1984 and 2002 in central Rondônia, Brazil: assessment and future scenarios. *Forest Ecology and Management*, 204(1), 69–85. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.073>
- Espindola, G. M., de Aguiar, A. P. D., Pebesma, E., Câmara, G., & Fonseca, L. (2012). Agricultural land use dynamics in the Brazilian Amazon based on remote sensing and census data. *Applied Geography*, 32(2), 240–252. doi:10.1016/j.apgeog.2011.04.003
- Gadelha, R. M. A. F. (2002). Conquista e ocupação da Amazônia: a fronteira Norte do Brasil. *Estudos Avançados*, 16(45), 63–80. doi:10.1590/S0103-40142002000200005
- Gibbs, H. K., Rausch, L., Munger, J., Schelly, I., Morton, D. C., Noojipady, P., et al. (2015). Brazil's Soy Moratorium. *Science*, 347(6220), 377–378. doi:10.1126/science.aaa0181
- Goosen, M. F. A. (2012). Environmental management and sustainable development. *Procedia Engineering*, 33, 6–13. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1171>
- IBGE. (2012). IBGE Cidades@. <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>. Accessed 27 May 2012
- IDARON. (2013). Levantamento de dados sobre a produção de leite em Rondônia. http://www.idaron.ro.gov.br/Multimedia/downloads/docs/Producao_de_leite_em_Rondonia-divulgacao.pdf. Accessed 19 February 2015
- INPE. (2015a). Projeto PRODES - Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite. <http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodesmunicipal.php>. Accessed 12 August 2015
- INPE. (2015b). TerraView. São José dos Campos. <http://www.dpi.inpe.br/terraview/index.php>
- Jakovac, C. C., Peña-Claros, M., Kuyper, T. W., & Bongers, F. (2015). Loss of secondary-forest

- resilience by land-use intensification in the Amazon. *Journal of Ecology*, 103, 67–77. doi:10.1111/1365-2745.12298
- Johan, O., Xavier, A. D. S., Thibaud, D., Valery, G., Michel, G., Antoine, L., et al. (2012). Utilisation de la télédétection et de données socio-économiques et écologiques pour comprendre l'impact des dynamiques de l'occupation des sols à Pacajá (Brésil). *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 198-199, 8–24. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=26295051>
- Kotsiantis, S. B. (2013). Decision trees: a recent overview. *Artificial Intelligence Review*, 39(4), 261–283. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10462-011-9272-4>
- Kuemmerle, T., Erb, K., Meyfroidt, P., Müller, D., Verburg, P. H., Estel, S., et al. (2013). Challenges and opportunities in mapping land use intensity globally. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(5), 484–493. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2013.06.002>
- Le Clec'h, S., Oszwald, J., Jegou, N., Dufour, S., Cornillon, P.-A., Gonzaga, L., et al. (2013). Cartographier le carbone stocké dans la végétation: perspectives pour la spatialisation d'un service écosystémique. *Bois et forêts des tropiques*, 67, 35–47. http://perso.univ-rennes2.fr/system/files/users/jegou_n/3Leclech316.pdf
- Lemos, M. C., & Roberts, J. T. (2008). Environmental policy-making networks and the future of the Amazon. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 363(1498), 1897–1902. <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/363/1498/1897.abstract>
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., et al. (2007). Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science*, 317(5844), 1513–1516. <http://science.sciencemag.org/content/317/5844/1513.abstract>
- MAPA, M. da A. P. e A. (2012a). *Estatísticas e dados básicos de economia agrícola*. Brasília. <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/estatisticas>
- MAPA, M. da A. P. e A. (2012b). *Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura*. Brasília. <http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimento-sustentavel/plano-abc>
- MAPA, M. da A. P. e A. (2015). Relação de Estabelecimentos Relação de Estabelecimentos. *Relação de Matadouros*. http://sigsif.agricultura.gov.br/sigsif_cons/!ap_estabec_nacional_rep. Accessed 25 August 2015
- MAPA, M. da A. P. e A., MDA, M. do D. A., & MMA, M. do M. A. (2013). Plano nacional de agroecologia e produção orgânica (PLANAPO). <http://www.mda.gov.br/planapo/>. Accessed 1 September 2016
- Marcolan, A. L., Salman, A. K. D., Townsend, C. R., Teixeira, C. A. D., Barbieri, F. da S., Aragão, J. L. de, et al. (2011). *Sistema de produção de leite para Rondônia*. (L. G. Brito, Ed.). Porto Velho. <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/68724/1/Sistemadeproducao-leite.pdf>
- Martins, É. de S., Reatto, A., Carvalho Jr., O. A., & Guimarães, R. F. (2004). *Ecologia de Paisagem: conceitos e aplicações potenciais no Brasil*. (EMBRAPA Cerrados, Ed.) (1st ed.). Planaltina. <https://www.embrapa.br/cerrados/busca-de-publicacoes/-/publicacao/569511/ecologia-de-paisagem-conceitos-e-aplicacoes-potenciais-no-brasil>
- Martins, R. S., Lobo, D. S., da Rocha Júnior, W. F., de Oliveira, H. F., do Carmo Martins, P., & Yamaguchi, L. C. T. (2004). Desenvolvimento de uma ferramenta para a gestão da logística da captação de leite de uma cooperativa agropecuária. *Gestão & Produção*, 11(3), p429–440.

<http://www.scielo.br/pdf/gp/v11n3/a14v11n3>

- Mazoyer, M., & Roudart, L. (2008). *História das agriculturas no mundo. Do neolítico à crise contemporânea*. (UNESP, Ed.). São Paulo. [http://w3.ufsm.br/gpet/files/Historia das agriculturas no mundo - Mazoyer e Roudart.pdf](http://w3.ufsm.br/gpet/files/Historia%20das%20agriculturas%20no%20mundo%20-%20Mazoyer%20e%20Roudart.pdf)
- Mertens, B., Pocard-Chapuis, R., Piketty, M.-G., Lacques, A.-E., & Venturieri, A. (2002). Crossing spatial analyses and livestock economics to understand deforestation processes in the Brazilian Amazon: the case of São Félix do Xingú in South Pará. *Agricultural Economics*, 27(3), 269–294. doi:10.1111/j.1574-0862.2002.tb00121.x
- Morton, D. C., DeFries, R. S., Shimabukuro, Y., Anderson, L. O., Arai, E., del Bon Espirito-Santo, F., et al. (2006). Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(39), 14637–14641. doi:10.1073/pnas.0606377103
- Naveh, Z. (1994). From Biodiversity to Ecodiversity: A Landscape-Ecology Approach to Conservation and Restoration. *Restoration Ecology*, 2(3), 180–189. doi:doi:10.1111/j.1526-100X.1994.tb00065.x
- NIJOS, & OECD. (2002). Agricultural impacts on landscapes : Developing indicators for policy analysis. In W. Dramstad & C. Sogge (Eds.), *Proceedings from NIJOS/OECD Expert Meeting on Agricultural Landscape Indicators* (p. 347). Oslo: Norwegian Ministry of Agriculture. <http://www.skogoglandskap.no/filearchive/nettrapport07-08.pdf>
- Pereira, J. L. G., Batista, G. T., Thalês, M. C., Roberts, D. A., & Venturieri, A. (2001). Métricas da paisagem na caracterização da evolução da ocupação da Amazônia. *Geografia*, 26(1), 59–90. <http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/1907>
- Perz, S. G. (2001). Household demographic factors as life cycle determinants of land use in the Amazon. *Population Research and Policy Review*, 20(3), 159–186. doi:10.1023/A:1010658719768
- Ramankutty, N., Delire, C., & Snyder, P. (2006). Feedbacks between agriculture and climate: An illustration of the potential unintended consequences of human land use activities. *Global and Planetary Change*, 54(1–2), 79–93. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2005.10.005
- Rathmann, R., Szklo, A., & Schaeffer, R. (2010). Land use competition for production of food and liquid biofuels: An analysis of the arguments in the current debate. *Renewable Energy*, 35(1), 14–22. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.025
- Rindfuss, R. R., Walsh, S. J., Turner, B. L., Fox, J., & Mishra, V. (2004). Developing a science of land change: Challenges and methodological issues. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(39), 13976–13981. doi:10.1073/pnas.0401545101
- Rizzo, D., Marraccini, E., Lardon, S., Rapey, H., Debolini, M., Benoît, M., & Thenail, C. (2013). Farming systems designing landscapes: land management units at the interface between agronomy and geography. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 113(2), 71–86. doi:10.1080/00167223.2013.849391
- Rodrigues, M. H. de S., Souza, M. P. de, & Rodrigues, E. C. de S. (2014). Avaliação de desempenho das pequenas propriedades de produtores de leite do município de Jaru – RO. *Latin American Journal of Business Management*, 5(1), 60 – 82. <http://www.lajbm.net/index.php/journal/article/view/185/101>

- Rudorff, B. F. T., Adami, M., Aguiar, D. A., Moreira, M. A., Mello, M. P., Fabiani, L., et al. (2011). The soy moratorium in the Amazon biome monitored by remote sensing images. *Remote Sensing*, 3(1), 185–202. doi:10.3390/rs3010185
- Saito, É. A., Fonseca, L. M. G., Escada, M. I. S., & Korting, T. S. (2011). Efeitos da mudança de escala em padrões de desmatamento na Amazônia - Effects of changes in scale of deforestation patterns in Amazon. *Revista Brasileira de Cartografia*, 63(03), 401–414.
- Shimabukuro, Y., Batista, G. T., Mello, E. M. K., Moreira, J. C., & Duarte, V. (1998). Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon Region. *International Journal of Remote Sensing*, 19(3), 535–541. doi:10.1080/014311698216152
- Silva, M. P. dos S., Câmara, G., Escada, M. I. S., & de Souza, R. C. M. (2008). Remote sensing image mining: detecting agents of land use change in tropical forest areas. *International Journal of Remote Sensing*, 29(16), 4803–4822. doi:10.1080/01431160801950634
- Smadja, D., Touboul, D., Cohen, A., Doveh, E., Santhiago, M. R., Mello, G. R., et al. (2013). Detection of Subclinical Keratoconus Using an Automated Decision Tree Classification. *American Journal of Ophthalmology*, 156(2), 237–246.e1. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ajo.2013.03.034
- Soares Filho, B. S., Cerqueira, G. C., Araújo, W. L., & Voll, E. (2007). Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. *MEGADIVERSIDADE*, 3(1-2), 74–86. http://sp13.conservation.org/global/brasil/publicacoes/Documents/megadiversidade_v3__n1_2__dez_2007.pdf#page=76
- Soares, J. P. G., & Salman, A. K. D. (2005). *Sistema de produção de leite em Rondônia: produção, reprodução, nutrição e alimentação*. Porto Velho. <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/24795/1/rt91-sistemadeproducaodeleite.pdf>
- Soler, L. D. S., Escada, M. I. S., & Verburg, P. H. (2009). Quantifying deforestation and secondary forest determinants for different spatial extents in an Amazonian colonization frontier (Rondonia). *Applied Geography*, 29(2), 182–193. doi:10.1016/j.apgeog.2008.09.005
- Soler, L. D. S., Verburg, P. H., & Alves, D. (2014). Evolution of Land Use in the Brazilian Amazon: From Frontier Expansion to Market Chain Dynamics. *Land*, 3(3), 981–1014. doi:10.3390/land3030981
- Théry, H. (1976). *Rondônia, mutations d'un Territoire fédéral en Amazonie Brésilienne*. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00573787/>
- Théry, H. (1997). Routes et déboisement en Amazonie brésilienne, Rondônia 1974-1996. *Mappemonde*, 97(3), 35–40. <http://www.mgm.fr/PUB/Mappemonde/M397/Thery.pdf>
- Tilman, D., Socolow, R., Foley, J. A., Hill, J., Larson, E., Lynd, L., et al. (2009). Beneficial Biofuels—The Food, Energy, and Environment Trilemma. *Science*, 325(5938), 270–271. <http://science.sciencemag.org/content/325/5938/270.abstract>
- van der Zanden, E. H., Levers, C., Verburg, P. H., & Kuemmerle, T. (2016). Representing composition, spatial structure and management intensity of European agricultural landscapes: A new typology. *Landscape and Urban Planning*, 150, 36–49. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.02.005
- Verburg, P. H., Crossman, N., Ellis, E. C., Heinimann, A., Hostert, P., Mertz, O., et al. (2015). Land

system science and sustainable development of the earth system: A global land project perspective. *Anthropocene*, 12, 29–41. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2015.09.004>

Vizzari, M., & Sigura, M. (2015). Landscape sequences along the urban–rural–natural gradient: A novel geospatial approach for identification and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 140, 42–55. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.04.001>

Wackernagel, M., & Rees, W. (1998). *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth*. New Society Publishers.

Walker, R., DeFries, R., del Carmen Vera-Diaz, M., Shimabukuro, Y., & Venturieri, A. (2009). The expansion of intensive agriculture and ranching in Brazilian Amazonia. In *Geophysical Monograph Series* (Vol. 186, pp. 61–81). American Geophysical Union. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008GM000724/summary>

Zucchi, J. D., Zeng, A. Z., & Caixeta-Filho, J. V. (2011). Optimum location for export-oriented slaughterhouses in Mato Grosso, Brazil: a dynamic mathematical model. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 14(3), 135–148. doi:10.1080/13675567.2011.608653

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les défis posés pour l'élaboration d'une politique de développement durable exigent que l'on connaisse les systèmes productifs agropastoraux qui prédominent dans les espaces agricoles, nous permettant ainsi de vérifier les progrès effectués et les défis à relever dans les domaines du social, de l'économie et de l'environnement de chacun de ces systèmes de production.

Mon projet de thèse a été bâti sur l'hypothèse de l'identification de ces systèmes productifs prédominants aux niveaux municipal et intra-municipal en ayant pour base des données de télédétection satellitaire, des cartes thématiques et des données cadastrales. Les résultats de ce travail ont apporté de nouvelles connaissances à différentes échelles spatiales, en permettant la caractérisation des systèmes de production agropastoraux de l'état de Rondônia, Brésil. Ces résultats contribuent au développement durable de l'Amazonie brésilienne dans la mesure où ils fournissent des outils nécessaires à la planification des politiques publiques pour la région.

L'ensemble des objectifs définis ont été atteints, nous récapitulerons maintenant les acquis de ce travail :

Dans un premier temps, nous avons mis en place une méthodologie générique pour cartographier l'occupation et l'usage du sol à une échelle détaillée et applicable à toute l'Amazonie brésilienne, ce qui nous a permis de construire une base de données sur l'occupation et l'usage du sol dans la partie affectée par la déforestation de l'Amazonie légale brésilienne. Cette base de données rend accessible à toute la communauté scientifique, ainsi qu'aux responsables décideurs une information primordiale.

Cette thèse réalisée dans la continuité du développement du projet *TerraClass*²³ a permis de formaliser et de rendre accessible à la communauté scientifique

²³ *TerraClass* - Projet de cartographie systématique de l'occupation et l'usage des terres déforestées de l'Amazonie légale brésilienne dont **l'auteur de cette thèse** a été, avec les docteurs Adriano Venturieri et Alexandre Camargo Coutinho, co-responsable de sa création et mise en place

internationale la méthodologie développée dans le cadre de ce projet, avec la publication du premier article (Almeida et al. 2016a) qui correspond au chapitre (3). Cette méthodologie s'est montrée adéquate pour cartographier l'usage du sol de l'Amazonie brésilienne. Elle est toujours en application. Jusqu'à ce jour sont disponibles à partir de la page internet du projet *TerraClass* (http://inpe.br/cra/projetos_pesquisas/dados_terraclass.php) les données d'occupation et d'usage du sol pour les années 2004, 2008, 2010, 2012 et 2014.

Ensuite, en utilisant les données cartographiées par le projet *TerraClass* de l'année 2010 pour l'État du Rondônia, Brésil, j'ai construit une méthodologie qui permet d'identifier et de caractériser les systèmes de production agropastorale dominants pour l'ensemble des municipes du Rondônia, en utilisant, outre les données d'occupation et d'usage du sol, les données de déforestation et des données socio-économiques. La méthodologie élaborée a également permis de régionaliser le processus productif agropastoral. Cinq systèmes productifs ont été identifiés, à savoir : Aire de Coexistence (CA) orientés vers la production de céréales avec une forte mécanisation. Elevage Bovin Intensive exclusive pour la viande (IB), Elevage Bovin Intensive mixte pour la viande et lait (IBM), Elevage Bovin Semi Intensive exclusive pour la viande (SIB) et Elevage Bovin Semi Intensive mixte pour la viande et lait (SIBM).

En plus de permettre la régionalisation au niveau du municipe, cette méthodologie offre les moyens de caractériser les divers systèmes productifs, en détectant certains impacts sur les conditions environnementales, sociales et économiques. L'indication principale de cette caractérisation au niveau municipal a été l'identification des changements que chaque système produit dans le paysage, représentant de véritables "empreintes spatiales". Reconnaître ces empreintes, nous a permis d'améliorer l'identification des systèmes productifs à partir des seules métriques de paysage. Cette méthodologie développée et les résultats obtenus par son application à l'étude du cas de Rondônia sont présentés dans le second article (Almeida et al. 2016b) qui compose cette thèse (chapitre 4).

Pour la dernière partie de cette thèse (chapitre 5), les connaissances produites dans le cadre de l'article sur l'identification des différentes "empreintes" de chaque système productif sur le paysage local ont été appliquées sur l'ensemble des données

TerraClass de l'année 2010. Cet apport de connaissances a permis la construction d'une méthodologie capable d'identifier le système de production agropastoral prédominant au niveau intra-municipal, pour l'ensemble des cellules de 10 x 10 km créés pour l'État de Rondônia. Pour cette étude j'ai utilisé des données d'occupation et d'usage du sol, des données de déforestation et des données sur l'infrastructure. La cartographie des systèmes productifs a montré que dans l'État de Rondônia, en 2010, l'élevage de bovin a été majoritaire pour environ 61% des cellules. En ce qui concerne les régions avec une prédominance de systèmes d'élevage bovin intensifiés ou non, la proportion s'est montrée relativement équilibrée avec 33% de cellules d'élevage bovin intensifié et 28% de cellules d'élevage bovin non-intensifié. Le pourcentage dédié exclusivement à la production de viande est très supérieur à celui dédié aux systèmes mixtes de viande et de lait, respectivement, 41% et 20%, l'agriculture mécanisée destinée à la production de céréales prédomine seulement dans environ 3% des cellules, et les 36% restants sont localisés dans des zones préservées ou très peu affectées par la déforestation.

Le rattachement du projet *TerraClass* à l'ensemble des projets qui composent le programme Amazônia de l'INPE (PRODES, DETER et DETEX/DEGRAD) offre comme perspectives la production de données sur l'occupation et l'usage du sol chaque deux ans, permettant une actualisation en continu de l'occupation et de l'usage du sol dans la région.

En parallèle au programme *TerraClass* Biome Amazonien, le partenariat INPE/EMBRAPA a aussi avancé sur le développement du programme *TerraClass* Biome du Cerrado et les données relatives à l'année 2013 sont déjà disponibles pour ce dernier. Dans un proche avenir nous espérons que les légendes associées aux classifications de ces deux produits *TerraClass* puissent devenir tout à fait compatibles, et que les dates d'exécution des cartes soit commune, assurant ainsi une parfaite intégration de ces deux produits. Les nouveaux perfectionnements devraient également permettre de diminuer les temps de traitements de données et améliorer la précision des processus d'extraction ainsi que la divulgation des connaissances.

Les méthodologies développées pour l'identification des systèmes productifs agropastoraux aux niveaux municipal et intra-municipal permettront l'actualisation de

la cartographie de ces systèmes productifs avec une plus grande périodicité, parce que leur construction dépend de l'existence de données socioéconomiques à une échelle détaillée pour la cartographie. De la sorte, nous avons comme perspective immédiate d'appliquer la méthodologie développée aux neuf États de l'Amazonie brésilienne, pour cinq dates prises entre 2004 et 2014. Les résultats nous ont permis d'évaluer l'évolution des systèmes productifs dans la région pour la période 2004 au 2014 et postérieur. Avec l'exécution du programme TerraClass Cerrado se présente la possibilité d'évaluer, et si nécessaire modifier les paramètres permettant l'identification des systèmes productifs de la région la plus dynamique de *l'agro-business* brésilien. Ces acquis permettent d'éclairer les responsables politiques et les décideurs dans le choix des politiques publiques pour un suivi plus effectif de l'évolution des systèmes productifs agropastoraux pour environ 3/4 de la surface du territoire brésilien.

Une autre perspective très intéressante est la coopération initiée avec l'unité TETIS²⁴ par l'entremise du projet TOSCA/CNES AGRIZONE intitulé "De l'image satellite à la carte des systèmes de production" (2016-2017). Ce projet a pour objectif de développer et de tester des méthodes de zonages basés sur l'analyse du paysage et le traitement des images satellitaires pour caractériser les systèmes de production à échelle régionale. Ce projet nous permettra de tester le caractère générique des méthodologies développées dans son cadre, dans deux zones tropicales différentes : au Brésil pour l'État de Tocantins et en Afrique de l'Ouest au Burkina-Faso. Ces travaux ouvriront de nouvelles fenêtres d'opportunité de coopération scientifique entre le Brésil, la France et l'Afrique.

Comme défi futur, nous espérons que les nouvelles avancées méthodologiques portant sur l'extraction des connaissances des images satellites nous permettront une meilleure identification des cibles de petites dimensions. Cela permettra d'établir une cartographie plus précise des activités agropastorales des systèmes économiques de subsistance. Identifier et localiser ces régions est fondamental pour la mise en œuvre

²⁴ TETIS - Unité Mixte de Recherche Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale

de politiques plus équitables d'un point de vue environnemental et social ainsi que vraiment effectives pour le développement des régions agricoles tropicales.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achard, Frédéric, Hugh D Eva, Hans-Jürgen Stibig, Philippe Mayaux, Javier Gallego, Timothy Richards, and Jean-Paul Malingreau. 2002. "Determination of Deforestation Rates of the World's Humid Tropical Forests." *JOUR. Science* 297 (5583): 999–1002. <http://science.sciencemag.org/content/297/5583/999.abstract>.
- Aguiar, Ana Paula Dutra, Jean Pierre Ometto, Carlos Nobre, David Montenegro Lapola, Cláudio Aparecido de Almeida, Ima Célia Vieira, João Viane Soares, et al. 2012. "Modeling the Spatial and Temporal Heterogeneity of Deforestation-Driven Carbon Emissions: The INPE-EM Framework Applied to the Brazilian Amazon." *Global Change Biology* 18 (11): 3346–66. doi:10.1111/j.1365-2486.2012.02782.x.
- Albagli, Sarita. 2010. "Amazônia: Fronteira Geopolítica Da Biodiversidade." *JOUR. Parcerias Estratégicas* 6 (12): 5–19. http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/viewArticle/175.
- Almeida, Cláudio Aparecido de, Alexandre Camargo Coutinho, Júlio César Dalla Mora Esquerdo, Marcos Adami, Adriano Venturieri, Cesar Guerreiro Diniz, Nadine Dessay, Laurent Durieux, and Alessandra Rodrigues Gomes. 2016a. "High Spatial Resolution Land Use and Land Cover Mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 Using Landsat-5/TM and MODIS Data." *Acta Amazonica* 46 (3): 291–302. doi:10.1590/1809-4392201505504.
- Almeida, Cláudio Aparecido de, Moisés De Oliveira Jr, Nadine Dessay, Anne-Elisabeth Laques, Antônio Miguel Vieira Monteiro, Laurent Durieux, Adriano Venturieri, and Frédérique Seyler. 2016b. "Typologies and Spatialization of Agricultural Production Systems in Rondônia, Brazil: Linking Land Use, Socioeconomics and Territorial Configuration." *Land* 5 (2): 18. doi:10.3390/land5020018.
- Almeida, Cláudio Aparecido de, Moisés Mourão De Oliveira Jr, Nadine Dessay, Luciana De Souza Soler, Anne-Elisabeth Laques, Adriano Venturieri, and Frédérique Seyler. 2016c. "LULC Footprints to Identification of Crop, Intensified and Not Intensified Cattle Raising Production Systems in the Brazilian Amazon: A Case Study in Rondônia."
- Almeida, Cláudio Aparecido de, Dalton Morisson Valeriano, Maria Isabel Sobral Escada, and Camilo Daleles Rennó. 2010. "Estimativa de Área de Vegetação Secundária Na Amazônia Legal Brasileira." *Acta Amazonica* 40 (2): 289–302. <http://www.scielo.br/pdf/aa/v40n2/v40n2a07.pdf>.
- Alves, Diogenes Salas, Maria Isabel Sobral Escada, Jorge Luis Gavina Pereira, and Claudia de Albuquerque Linhares. 2003. "Land Use Intensification and Abandonment in Rondônia, Brazilian Amazônia." *International Journal of Remote Sensing* 24 (4): 899–903. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0143116021000015807>.
- Alves, Teresa. 2001. "Paisagem - Em Busca Do Lugar Perdido." *Finisterra* XXXVI (72): 67–74. <http://revistas.rcaap.pt/finisterra/article/download/1622/1317>.
- Amaral, Silvana, Ana Paula Dal'Asta, Newton Brigatti, Carolina Moutinho Duque de Pinho, Liliam César de Castro Medeiros, Pedro Ribeiro de Andrade, Taise F Pinheiro, Pedro Assumpção Alves, Maria Isabel Sobral Escada, and Antônio Miguel Vieira Monteiro. 2013. "Comunidades Ribeirinhas Como Forma Socioespacial de Expressão Urbana Na Amazônia: Uma Tipologia Para a Região Do Baixo Tapajós (Pará-Brasil)." *JOUR. Revista Brasileira de Estudos de*

- População* 30 (2): 367–99. <https://www.rebep.org.br/revista/article/view/366>.
- Antrop, Marc. 2000. "Background Concepts for Integrated Landscape Analysis." *JOUR. Agriculture, Ecosystems & Environment* 77 (1–2): 17–28. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00089-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00089-4).
- Arino, Olivier, Dorit Gross, Franck Ranera, Ludovic Bourg, Marc Leroy, Patrice Bicheron, John Latham, et al. 2007. "GlobCover: ESA Service for Global Land Cover from MERIS." Inproceedings. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International*, 2412–15. doi:10.1109/IGARSS.2007.4423328.
- Arvor, Damien, Vincent Dubreuil, Margareth Simões, and Agnès Bégué. 2012. "Mapping and Spatial Analysis of the Soybean Agricultural Frontier in Mato Grosso, Brazil, Using Remote Sensing Data." *GeoJournal* 78 (5): 833–50. doi:10.1007/s10708-012-9469-3.
- Arvor, Damien, Margareth Meirelles, Vincent Dubreuil, Agnès Bégué, and Yosio Shimabukuro. 2012. "Analyzing the Agricultural Transition in Mato Grosso, Brazil, Using Satellite-Derived Indices." *Applied Geography* 32 (2). Elsevier Ltd: 702–13. doi:10.1016/j.apgeog.2011.08.007.
- Assunção, Juliano, Clarissa Gandour, and Rudi Rocha. 2015. "Deforestation Slowdown in the Brazilian Amazon: Prices or Policies?" *Environment and Development Economics* 20 (6): 697–722. doi:10.1017/S1355770X15000078.
- Bailey, Debra, Felix Herzog, Isabel Augenstein, Stéphanie Aviron, Regula Billeter, Erich Szerencsits, and Jacques Baudry. 2007. "Thematic Resolution Matters: Indicators of Landscape Pattern for European Agro-Ecosystems." *JOUR. Ecological Indicators* 7 (3): 692–709. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.08.001>.
- Barbosa, Fabiano Alvim, Britaldo S. Soares-Filho, Frank D. Merry, Henrique de Oliveira Azevedo, William Leles Souza Costa, Michael Thomas Coe, Evandro Lima da Silveira Batista, et al. 2015. *Cenários Para a Pecuária de Corte Amazônica*. Edited by Editora IGC/UFMG. Belo Horizonte. http://csr.ufmg.br/pecuaria/wp-content/uploads/2015/03/relatorio_cenarios_para_pecuaria_corte_amazonica.pdf?2db211.
- Barlow, Jos, Robert M Ewers, Liana Anderson, Luiz E O C Aragao, Tim R Baker, Emily Boyd, Ted R Feldpausch, et al. 2011. "Using Learning Networks to Understand Complex Systems: A Case Study of Biological, Geophysical and Social Research in the Amazon." *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 86 (2): 457–74. doi:10.1111/j.1469-185X.2010.00155.x.
- Barona, Elizabeth, Navin Ramankutty, Glenn Hyman, and Oliver T Coomes. 2010. "The Role of Pasture and Soybean in Deforestation of the Brazilian Amazon." *Environmental Research Letters* 5 (2): 24002. doi:10.1088/1748-9326/5/2/024002.
- Bartholome, E, A S Belward, F Achard, H Eva, S Fritz, S Bartalev, and P M A Y Aux. 2002. "GLC 2000 Global Land Cover Mapping for the Year 2000 Project Status November 2002." Ispra. https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fbookshop.europa.eu%2Fga%2Fglc-2000-pbEUNA20524%2Fdownloads%2FEU-NA-20524-EN-C%2FEUNA20524ENC_001.pdf%3Bpgid%3Dy8dIS7GUWMdSR0EAIMUUsWb0000k5nTFi7H%3Bsid%3DbZFpo6F5Gb1pp_I7Od_3BMNcIPJ30QO6EcE%3D

- %3FFileName%3DEUNA20524ENC_001.pdf%26SKU%3DEUNA20524ENC_PDF%26CatalogueNumber%3DEU-NA-20524-ENC&ei=FLzPU56LN8i70QX8uYDQAg&usg=AFQjCNG_jLJrJpOUSBtbRYCZ9dYFpk_CFA&sig2=RhcE91gNQ0VXeTQziedG3g.
- Bayona-i-Carrasco, Jordi, and Fernando Gil-Alonso. 2013. "Is Foreign Immigration the Solution to Rural Depopulation? The Case of Catalonia (1996-2009)." *Sociologia Ruralis* 53 (1): 26–51. doi:10.1111/j.1467-9523.2012.00577.x.
- Becker, Bertha K. 2004. *Amazônia: Geopolítica Na Virada Do III Milênio*. BOOK. Editora Garamond.
- . 2007. "Reflexões Sobre a Geopolítica E a Logística Da Soja Na Amazônia." In *Dimensões Humanas Da Biosfera-Atmosfera Na Amazônia*, 176. São Paulo: Edusp.
- Becker, Bertha K. 2005. "Geopolítica Da Amazônia." *Estudos Avançados* 19 (53): 71–86. doi:10.1590/S0103-40142005000100005.
- Becker, Bertha K., Diógenes Alves, and Wanderley da Costa. 2007. *Dimensões Humanas Da Biosfera-Atmosfera Na Amazônia*. Edited by USP. São Paulo.
- Becker, Bertha K, and Claudio Stenner. 2008. *Um Futuro Para a Amazônia*. JOUR. São Paulo: Oficina de Textos.
- Benoît, Marc, Davide Rizzo, Elisa Marraccini, AnnaCamilla Moonen, Mariassunta Galli, Sylvie Lardon, Hélène Rapey, Claudine Thenail, and Enrico Bonari. 2012. "Landscape Agronomy: A New Field for Addressing Agricultural Landscape Dynamics." JOUR. *Landscape Ecology* 27 (10). Springer Netherlands: 1385–94. doi:10.1007/s10980-012-9802-8.
- Bertrand, Georges, and Jean Tricart. 1968. "Paysage et Géographie Physique Globale. Esquisse Méthodologique." *Revue Géographique Des Pyrénées et Du Sud-Ouest* 39 (3): 249–72. doi:10.3406/rgpso.1968.4553.
- Binswanger, Hans P. 1991. "Brazilian Policies That Encourage Deforestation in the Amazon." JOUR. *World Development* 19 (7): 821–29. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0305-750X(91)90135-5.
- Bontemps, Sophie, Pierre Defourny, and Van Bogaert Eric. 2010. "GLOBCOVER 2009 Products Report Description and Authors." http://due.esrin.esa.int/globcover/LandCover2009/GLOBCOVER2009_Validation_Report_1.0.pdf.
- Boucher, Doug, Sarah Roquemore, and Estrellita Fitzhugh. 2013. "Brazil ' S Success in Reducing Deforestation." *Tropical Conservation Science* 6 (3): 426–45. [http://tropicalconservationscience.mongabay.com/content/v6/TCS-2013_Vol_6\(3\)_426-445-Boucher_et_al.pdf](http://tropicalconservationscience.mongabay.com/content/v6/TCS-2013_Vol_6(3)_426-445-Boucher_et_al.pdf).
- Bowman, Maria S., Britaldo S. Soares-Filho, Frank D. Merry, Daniel C. Nepstad, Hermann Rodrigues, and Oriana T. Almeida. 2012. "Persistence of Cattle Ranching in the Brazilian Amazon: A Spatial Analysis of the Rationale for Beef Production." *Land Use Policy* 29 (3). Elsevier Ltd: 558–68. doi:10.1016/j.landusepol.2011.09.009.
- Brown, Daniel G., and Jiunn-Der Duh. 2004. "Spatial Simulation for Translating from Land Use to Land Cover." JOUR. *International Journal of Geographical Information Science* 18 (1). Taylor & Francis: 35–60. doi:10.1080/13658810310001620906.
- Brown, J Christopher, Jude H Kastens, Alexandre Camargo Coutinho, Daniel de Castro Victoria, and Christopher R Bishop. 2013. "Classifying Multiyear Agricultural Land Use Data from Mato Grosso Using Time-Series MODIS

- Vegetation Index Data.” *JOUR. Remote Sensing of Environment* 130 (0): 39–50. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.11.009>.
- Callède, Jacques, Gérard Cochonneau, Fabricio Vieira Alves, Jean-Loup Guyot, Valdemar Santos Guimarães, and Eurides De Oliveira. 2010. “Les Apports En Eau de l’Amazonie À l’Océan Atlantique.” *Revue Des Sciences de L’eau* 23 (3): 247. doi:[10.7202/044688ar](https://doi.org/10.7202/044688ar).
- Carrão, Hugo Miguel Saiote, Mário Caetano, and Nuno Neves. 2001. “LANDIC - Cálculo de Indicadores de Paisagem Em Ambiente SIG.” In *Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica - Esig 2001*, 11. Lisboa. http://www.researchgate.net/profile/Hugo_Carrao/publication/228987633_LANDIC_calculo_de_indicadores_de_paisagem_em_ambiente_SIG/links/0c9605267c336422fb000000.pdf.
- Carreiras, João M B, José M C Pereira, Manuel L Campagnolo, and Yosio E Shimabukuro. 2006. “Assessing the Extent of Agriculture/pasture and Secondary Succession Forest in the Brazilian Legal Amazon Using SPOT VEGETATION Data.” *JOUR. Remote Sensing of Environment* 101 (3): 283–98. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.12.017>.
- Chambouleyron, Rafael. 2006. “Plantações, Sesmarias E Vilas. Uma Reflexão Sobre a Ocupação Da Amazônia Seiscentista.” *Nuevo Mundo Mundos Nuevos*, May. doi:[10.4000/nuevomundo.2260](https://doi.org/10.4000/nuevomundo.2260).
- Chen, Jun, Jin Chen, Anping Liao, Xin Cao, Lijun Chen, Xuehong Chen, Chaoying He, et al. 2015. “Global Land Cover Mapping at 30 M Resolution: A POK-Based Operational Approach.” *JOUR. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 103 (May): 7–27. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002>.
- Chomitz, Kenneth, and Timothy S Thomas. 2001. *Geographic Patterns of Land Use and Land Intensity in the Brazilian Amazon*. Policy Research Working Papers. New York: The World Bank. doi:[10.1596/1813-9450-2687](https://doi.org/10.1596/1813-9450-2687).
- Colson, Filip, Jan Bogaert, and Reinhart Ceulemans. 2011. “Fragmentation in the Legal Amazon, Brazil: Can Landscape Metrics Indicate Agricultural Policy Differences?” *JOUR. Ecological Indicators* 11 (5): 1467–71. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.12.020>.
- D’Agostini, S, S Bacilieri, N Vitiello, H Hojo, M C V Bilynskyj, A Batista Filho, and M M Rebouças. 2003. “Ciclo Econômico Da Borracha–Seringueira Hevea Brasiliensis (Hbk) M. Arg.” *JOUR. O Biológico* 70 (2): 205–6. http://www.biologico.sp.gov.br/docs/pag/v9_1/dagostini3.pdf.
- DGAGRI, C. E., C. E. Eurostat, and C. E. Ispra. 2000. *FROM LAND COVER TO LANDSCAPE DIVERSITY IN THE EUROPEAN UNION*. Bruxelas. <http://ec.europa.eu/agriculture/publi/reports/corine2000.pdf>.
- Di Gregorio, Antonio. 2005. *Land Coverclassification System: Classification Concepts and User Manual. Software Version 2.. RPRT*. Rome: FAO, Roma (Italia). http://www.glc.n.org/downs/pub/docs/manuals/lccs/LCCS2-manual_en.pdf.
- Dias, Livia C P, Fernando M Pimenta, Ana B Santos, Marcos H Costa, and Richard J Ladle. 2016. “Patterns of Land Use, Extensification, and Intensification of Brazilian Agriculture.” *JOUR. Global Change Biology*, May, n/a-n/a. doi:[10.1111/gcb.13314](https://doi.org/10.1111/gcb.13314).
- Droulers, Martine, François-Michel Le Tourneau, and Luciana Machado. 2001. “Conflits D’usage de L’espace Au Rondônia (Amazonie Brésilienne).” *Cybergeo*, August. doi:[10.4000/cybergeo.3772](https://doi.org/10.4000/cybergeo.3772).
- Erb, K-H, S Luyssaert, P Meyfroidt, J Pongratz, A Don, S Kloster, T Kuemmerle, et al.

2016. "Land Management: Data Availability and Process Understanding for Global Change Studies." *JOUR. Global Change Biology*, July, n/a-n/a. doi:10.1111/gcb.13443.
- Espindola, G. M., Ana Paula D. de Aguiar, Edzer Pebesma, Gilberto Câmara, and Leila Fonseca. 2012. "Agricultural Land Use Dynamics in the Brazilian Amazon Based on Remote Sensing and Census Data." *Applied Geography* 32 (2). Elsevier Ltd: 240–52. doi:10.1016/j.apgeog.2011.04.003.
- Espírito-Santo, F D B, Yosio Shimabukuro, and T M Kuplich. 2005. "Mapping Forest Successional Stages Following Deforestation in Brazilian Amazonia Using Multi-temporal Landsat Images." *JOUR. International Journal of Remote Sensing* 26 (3). Taylor & Francis: 635–42. doi:10.1080/0143116042000274078.
- Euclides, Valéria Pacheco Batista. 2001. "Produção Intensiva de Carne Bovina Em Pasto." *JOUR. In Simpósio de Produção de Gado de Corte*, 2:55–82. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. <http://www.cnpqg.embrapa.br/~val/boiverdeamarelo/simcorte2.html>.
- Eurostat, C E. 2000. *Manuel Des Concepts Relatifs Aux Systèmes D'information Sur L'occupation et L'utilisation Des Sols*. *JOUR. Edited by Communautés Européenes. Groupe de travail "Statistiques de l'Utilisation Des Sols"-Document de Travail-Luxembourg-2000-96 P.; 92 P. Luxembourg.* <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/5854893/KS-34-00-407-FR.PDF/3db72830-b117-46d5-a5f4-1c8d76da1eaf?version=1.0>.
- Eva, Hugh, Silvia Carboni, Frédéric Achard, Nicolas Stach, Laurent Durieux, Jean-François Faure, and Danilo Mollicone. 2010. "Monitoring Forest Areas from Continental to Territorial Levels Using a Sample of Medium Spatial Resolution Satellite Imagery." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 (2). Elsevier B.V.: 191–97. doi:10.1016/j.isprsjprs.2009.10.008.
- Fearnside, Philip M. 2006. "Desmatamento Na Amazônia: Dinâmica, Impactos E Controle." *Acta Amazônica* 36 (3). SciELO Brasil: 395–400. <http://www.scielo.br/pdf/aa/v36n3/v36n3a18>.
- Ferreira, Leandro Valle, Eduardo Venticinque, and Samuel Almeida. 2005. "O Desmatamento Na Amazônia E a Importância Das Áreas Protegidas." *JOUR. Estudos Avançados*. scielo. http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142005000100010&script=sci_arttext&tIng=pt.
- Ferreira, Sylvio Mario Puga, and Pedro Paulo Zahluth Bastos. 2016. "As Origens Da Política Brasileira de Desenvolvimento Regional: O Caso Da Superintendência Da Valorização Econômica Da Amazônia (SPVEA)." *JOUR.* <http://www.eco.unicamp.br/docprod/downarq.php?id=3461&tp=a>.
- Folefack, Achille Jean Jaza. 2015. "The Rural Exodus of Young Farmers and Its Impact on the Shortage of Labor and Food Crop Production in Cameroon: A Computable General Equilibrium Model's Analysis." *JOUR. Journal of Human Ecology* 49 (3): 197–210. [http://www.krepublishers.com/02-Journals/JHE/JHE-49-0-000-15-Web/JHE-49-3-000-15-Abst-PDF/JHE-49-3-197-15-2692-Folefack-A-J-J/JHE-49-3-197-15-2692-Folefack-A-J-J-Tx\[4\].pdf](http://www.krepublishers.com/02-Journals/JHE/JHE-49-0-000-15-Web/JHE-49-3-000-15-Abst-PDF/JHE-49-3-197-15-2692-Folefack-A-J-J/JHE-49-3-197-15-2692-Folefack-A-J-J-Tx[4].pdf).
- Foley, Jonathan a, Ruth Defries, Gregory P Asner, Carol Barford, Gordon Bonan, Stephen R Carpenter, F Stuart Chapin, et al. 2005. "Global Consequences of Land Use." *Science (New York, N.Y.)* 309 (5734): 570–74. doi:10.1126/science.1111772.
- Forman, Richard T. T. 1995. "Some General Principles of Landscape and Regional Ecology." *Landscape Ecology* 10 (3): 133–42. doi:10.1007/BF00133027.

- Friedl, Mark A., Damien Sulla-Menashe, Bin Tan, Annemarie Schneider, Navin Ramankutty, Adam Sibley, and Xiaoman Huang. 2010. "MODIS Collection 5 Global Land Cover: Algorithm Refinements and Characterization of New Datasets." *Remote Sensing of Environment* 114 (1): 168–82. doi:10.1016/j.rse.2009.08.016.
- Frohn, Robert C, and Yongping Hao. 2006. "Landscape Metric Performance in Analyzing Two Decades of Deforestation in the Amazon Basin of Rondonia, Brazil." *JOUR. Remote Sensing of Environment* 100 (2): 237–51. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.026.
- Gadella, Regina Maria A Fonseca. 2002. "Conquista E Ocupação Da Amazônia: A Fronteira Norte Do Brasil." *JOUR. Estudos Avançados* 16 (45). scielo: 63–80. doi:10.1590/S0103-40142002000200005.
- Gibbs, H. K., L Rausch, J Munger, I Schelly, Douglas C Morton, P Noojipady, B. Soares-Filho, Paulo Barreto, L Micol, and N F Walker. 2015. "Brazil's Soy Moratorium." *Science* 347 (6220): 377–78. doi:10.1126/science.aaa0181.
- Giri, C, B Pengra, J Long, and T R Loveland. 2013. "Next Generation of Global Land Cover Characterization, Mapping, and Monitoring." *JOUR. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 25 (December): 30–37. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.03.005.
- Godar, Javier, Toby a Gardner, E Jorge Tizado, and Pablo Pacheco. 2014. "Actor-Specific Contributions to the Deforestation Slowdown in the Brazilian Amazon." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (43): 15591–96. doi:10.1073/pnas.1322825111.
- Gomes, Alexandre Lopes, and Joaquim Bento de Souza Ferreira Filho. 2007. "Economias de Escala Na Produção de Leite: Uma Análise Dos Estados de Rondônia, Tocantins E Rio de Janeiro." *JOUR. Revista de Economia E Sociologia Rural* 45 (3). scielo: 591–619. doi:10.1590/S0103-20032007000300003.
- Hansen, M C, P V Potapov, R Moore, M Hancher, S A Turubanova, A Tyukavina, D Thau, et al. 2013. "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change." *JOUR. Science* 342 (6160): 850–53. http://science.sciencemag.org/content/342/6160/850.abstract.
- Hansen, Matthew C., and Thomas R. Loveland. 2012. "A Review of Large Area Monitoring of Land Cover Change Using Landsat Data." *Remote Sensing of Environment* 122 (July). Elsevier Inc.: 66–74. doi:10.1016/j.rse.2011.08.024.
- Homma, Alfredo Kingo Oyama. 2005. "Amazônia: Como Aproveitar Os Benefícios Da Destruição?" *Estudos Avançados* 19 (54): 115–35. doi:10.1590/S0103-40142005000200007.
- IBGE. 2012. "IBGE Cidades@." http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php.
- . 2016. "Estimativas Populacionais Para Os Municípios Brasileiros." http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2014/default.shtm.
- IDARON. 2013. "Levantamento de Dados Sobre a Produção de Leite Em Rondônia." http://www.idaron.ro.gov.br/Multimedia/downloads/docs/Producao_de_leite_em_Rondonia-divulgacao.pdf.
- INPE. 2011. "Projeto TERRACLASS - Dados 2008." http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraaclass.php.
- . 2015. "Projeto PRODES - Monitoramento Da Floresta Amazônica Brasileira Por Satélite." http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodesmunicipal.php.
- IPCC. 2013. "Climate Change 2013, the Physical Science Basis." https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-

- report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf.
- Jakovac, Catarina C., Marielos Peña-Claros, Thomas W. Kuyper, and Frans Bongers. 2015. "Loss of Secondary-Forest Resilience by Land-Use Intensification in the Amazon." *Journal of Ecology* 103: 67–77. doi:10.1111/1365-2745.12298.
- Jensen, John R. 2009. *Sensoriamento Remoto Do Ambiente*. Edited by Parêntese Editora. 2a ed. São José dos Campos.
- Kerr, Jeremy T., and Marsha Ostrovsky. 2003. "From Space to Species: Ecological Applications for Remote Sensing." *Trends in Ecology & Evolution* 18 (6): 299–305. doi:10.1016/S0169-5347(03)00071-5.
- Kim, Do-hyung, Joseph O Sexton, Praveen Noojipady, Chengquan Huang, Anupam Anand, Saurabh Channan, Min Feng, and John R Townshend. 2014. "Remote Sensing of Environment Global , Landsat-Based Forest-Cover Change from 1990 to 2000." *Remote Sensing of Environment* 155. Elsevier Inc.: 178–93. doi:10.1016/j.rse.2014.08.017.
- Kotsiantis, Sotiris B. 2013. "Decision Trees: A Recent Overview." *JOUR. Artificial Intelligence Review* 39 (4). Springer: 261–83. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10462-011-9272-4>.
- Lambin, Eric F., Patrick Meyfroidt, Ximena Rueda, Allen Blackman, Jan Börner, Paolo Omar Cerutti, Thomas Dietsch, et al. 2014. "Effectiveness and Synergies of Policy Instruments for Land Use Governance in Tropical Regions." *Global Environmental Change* 28 (September): 129–40. doi:10.1016/j.gloenvcha.2014.06.007.
- Laurance, William F, Ana K M Albernaz, Götz Schroth, Philip M Fearnside, Scott Bergen, Eduardo M Venticinque, and Carlos Da Costa. 2002. "Predictors of Deforestation in the Brazilian Amazon." *JOUR. Journal of Biogeography* 29 (5–6). Blackwell Science Ltd: 737–48. doi:10.1046/j.1365-2699.2002.00721.x.
- Lausch, A., and F. Herzog. 2002. "Applicability of Landscape Metrics for the Monitoring of Landscape Change: Issues of Scale, Resolution and Interpretability." *Ecological Indicators* 2 (1–2): 3–15. doi:10.1016/S1470-160X(02)00053-5.
- Lausch, A, L Bannehr, M Beckmann, C Boehm, H Feilhauer, J M Hacker, M Heurich, et al. 2016. "Linking Earth Observation and Taxonomic, Structural and Functional Biodiversity: Local to Ecosystem Perspectives." *JOUR. Ecological Indicators* 70 (November): 317–39. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.022.
- Le Tourneau, François-Michel. 2015. "Le Brésil Maîtrise-T-Il (Enfin) La Déforestation En Amazonie ?" *Cybergeo*, December. doi:10.4000/cybergeo.27325.
- Lima, Deborah, and Jorge Pozzobon. 2005. "Amazônia Socioambiental: Sustentabilidade Ecológica E Diversidade Social." *JOUR. Estudos Avançados*. scielo.
- Lu, Dengsheng, Guiying Li, Emilio Moran, and Scott Hetrick. 2013. "Spatiotemporal Analysis of Land-Use and Land-Cover Change in the Brazilian Amazon." *JOUR. International Journal of Remote Sensing* 34 (16): 5953–78. doi:10.1080/01431161.2013.802825.
- Machado, Luciana de Oliveira Rosa. 2009. "DESFLORRESTAMENTO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA: Ação Coletiva , Governança E Governabilidade Em Área de Fronteira." *Sociedade E Estado* 24 (1): 115–47. <http://www.scielo.br/pdf/se/v24n1/a06v24n1>.
- MAPA, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. 2016. "Relatório Quantitativo de Animais Abatidos Por Categoria E UF." <http://www.agricultura.gov.br/servicos-e-sistemas/sistemas/sif>.
- Marcolan, Alaerto Luiz, Ana Karina Dias Salman, Claudio Ramalho Townsend, César

- Augusto Domingues Teixeira, Fábio da Silva Barbieri, José Lima de Aragão, Leonardo Ventura de Araújo, and Luciana Gatto Brito. 2011. *Sistema de Produção de Leite Para Rondônia*. Edited by Luciana Gatto Brito. Porto Velho. <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/68724/1/Sistemadeproducao-leite.pdf>.
- Margono, Belinda Arunarwati, Svetlana Turubanova, Ilona Zhuravleva, Peter Potapov, Alexandra Tyukavina, Alessandro Baccini, Scott Goetz, and Matthew C Hansen. 2012. "Mapping and Monitoring Deforestation and Forest Degradation in Sumatra (Indonesia) Using Landsat Time Series Data Sets from 1990 to 2010." *Environmental Research Letters* 7 (3): 34010. doi:10.1088/1748-9326/7/3/034010.
- Margulis, Sergio. 2003. "Causes of Deforestation of the Brazilian Amazon." World Bank Working Papers. Washington: The World Bank. doi:10.1596/0-8213-5691-7.
- Marsden, Terry, Richard Munton, Neil Ward, and Sarah Whatmore. 1996. "Agricultural Geography and the Political Economy Approach: A Review." *JOUR. Economic Geography* 72 (4). Clark University: 361–75. doi:10.2307/144519.
- Mayaux, P, H Eva, J Gallego, A H Strahler, M Herold, S Agrawal, S Naumov, et al. 2006. "Validation of the Global Land Cover 2000 Map." *JOUR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. doi:10.1109/TGRS.2006.864370.
- Mertens, B, R Pocard-Chapuis, M.-G. Piketty, A.-E. Lacques, and Adriano Venturieri. 2002. "Crossing Spatial Analyses and Livestock Economics to Understand Deforestation Processes in the Brazilian Amazon: The Case of São Félix Do Xingú in South Pará." *JOUR. Agricultural Economics* 27 (3). Blackwell Publishing Ltd: 269–94. doi:10.1111/j.1574-0862.2002.tb00121.x.
- Metzger, Jean Paul. 2001. "O QUE É ECOLOGIA DE PAISAGENS ?" *Biotaneotropica* 1 (12): 1–9. <http://www.scielo.br/pdf/bn/v1n1-2/a06v1n1-2.pdf>.
- Monteiro, Maurílio de Abreu. 2005. "Meio Século de Mineração Industrial Na Amazônia E Suas Implicações Para O Desenvolvimento Regional." *Estudos Avançados* 19 (53): 187–207. doi:10.1590/S0103-40142005000100012.
- Morton, Douglas C, Ruth S DeFries, Yosio Shimabukuro, Liana O Anderson, Egidio Arai, Fernando del Bon Espirito-Santo, Ramon Freitas, and Jeff Morissette. 2006. "Cropland Expansion Changes Deforestation Dynamics in the Southern Brazilian Amazon." *JOUR. Proceedings of the National Academy of Sciences* 103 (39): 14637–41. doi:10.1073/pnas.0606377103.
- Mucher, C., T.J. Stomph, and L.O. Fresco. 1993. *Proposal for a Global Land Use Classification*. Edited by FAO. Rome. <http://edepot.wur.nl/296827>.
- Nagendra, Harini, and Duccio Rocchini. 2008. "High Resolution Satellite Imagery for Tropical Biodiversity Studies: The Devil Is in the Detail." *Biodiversity and Conservation* 17 (14): 3431–42. doi:10.1007/s10531-008-9479-0.
- Naveh, Z. 1994. "From Biodiversity to Ecodiversity: A Landscape-Ecology Approach to Conservation and Restoration." *Restoration Ecology* 2 (3): 180–89. doi:doi:10.1111/j.1526-100X.1994.tb00065.x.
- Nepstad, Daniel, David McGrath, Claudia Stickler, Ane Alencar, Andrea Azevedo, Briana Swette, Tathiana Bezerra, et al. 2014. "Slowing Amazon Deforestation through Public Policy and Interventions in Beef and Soy Supply Chains." *JOUR. Science* 344 (6188): 1118–23. <http://science.sciencemag.org/content/344/6188/1118.abstract>.
- NIJOS, and OECD. 2002. "Agricultural Impacts on Landscapes : Developing Indicators for Policy Analysis." In *Proceedings from NIJOS/OECD Expert Meeting on*

- Agricultural Landscape Indicators*, edited by W Dramstad and C Sogge, 347. Oslo: Norwegian Ministry of Agriculture. <http://www.skogoglandskap.no/filearchive/nettrapport07-08.pdf>.
- Novo, Evelyn M. L. de Moraes. 2008. *Sensoriamento Remoto Princípios E Aplicações*. Edited by Editora Blucher. 3^a. São José dos Campos.
- Oliveira, Ronaldo Lopes, Marco Aurélio Alves de Freitas Barbosa, Márcio Machado Ladeira, Manoel Messias Perira da Silva, Adley Camargo Ziviani, and Adriana Regina Bagaldo. 2006. "Nutrição E Manejo de Bovinos de Corte Na Fase de Cria." *JOUR. Revista Brasileira de Saúde E Produção Animal*; Vol. 7, No 1 (2006) 7 (1): 57–86. <http://revistas.ufba.br/index.php/rbspa/article/view/706/451>.
- Pacheco, Pablo. 2012. "Actor and Frontier Types in the Brazilian Amazon: Assessing Interactions and Outcomes Associated with Frontier Expansion." *JOUR. Geoforum* 43 (4): 864–74. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoforum.2012.02.003>.
- Pacheco, Pablo, and Rene Pocard-Chapuis. 2012. "The Complex Evolution of Cattle Ranching Development Amid Market Integration and Policy Shifts in the Brazilian Amazon." *JOUR. Annals of the Association of American Geographers* 102 (6). Routledge: 1366–90. doi:10.1080/00045608.2012.678040.
- Paes-de-Souza, Mariluce, Mário M Amin, and Sebastião Teixeira Gomes. 2009. "Agronegócio Leite: Características Da Cadeia Produtiva Do Estado de Rondônia." *JOUR. Revista de Administração E Negócios Da Amazônia* 1 (1): 1–20.
- Pecqueur, Bernard. 2014. "Esquisse D ' Une Géographie Économique Territoriale." *L ' Espace Géographique* 43 (3): 198–214. <http://www.cairn.info/revue-espace-geographique-2014-3-page-198.htm>.
- Pereira, Henrique Miguel, Laetitia Marie Navarro, and Inês Santos Martins. 2012. "Global Biodiversity Change: The Bad, the Good, and the Unknown." *JOUR. Annual Review of Environment and Resources* 37 (1). Annual Reviews: 25–50. doi:10.1146/annurev-environ-042911-093511.
- Pereira, Jorge Luis Gavina, Getulio Teixeira Batista, Marcelo Cordeiro Thalês, Dar A Roberts, and Adriano Venturieri. 2001. "Métricas Da Paisagem Na Caracterização Da Evolução Da Ocupação Da Amazônia." *Geografia* 26 (1): 59–90. <http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/1907>.
- Piketty, Marie-Gabrielle, Jonas Bastos da Veiga, Jean-François Tourrand, Alice Margarida Negreiros Alves, René Pocard-Chapuis, and Marcelo Thales. 2005. "Les Déterminants de L'expansion de L'élevage Bovin En Amazonie Orientale: Conséquences Pour Les Politiques Publiques." *JOUR. Cahiers Agricultures* 14 (1): 90–95. <http://revues.cirad.fr/index.php/cahiers-agricultures/article/view/30494/30254>.
- Pocard-Chapuis, René, J-F Tourrand, M-G Piketty, and J B da Veiga. 2001. "Cadeia Produtiva de Gado de Corte E Pecuarização Da Agricultura Familiar Na Transamazônica." *JOUR. Embrapa Amazônia Oriental*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/402938/1/OrientalDoc106.PDF>.
- Ponzoni, Flavio Jorge, Yosio Shimabukuro, and Tatiana Mora Kuplich. 2012. *Sensoriamento Remoto Da Vegetação*. Edited by Oficina de Textos. 2nded. São Paulo.
- Prates, Rodolfo Coelho, and Carlos José Caetano Bacha. 2011. "Os Processos de Desenvolvimento E Desmatamento Da Amazônia." *Economia E Sociedade* 20 (3):

- 601–36. <http://www.scielo.br/pdf/ecos/v20n3/a06v20n3.pdf>.
- Prestele, Reinhard, Peter Alexander, Mark D A Rounsevell, Almut Arneth, Katherine Calvin, Jonathan Doelman, David A Eitelberg, et al. 2016. “Hotspots of Uncertainty in Land-Use and Land-Cover Change Projections: A Global-Scale Model Comparison.” *JOUR. Global Change Biology*, June, n/a-n/a. doi:10.1111/gcb.13337.
- Ribeiro, Barbara Maria Giacom. 2015. “Mapping Informal Settlements Using WorldView-2 Imagery and C4.5 Decision Tree Classifier.” *CONF. In 2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 1–4. IEEE. doi:10.1109/JURSE.2015.7120470.
- Riitters, K H, R V O’Neill, C T Hunsaker, J D Wickham, D H Yankee, S P Timmins, K B Jones, and B L Jackson. 1995. “A Factor Analysis of Landscape Pattern and Structure Metrics.” *JOUR. Landscape Ecology* 10 (1). Kluwer Academic Publishers: 23–39. doi:10.1007/BF00158551.
- Riva, Fabiana Rodrigues, Higor Coreldiro, and Patricia Ferreira Costa. 2008. “Fatores De Produção No Arranjo Produtivo Local Leite–Apl Leite No Município De Jaru Em Rondônia.” *CONF. In 46th Congress, July 20-23, 2008, Rio Branco, Acre, Brasil. Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER)*. <http://sober.org.br/palestra/9/713.pdf>.
- Rivero, Sérgio, Oriana Almeida, Saulo Ávila, and Wesley Oliveira. 2009. “Pecuária E Desmatamento: Uma Análise Das Principais Causas Diretas Do Desmatamento Na Amazônia.” *JOUR. Nova Economia* 19. scielo: 41–66. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-63512009000100003.
- Rodrigues, Márcio Heleno de Souza, Mariluce Paes de Souza, and Eder Carlos de Souza Rodrigues. 2014. “Avaliação de Desempenho Das Pequenas Propriedades de Produtores de Leite Do Município de Jaru – RO.” *Latin American Journal of Business Management* 5 (1): 60–82. <http://www.lajbm.net/index.php/journal/article/view/185/101>.
- Rozon, Christine, Marc Lucotte, Robert Davidson, Serge Paquet, Jordan Sky Oestreicher, Frédéric Mertens, Carlos José Sousa Passos, and Christine Romana. 2015. “Spatial and Temporal Evolution of Family-Farming Land Use in the Tapajós Region of the Brazilian Amazon.” *Acta Amazonica* 45 (2). scielo: 203–14. doi:10.1590/1809-4392201401384.
- Rudorff, Bernardo Friedrich Theodor, Marcos Adami, Daniel Alves Aguiar, Maurício Alves Moreira, Marcio Pupin Mello, Leandro Fabiani, Daniel Furlan Amaral, and Bernardo Machado Pires. 2011. “The Soy Moratorium in the Amazon Biome Monitored by Remote Sensing Images.” *Remote Sensing* 3 (1): 185–202. doi:10.3390/rs3010185.
- Rudorff, Bernardo Friedrich Theodor, Daniel Alves de Aguiar, Wagner Fernando da Silva, Luciana Miura Sugawara, Marcos Adami, and Mauricio Alves Moreira. 2010. “Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data.” *Remote Sensing* 2 (4): 1057–76. doi:10.3390/rs2041057.
- Rufin, Philippe, Hannes Müller, Dirk Pflugmacher, and Patrick Hostert. 2015. “Land Use Intensity Trajectories on Amazonian Pastures Derived from Landsat Time Series.” *JOUR. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 41 (September): 1–10. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2015.04.010>.

- Santos, Ednaldo Tartaglia, and Sorhaya Chediak. 2015. "AMAZÔNIA GAÚCHA: UM ESTUDO SOCIOLINGUÍSTICO EM VILHENA-RO." *JOUR. Revista de Letras Norte@Mentos* 8 (16). <http://sinop.unemat.br/projetos/revista/index.php/norteamentos/article/view/1861/1501>.
- Sexton, Joseph O, Xiao-Peng Song, Min Feng, Praveen Noojipady, Anupam Anand, Chengquan Huang, Do-Hyung Kim, et al. 2013. "Global, 30-M Resolution Continuous Fields of Tree Cover: Landsat-Based Rescaling of MODIS Vegetation Continuous Fields with Lidar-Based Estimates of Error." *JOUR. International Journal of Digital Earth* 6 (5). Taylor & Francis: 427–48. doi:10.1080/17538947.2013.786146.
- Silva, Ricardo Gilson da Costa. 2014. "A Regionalização Do Agronegócio Da Soja Em Rondônia." *JOUR. GEOUSP: Espaço E Tempo (Online)*; v. 18, N. 2 (2014), September. <http://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/84534>.
- Silva, Maria Aparecida da, and Odete Burgeile. 2014. "A POLÍTICA DE MIGRAÇÃO E COLONIZAÇÃO NA AMAZÔNIA E EM RONDÔNIA E AS DIVERSAS FORMAS DE SE PENSAR ESTA REGIÃO SOB OS VIÉS POLÍTICO E ECONÔMICO." *Revista Labirinto* 21: 383–99. <http://www.periodicos.unir.br/index.php/LABIRINTO/article/view/1238>.
- Šimová, Petra, and Kateřina Gdulová. 2012. "Landscape Indices Behavior: A Review of Scale Effects." *JOUR. Applied Geography* 34 (May): 385–94. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.01.003>.
- Soler, Luciana De Souza, and Peter H. Verburg. 2010. "Combining Remote Sensing and Household Level Data for Regional Scale Analysis of Land Cover Change in the Brazilian Amazon." *Regional Environmental Change* 10: 371–86. doi:10.1007/s10113-009-0107-7.
- Soler, Luciana De Souza, Peter H. Verburg, and Diógenes Alves. 2014. "Evolution of Land Use in the Brazilian Amazon: From Frontier Expansion to Market Chain Dynamics." *Land* 3 (3): 981–1014. doi:10.3390/land3030981.
- Souza, Esdras Cardoso de, and Guilherme Jonas C da Silva. 2012. "Dinâmica Espacial E Formação de Clusters Significativos No Setor Agropecuário de Minas Gerais." *JOUR. Revista Economia & Tecnologia* 6 (1): 107–16. doi:10.5380/ret.v6i1.27025.
- Théry, Hervé. 1976. "Rondônia, Mutations D'un Territoire Fédéral En Amazonie Brésilienne." Université Panthéon-Sorbonne - Paris I. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00573787/>.
- . 1997. "Routes et Déboisement En Amazonie Brésilienne, Rondônia 1974-1996." *JOUR. Mappemonde* 97 (3): 35–40. <http://www.mgm.fr/PUB/Mappemonde/M397/Thery.pdf>.
- . 2015. "Les Populations Du Brésil, Disparités et Dynamiques." *Espace Populations Sociétés*, no. 2014/2-3 (January). doi:10.4000/eps.5733.
- Thomas Hurtienne. 2005. "Agricultura Familiar E Desenvolvimento Rural Sustentável Na Amazônia." *Novos Cadernos NAEA* 8 (1): 019–071. http://www.repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/3173/1/Artigo_AgriculturaFamiliarDesenvolvimento.pdf.
- Turner, Woody, Sacha Spector, Ned Gardiner, Matthew Fladeland, Eleanor Sterling, and Marc Steininger. 2003. "Remote Sensing for Biodiversity Science and Conservation." *Trends in Ecology & Evolution* 18 (6): 306–14. doi:10.1016/S0169-5347(03)00070-3.

- UE. 2016. “União Européia.” *Sítio Web Oficial Da União Europeia*.
http://europa.eu/about-eu/countries/index_pt.htm.
- United Nations. 2015. “Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 Para O Desenvolvimento Sustentável.” *a/Res/70/1*.
http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E.
- Valeriano, Dalton Morisson, Maria Isabel Sobral Escada, Gilberto Câmara, Silvana Amaral Kampel, Luis Eduardo Pinheiro Maurano, Cláudio Aparecido de Almeida, and Antonio Miguel Vieira Monteiro. 2012. “Dimensões Do Desmatamento Na Amazônia Brasileira.” In *População E Sustentabilidade Na Era Das Mudanças Ambientais Globais: Contribuições Para Uma Agenda Brasileira.*, edited by ABEP, 320. Belo Horizonte.
http://www.dpi.inpe.br/geocxnets/wiki/lib/exe/fetch.php?media=urbis:visita-tecnica:inpe_desmatamento_abep_rio_20_mar_2012_revisado.pdf.
- Verburg, Peter H, Neville Crossman, Erle C Ellis, Andreas Heinimann, Patrick Hostert, Ole Mertz, Harini Nagendra, et al. 2015. “Land System Science and Sustainable Development of the Earth System: A Global Land Project Perspective.” *JOUR. Anthropocene* 12 (December): 29–41.
 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2015.09.004>.
- Vieira, Ima Célia G., Arlete Silva de Almeida, Eric A. Davidson, Thomas A. Stone, Cláudio J. Reis de Carvalho, and José Benito Guerrero. 2003. “Classifying Successional Forests Using Landsat Spectral Properties and Ecological Characteristics in Eastern Amazônia.” *Remote Sensing of Environment* 87 (4): 470–81. doi:10.1016/j.rse.2002.09.002.
- Vuolo, Francesco, and Clement Atzberger. 2012. “Exploiting the Classification Performance of Support Vector Machines with Multi-Temporal Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Data in Areas of Agreement and Disagreement of Existing Land Cover Products.” *Remote Sensing* 4 (12): 3143–67. doi:10.3390/rs4103143.
- Winemiller, K. O., P. B. McIntyre, L. Castello, E. Fluet-Chouinard, T. Giarrizzo, S. Nam, I. G. Baird, et al. 2016. “Balancing Hydropower and Biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong.” *Science* 351 (6269): 128–29.
 doi:10.1126/science.aac7082.
- Wright, S Joseph. 2005. “Tropical Forests in a Changing Environment.” *JOUR. Trends in Ecology & Evolution* 20 (10): 553–60.
 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2005.07.009>.
- Wu, J. 2004. “Effects of Changing Scale on Landscape Pattern Analysis: Scaling Relations.” *Landscape Ecology* 19: 125–38.
<http://link.springer.com/article/10.1023/B:LAND.0000021711.40074.ae>.
- Wulder, Michael A, Joanne C White, Samuel N Goward, Jeffrey G Masek, James R Irons, Martin Herold, Warren B Cohen, Thomas R Loveland, and Curtis E Woodcock. 2008. “Landsat Continuity: Issues and Opportunities for Land Cover Monitoring.” *JOUR. Remote Sensing of Environment* 112 (3): 955–69.
 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.004>.
- Yong, Pang, Zhang Lianhua, Huang Chengquan, Yu Xinfang, and Li Zengyuan. 2013. “Automatic Deforestation Detection Using Time Series Landsat Images in a Tropical Forest of China.” *CONF. In 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS*, 3872–75. IEEE.
 doi:10.1109/IGARSS.2013.6723677.