

WESLY JEUNE

**SOLOS E AMBIENTES NO HAITI OCIDENTAL: GÊNESE, CLASSIFICAÇÃO E
MAPEAMENTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL**

2015

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de
Viçosa - Câmpus Viçosa

T

J58s
2015 Jeune, Wesly, 1972-
Solos e ambientes no Haiti ocidental : gênese, classificação e
mapeamento / Wesly Jeune. - Viçosa, MG, 2015.
xii, 182f : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Genelício Crusóé Rocha.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Ciência dos solos. 2. Solos - Estrutura. 3. Mecânica do solo.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa
de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22 cd. 631.4

WESLY JEUNE

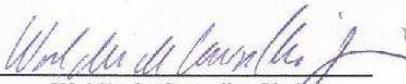
**SOLOS E AMBIENTES NO HAITI OCIDENTAL: GÊNESE, CLASSIFICAÇÃO
E MAPEAMENTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para
obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 16 de dezembro de 2015.



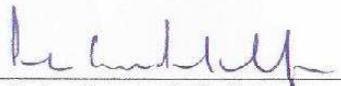
Marcio Rocha Francelino
(Coorientador)



Waldir de Carvalho Júnior



Felipe Nogueira Bello Simas



Carlos Ernesto G. R. Schaefer



Genécio Crusoé Rocha
(Orientador)

*Aos meus filhos, Bercy e Kari,
À minha esposa, Marie Elcy,
À minha mãe, Mélieuse,
ao meu grande amigo, Keith
Flanagan (in memoriam),
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Solos, pela oportunidade oferecida para realização deste curso.

A CAPES pela concessão da bolsa.

Ao professor Genelício Crusoé Rocha pela orientação, pela confiança e pela amizade.

Ao professor Elpídio Inácio Fernandes Filho pela co-orientação, pela amizade, pelas valiosas sugestões e pelo ensinamento.

Ao Professor Márcio Rocha Francelino pela co-orientação, pelo ensinamento, pela amizade, e sobre tudo, por ter me incentivado à pesquisa e a encerrar novos desafios.

Ao professor Valdinar pelo apoio.

A IICA Haiti por meio do projeto CORDAH pelo apoio na realização da tese.

À minha mãe e às minhas irmãs pelo apoio e incentivo.

A todos os professores do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas (SNP), mais particularmente, os Professores Carlos Ernesto Schaefer, Victor Hugo Alvarez, João Ker e Liovandro Marciano da Costa pelos ensinamentos.

Ao Dr. Waldir de Carvalho Junior, pela valiosa contribuição e pelo incentivo.

Aos secretários da pós-graduação, Luciana e Nayan pela atenção sempre dada.

A Franciou pelo apoio nos trabalhos de campo e Flávio pela ajuda inestimável durante o seu estágio.

Aos colegas e amigos Brian K. Flanagan, Caio, Pablo, Gessimar, Adriano, Eliana, Andrea, Cleverson, Fernanda.

Aos amigos da república Léo, Vinicius e Gabriel pela convivência.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Wesly Jeune, é natural de Petit-Goâve, Departamento Geográfico Oeste do Haiti (W.I). É filho de Mélieuse Casimir e de Gerard Jeune.

Graduou-se no curso de agronomia pela *Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire (FAMV)*, *Université d'État d'Haiti (UEH)*.

Por quase uma década aplicou os seus conhecimentos agrônômicos, trabalhando em vários projetos e/ou programas no setor agrícola. Resolveu cursar o mestrado em ciência do solo na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ/RJ) de 2010 a 2012.

Em março de 2012, iniciou o curso de doutorado no programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas (SNP), na Universidade Federal de Viçosa (UFV). Em 16 de dezembro de 2015, defendeu a tese de doutorado.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
CAPÍTULO I.....	5
GEOAMBIENTES NO HAITI OCIDENTAL COM ÊNFASE NOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS.....	5
RESUMO.....	5
GEO-ENVIRONMENTS IN WESTERN HAITI WITH EMPHASIS ON TOPOGRAPHIC ATTRIBUTES.....	6
ABSTRACT	6
1 INTRODUÇÃO	7
2 MATERIAL E MÉTODOS	8
2.1 Localização da área.....	8
2.2 Características gerais da área.....	9
2.2.1 Clima.....	9
2.2.2 Geologia e litologia.....	12
2.2.3 Geomorfologia.....	15
2.2.4 Hidrografia da área	17
2.2.5 Solos.....	18
2.2.6 Histórico de uso e ocupação do solo.....	19
2.2.7 Vegetação.....	20
2.3 Atributos morfométricos.....	21
2.4 Estratificação geoambiental.....	22
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
3.1 Acurácia do MDE, parâmetros estatísticos e distribuição dos atributos morfométricos	23

3.2	Caracterização dos principais domínios geoambientais	31
3.2.1	Depressões com vegetação xerofítica	33
3.2.2	Planícies aluviais e costeiras	34
3.2.3	Piemontes e colinas degradadas	35
3.2.4	Montanhas com vegetação aberta	36
3.2.5	Escarpas dissecadas	37
3.2.6	Topos com coníferas	39
4	CONCLUSÕES	41
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
	CAPÍTULO II	46
	SOLOS SOB INFLUÊNCIA DE MATERIAIS CALCÁRIOS E BASÁLTICOS NO HAITI OCIDENTAL	46
	RESUMO	46
	SOIL UNDER LIMESTONE AND BASALT INFLUENCE IN WESTERN OF HAITI	48
	ABSTRACT	48
1	INTRODUÇÃO	50
2	MATERIAL E MÉTODOS	52
2.1	Localização da área de estudo	52
2.2	Amostragem e levantamento de solos na área	52
2.3	Análises física e química de solos	53
2.4	Análise mineralógica	53
2.5	Análises químicas de amostras de rocha	54
2.6	Mapeamento convencional de solos	54
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
3.1	Caracterização do material de origem	56
3.2	Classes de solos e relação com o ambiente	58
3.3	Características morfológicas e físicas dos solos	61
3.4	Características químicas dos solos	64
3.5	Composição mineralógica	68
3.5.1	Mineralogia da fração areia	68
3.5.2	Mineralogia da fração silte	74

3.5.3 Mineralogia da fração argila	80
4 CONCLUSÕES	98
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
CAPÍTULO III	101
DINÂMICA DE USO E COBERTURA DA TERRA NO HAITI OCIDENTAL	101
RESUMO.....	101
LAND USE AND LAND COVER DYNAMIC IN WESTERN HAITI.....	103
ABSTRACT	103
1 INTRODUÇÃO	105
1.1 Uso e cobertura do solo no Haiti.....	106
2 MATERIAL E MÉTODOS	108
2.1 Obtenção e pré-processamento de imagens de satélite	108
2.2 Correção atmosférica das imagens.....	108
2.3 Correção topográfica das imagens	109
2.4 Definição das classes de uso e cobertura do solo	111
2.5 Classificação das imagens.....	111
2.6 Validação dos resultados da classificação	113
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	114
3.1 Comparação entre as imagens bruta e corrigida	114
3.2 Algoritmos de classificação das imagens e acurácia	117
3.3 Validação externa dos mapas 2014.....	122
3.4 Dinâmica das mudanças no uso e cobertura do solo.....	123
3.5 Identificação da natureza das mudanças	126
4 CONCLUSÕES	129
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
CAPÍTULO IV	134
COMPARAÇÃO DOS CLASSIFICADORES REGRESSÃO LOGÍSTICA MULTINOMIAL E RANDOM FOREST NO MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS NO HAITI OCIDENTAL	134
RESUMO.....	134
COMPARISON OF MULTINOMIAL LOGISTIC REGRESSION AND RANDOM FOREST CLASSIFIERS IN DIGITAL MAPPING OF SOIL IN WESTERN HAITI.....	135

ABSTRACT	135
1 INTRODUÇÃO	136
2 MATERIAL E MÉTODOS	138
2.1 Localização da área	138
2.2 Variável resposta, covariáveis e estabelecimento do plano de informação	138
2.3 Classificadores utilizados no mapeamento digital de solos	141
2.4 Avaliação do desempenho dos classificadores	143
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	144
3.1 Análise exploratória	144
3.2 Processo de classificação pela RLG	146
3.3 Importância das Covariáveis e parâmetros do classificador RF	148
3.4 Comparação dos classificadores	149
3.5 Validação do mapa	154
4 CONCLUSÕES	156
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157
ANEXO	161

RESUMO

JEUNE, Wesly, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2015. **Solos e ambientes no Haiti ocidental: Gênese, classificação e mapeamento.** Orientador: Genelício Crusoé Rocha. Coorientadores: Elpídio Inácio Fernandes Filho e Márcio Rocha Francelino.

Este estudo foi conduzido na região ocidental do Haiti, com área de abrangência de 4.300 km². Sob influência de condições climáticas oscilando de semiárido a úmido, a região possui formações rochosas compostas por diversos tipos de calcários, de materiais vulcânicos bem como os sedimentos destes. Apresenta relevo fortemente ondulados e uma variedade grande de solos eutróficos, os quais sofrem com intensos processos erosivos como resultado da grande pressão antrópica os quais estão submetidos. Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de entender o pedossistema da região ocidental do Haiti, focalizando os aspectos geoambientais, pedogenéticos e de mapeamento. Com este propósito, estruturou-se a tese em quatro capítulos, compreendendo os aspectos de compartimentação geoambiental; o estudo das características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas; análises da dinâmica de uso e cobertura do solo; e por fim, o mapeamento digital de classes de solos. Para tanto, realizou-se um levantamento pedológico com descrição e coleta de amostras de solos em 140 pontos georreferenciados, os quais incluíram perfis completos, tradagem e mini trancheiras, com subseqüentes análises físicas, químicas e mineralógicas das amostras. Foram realizadas análises e interpretações de elementos constituintes da paisagem em que está inserida a região, auxiliando-se em ferramentas e técnicas de geoprocessamento e de sensoriamento remoto. Por meio de uma abordagem paramétrica semi-automatizada de classificação, foi possível compartimentar a região em seis unidades fisiográficas ou domínios geoambientais, usando as características topográficas, do clima, da vegetação e dos solos. A partir dos pontos amostrados, os solos foram também mapeados por meio das técnicas convencional e de mapeamento digital. Os resultados mostraram que, em 28 anos, a região sofreu profundas mudanças no uso e cobertura do solo, destacando a grande extensão das áreas urbanas e redução drástica da cobertura vegetal. Os processos morfoclimáticos e pedogenéticos associados à riqueza química dos materiais de origem, promoveram solos em maioria jovens e rasos, com alta fertilidade natural, indicada pelos altos valores de CTC e de saturação por bases (>90%). Esses solos têm a sua mineralogia composta predominantemente por calcita, feldspatos, plagioclásio e quartz nas frações areia e silte; e por argilominerais 2:1 na fração argila. Os solos mais intemperizados ocorrem na região de Kenscoff, onde o clima chuvoso e a superfície de topografia

vigorosa ocasionaram o processo de monossialitização. A cobertura pedológica é dominada por Neossolos, seguidos por Cambissolos e Chernossolos, e inclui ainda extensivas áreas de afloramentos rochosos, devido à intensa atuação dos mecanismos de perdas em detrimento da pedogênese. A alta fragilidade do ambiente dessa região apresenta um quadro de difícil reversão sem a aplicação de políticas ambientais suficientemente articuladas, associadas a medidas de mitigação adaptadas. As abordagens adotadas nesse trabalho podem ser utilizadas para nortear estudos futuros, seja nas demais regiões do país, seja em outros países tropicais.

ABSTRACT

JEUNE, Wesly, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Dezember, 2015. **Soils and environments in western Haiti: Genesis, classification and mapping.** Adviser: Genelício Crusoé Rocha. Co-advisers: Elpídio Inácio Fernandes Filho and Márcio Rocha Francelino.

This study was conducted in western Haiti, covering a surface area of 4300 km². Under the influence of climatic conditions ranging from semi-arid to humid, the region has rock formations composed of various types of limestone associated with volcanic rocks and sediments. The region has rugged relief and a wide variety of eutrophic soils, which are intensively eroded; because of human pressure they are submitted. This study aimed to understand the western Haiti's pedosystem, focusing on geo-environmental, pedogenetic and mapping aspects. For this purpose, this thesis was structured in four chapters, comprising geo-environmental stratification; study of soil morphological, physical, chemical, and mineralogical characteristics; land use and land cover dynamic; and finally the digital mapping of soil classes. Thus, a soil survey that involved soil description and sampling with 140 georeferenced observation points was carried out, including complete soil profiles, auger observations and mini pits with subsequent physical, chemical and mineralogical samples analysis. Based on GIS tools and remote sensing techniques, analysis and interpretation of landform elements were performed. Through a semi-automated parametric classification methodology, it was possible to partition the region into six physiographic units or geo-environmental areas, using topographical features, climate, vegetation and soil. The sampling points allowed performing conventional and digital soil mapping (DSM) techniques. It was verified that in 28 years the region has undergone deep changes in land use and land cover, highlighting the great extent of urban areas and drastic reduction in vegetation cover. The morphoclimatic and pedogenetic processes associated with rich chemical composition of parental materials promoted mostly young and shallow soils with high natural fertility, indicated by high CEC and base saturation (>90%). Mineralogy of these soils predominantly consist of calcite, feldspaths, plagioclase and quartz in sand and silt size fractions, while 2:1 clay minerals predominate in the clay fraction. The most weathered soils occur in Kenscoff region, where the rainy weather and high altitude have undergone the monosiallitisatation process. It has been found that the soil cover was mainly composed by *Neossolos* (Entisols), followed by *Cambissolos* (Inceptisols), *Chernossolos* (Molisols) and extensive rocky outcrops areas, due to intense loss of material mechanism at the expense of pedogenesis. The high fragility of the environment represents nearly irreversible issues

without the use of sufficiently articulated environmental policies associated with adapted mitigation measures. The approach applied in this research can guide future studies, either in other regions of the country, or in other tropical countries.

INTRODUÇÃO GERAL

Em regiões tropicais, os solos possuem várias características peculiares inerentes às condições climáticas úmidas com temperaturas elevadas. Nestas regiões, admite-se que os processos pedogenéticos são acelerados e o intemperismo mais intenso em decorrência dos condicionantes climáticos levando à monossilitização dos minerais primários. Segundo White (2013), os minerais que predominam nos solos tropicais mais intemperizados pertencem ao grupo da caulinita, sendo comum a presença de óxidos de ferro, alumínio e titânio. Muhs et al. (1987) ao estudarem os solos desenvolvidos sobre calcários em ilhas do Caribe e do Atlântico Ocidental, inclusive o Haiti, verificaram que estes são bastante argilosos, atingindo as vezes profundidade expressiva com presença de espessos depósitos de bauxita.

A generalização a respeito do avançado grau de intemperização dos solos tropicais podem não ser totalmente aplicável para toda a região, pois a variabilidade dos fatores, mecanismos e processos, às vezes, levam a formação de solos bem heterogêneos dependentes das condições locais prevalentes. Os solos do Haiti se desenvolveram sobre materiais litológicos dominados por calcários Eocenos, basaltos e sedimentos quaternários sob influência do clima tropical. Por ser montanhoso com ocorrência de várias unidades fisiográficas (Maurrasse, 1982), esse país possui um pedossistema diversificado composto por solos jovens em declives acentuados a solos muito intemperizados com caráter oxídicos e lateríticos na região das montanhas úmidas (GOLDICH & BERGQUIST, 1946). No entanto, o conhecimento sobre esses solos é ainda incipiente, uma vez que os estudos nesta área são escassos, pontuais e antigos, ao considerarem os trabalhos pioneiros de Sweet (1926) e de Butterlin & Haspil, (1955). Em quase cinco décadas, o país tem registro de pouco estudos pedológicos (Colmet-Daage, 1969; Shannon & Guthrie, 1995; Chaves et al., 2010; Hylkema, 2011), que pudessem auxiliar no entendimento os processos pedogenéticos e a distribuição espacial desses solos, além de fornecer subsídios para orientar os programas agrícolas e de recuperação ambiental.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho estudar a gênese de solos na região ocidental do Haiti, mapeá-los e investigar as principais causas de mudança no uso e na cobertura desses por meio de uma abordagem multi-temporal sob a hipótese de que as características geoambientais da região propiciaram o desenvolvimento de solos predominantemente jovens e facilmente individualizáveis quando mapeados. A região estudada possui aproximadamente 4.300

km², a qual se caracteriza pela presença de cadeias montanhosas imponentes (*Massif de La Selle, Chaîne des Matheux, Chaîne du Trou d'eau*), intercaladas por depressões e planícies costeiras, sendo impressionantes os desnivelamentos. Esta região é também marcada por uma diversificação de ambientes devido aos condicionantes geológicos, geomorfológicos e climáticos que propiciaram condições biofísicas necessárias para a variabilidade espacial de solos, e vegetação, além de promover a diversificação agrícola. Apesar do relevo regional ser ondulado, a forte densidade demográfica (~900 hab/km²) acarretando uma alta pressão de uso que contribuiu para a expansão da fronteira agrícola com intensa erosão dos solos.

Desta forma, foi contemplado, neste trabalho, o levantamento pedológico pelo uso de técnicas de geoprocessamento, de mineração de dados e de sensoriamento remoto para auxiliar no esclarecimento das relações solo-ambiente e no entendimento da dinâmica interna desses solos. Assim, estruturou-se a tese em quatro capítulos, a seguir resumidos.

O primeiro capítulo enfatiza as características geoambientais da área estudada, o qual consistiu de uma revisão bibliográfica, dando destaque nos atributos topográficos, nos aspectos geológico, geomorfológico, pedológico e os tipos de uso e ocupação de solos vigentes na região. Foram utilizadas técnicas de geoprocessamento na geração de atributos morfométricos, sendo estes necessários para elucidar as relações entre parâmetros geomórficos e a evolução do solo, resultantes dos processos pretéritos e atuais. Este capítulo forneceu elementos para os capítulos subsequentes.

O segundo capítulo trata da caracterização dos solos na área em pauta. Neste sentido, apresentaram-se a metodologia e os resultados do levantamento de solos realizado. As amostras coletadas foram submetidas a análises físicas, químicas e mineralógicas. Os resultados permitiram compreender o grau de evolução desses solos bem como classifica-los e mapeá-los pelo método convencional.

No terceiro capítulo realizou-se o mapeamento multi-temporal do uso e cobertura do solo, empregando imagens multiespectrais do Landsat em três épocas distintas: dezembro de 1986, dezembro de 2000 e novembro de 2014. Após o pré-processamento das imagens, incluindo as correções atmosféricas e topográficas, as imagens foram classificadas comparando-se cinco algoritmos de classificação, são eles: máxima verossimilhança (MAXVER), regressão logística, *support vector machine*, redes neurais artificiais e *Random forest*. As classes de uso e cobertura foram: Área urbana, corpo d'água, agricultura, vegetação de savana, vegetação de alto porte (floresta de baixa e alta altitude), sombra e nuvem. O desempenho dos classificadores foi avaliado

por meio da matriz de confusão, dos índices de exatidão global e Kappa. A comparação dos classificadores foi efetuada por meio da estatística Z. Após escolher o algoritmo com melhor desempenho, a comparação pixel a pixel foi efetuada para permitir a detecção dessas mudanças.

O quarto capítulo contempla o mapeamento digital de classes de solos, baseando-se na relação solo-ambiente, conceituada pelo modelo CLORPT de Jenny e modificado em SCORPAN por McBratney. Para isso, foi processado o modelo digital de elevação SRTM (30 m de resolução) para derivar os atributos topográficos primários e secundários junto com dados de litologia, clima, índice de vegetação (NDVI) e índice de argila, os quais foram necessários para prever e separar as unidades de mapeamento. As classes com menor representatividade foram agregadas às classes de maior frequência. No processamento de mapeamento dos solos, foram comparados os classificadores Regressão logística e *Random forest*. O método de avaliação do desempenho dos classificadores foi o mesmo usado no precedente capítulo.

A metodologia proposta e os resultados alcançados neste estudo são replicáveis nas demais regiões, podendo auxiliar em subseqüentes trabalhos de pesquisa e subsidiar iniciativas que visem agregar novos conhecimentos para enriquecer a literatura pedológica do país. Também, espera-se que as informações resultantes deste estudo contribuam para guiar tanto as iniciativas de melhoria das práticas agrícolas quanto os programas de reabilitação do meio ambiente do país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- WHITE, R. E. **Principles and practice of soil science: the soil as a natural resource**. John Wiley & Sons, 2013, p. 384.
- MUHS, D. R., CRITTENDEN, R. C., ROSHOLT, J. N., BUSH, C. A., STEWART, K. C. Genesis of marine terrace soils, Barbados, West Indies: Evidence from mineralogy and geochemistry. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 12, n. 6, p. 605-618. 1987.
- MAURRASSE, F., J-M. R. **Survey of the geology of Haiti. Guide to the field excursions in Haiti**. Miami Geological Society, Miami, FL., 103 p, 1982.
- GOLDICH, S. S., BERGQUIST, H. R. **Aluminous lateritic soil of the republic of Haiti, W. I.** Bulletin 954-C, Geologic Investigations in the American Republics, p. 36-112, 1946.
- SWEET, A. T. The soils of Haiti. **US Bureau of Soils**. 1924. 86p. (Report).
- GUTHRIE, R. L.; SHANNON, D. A. Soil profile descriptions for steeplands research sites in Haiti. United States Agency for International Development Soil Management **Collaborative Research Support Program**. Auburn University, Alabama, 36849-5412 U.S.A. Technical Bulletin No. 2004-01. 24 p.
- BUTTERLIN, J. ; & HASPIL, A. **Les principaux types de sols de la République d'Haïti et leur répartition géographique**. Port-au-Prince, 1955. P 1-15. (Bulletin agricole, février 1955).
- COLMET-DAAGE, F. ; DELAUNE, M.; ROBBART, F.; LOHIER, G.; YOUANCE, J.; GAUTHEYROU, J. et M.; FUSIL, G.; KOUKOU, M. Caractéristiques et nature de la fraction argileuse de quelques sols rouges d'Haïti situés sur calcaires durs. **Cahier O.R.S.T.O.M.**, sér. Pédol., v. 7, n. 3, p. 1-71, 1969.
- CHAVES, A. D., ROCHA, M. F., PEREIRA, M. G. **Solos e aptidão agrícola das terras nas seções comunais do Mapou, Collines des chênes e Pichon**. 2010. 101p. Dissertação (Mestrado em ciência do solo), Instituto de Agronomia / Curso de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo - UFRRJ, Seropédica.
- HYLKEMA, A. L. **Haiti Soil Fertility Analysis and Crop Interpretations for Principal Crops in the Five WINNER Watershed Zones of Intervention**. 2011. 38 p. Disponível em: <<https://soils.ifas.ufl.edu/docs/pdf/academic/papers/Hylkema-Amy.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2015.

CAPÍTULO I

GEOAMBIENTES NO HAITI OCIDENTAL COM ÊNFASE NOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

RESUMO

A compartimentação da paisagem em unidades geoambientais pela integração de informações biofísicas possibilita uma melhor compreensão da sua complexidade e pode subsidiar o planejamento de ações. Diante disso, objetivou-se com o presente estudo realizar a caracterização geoambiental da região Oeste do Haiti. Entre outras características, destacam-se a alta variação altimétrica; o relevo acidentado; o predomínio do material litológico calcário e a forte pressão de uso resultante da alta densidade demográfica. A caracterização dos domínios geoambientais foi baseada em uma metodologia paramétrica semi-automatizada, envolvendo os atributos topográficos, os aspectos pedogeomorfológicos e os parâmetros bioclimáticos. Foi utilizado o modelo digital de elevação oriundo do SRTM com 30 m de resolução espacial para derivar os atributos topográficos. O procedimento de individualização dos ambientes envolveu a parametrização e o reescalonamento dos dados geoespaciais, supracitados no intervalo de 0 a 1. Seis unidades geoambientais foram separadas por meio do classificador não supervisionado *Isocluster*. Destes, destacou-se os geoambientes Depressões com vegetação xerofítica e Planícies aluviais e costeiras, por apresentarem características bastante distintas no que se refere, essencialmente, ao pedossistema, à geomorfologia e à geologia. Enquanto que os Neossolos Flúvicos e os Gleissolos compõem os principais tipos de solo dessas duas unidades, os Neossolos Litólicos e o afloramento de rocha constituem o pedossistema mais comum nos outros geoambientes, os quais se situam em cotas mais elevadas, com relevos íngremes e se formam principalmente sob materiais de origem calcária. A região apresenta avançado grau de degradação em decorrência do desmatamento, das práticas agrícolas não sustentáveis e da falta de fiscalização ambiental por parte dos órgãos responsáveis. A abordagem utilizada estudo mostrou-se viável para ajudar a compreender os fatores mais atuantes na diferenciação dos ambientes, além de proporcionar subsídios para a recuperação ambiental da região.

Palavras-chave: Geomorfologia; Pedossistema; Geoprocessamento.

GEO-ENVIRONMENTS IN WESTERN HAITI WITH EMPHASIS ON TOPOGRAPHIC ATTRIBUTES

ABSTRACT

Landscape fragmentation in geo-environmental units through integration of biophysical information enables a better understanding of its complexity and can support planning actions in a region. The objective of this study was to perform geo-environmental characterization of western Haiti. Among other features, it is worth highlighting altimetry variation; rough terrain; predominance of limestone material and strong land use pressure resulting from high population density. Characterization of geo-environmental domains was based on a semi-automated parametric methodology, including terrain attributes, pedogeomorphologic aspects and bioclimatic parameters. A digital elevation model derived from SRTM with 30 m spatial resolution was used as to derive topographical attributes. The individualization procedure of the environments involved parameterization and rescaling of the above geospatial data from 0 to 1. Six geo-environmental domains were separated through unsupervised classifier Isocluster. Of these, depressions with xerophytic vegetation and Aluvial and coastal plains, should be pointed out, due to its very distinctive characteristics related to its pedosystem, geomorphology and geology. While Fluvents and Aqualfs are the main soil types in these two units, Entisols and rock outcrops are the most common pedosystem in other geo-environments, which are located in higher elevation, on steep relief and formed under calcareous materials influences. The region exhibits significant stages of degradation due to deforestation, non-sustainable agricultural practices and lack of environmental enforcement by the responsible agencies. The approach used in this study proved to be feasible method to better understand the most active factors that led to environmental differentiation, besides providing subsidies for environmental recovery in the region.

Key-words: Geomorphology; Pedosystem; Geoprocessing.

1 INTRODUÇÃO

A paisagem pode ser entendida como sistemas socioambientais evolutivos e alteráveis que refletem as interações atuais e passados entre a natureza e o ser humano (FAGERHOLM, 2013). Do ponto de vista geomorfológico, a paisagem resulta da interação entre as forças geotectônicas e os processos geomórficos, os quais são influenciados por fatores climáticos (BURBANK e ANDERSON, 2001; SCHEIDEGGER, 1979).

Por tratar das interações entre os processos climático, hidrológico e tectônico na superfície terrestre (EVANS et al, 2009), a geomorfologia fornece subsídios para apreender as transformações que ocorrem na paisagem. Isto é, o entendimento e a interpretação dos processos geomórficos assumem um papel relevante para identificar e delimitar padrões de formas geneticamente semelhantes. Desta forma, a compreensão da natureza dinâmica das paisagens muitas vezes envolve o uso de modelos de simulação para explorar potenciais mudanças em longo prazo e em dimensão espacial extensa (FALL & FALL, 2001).

As superfícies geomórficas podem ser descritas e quantificadas em simples elementos do relevo pela parametrização de modelo digital de elevação (BOLONGARO-CREVENNA et al., 2005). Para Hugget (2011), os processos na paisagem podem ser evidenciados espacialmente com auxílio de modelos topográficos ou modelos digitais de elevação (MDE). O MDE envolve a criação de uma grade regular de elevações em forma de padrões quadráticos ou hexagonais e pode ser definido como qualquer representação digital da variação contínua do relevo no espaço (BURROUGH, 1986). A partir do MDE, é possível derivar índices topográficos ou parâmetros do terreno que caracterizem as superfícies geomórficas (HUTCHINSON & GALLANT, 2000). Devido às suas características, esse modelos têm sido amplamente utilizados nas últimas décadas para analisar a superfície terrestre e modelar as relações entre a topografia e os componentes geológico, hidrológico, biológico e antropológico da paisagem (FLORINSKY et al., 2002).

De acordo com Fagerholm et al., (2013), estudos voltados para a caracterização de ambientes constituem uma resposta diante da necessidade de produzir dados espaciais para subsidiar o planejamento e o manejo de recursos. A caracterização ambiental pela compartimentação da paisagem vem sendo amplamente utilizada de forma a subsidiar o manejo de recursos naturais, inclusive os solos (DIAS et al. 2002, RESENDE et al. 2002, MARTINS et al.

2006, BOHNET & SMITH, 2007), uma vez que esses recursos estão sujeitos a intensas pressões (BURGESS & CLARKE, 2000) e alterações.

A área em estudo insere-se em um contexto geológico e morfológico que originou diferentes feições geomórficas com montanhas proeminentes, formas de relevo heterogêneas e vales estruturais profundos, refletindo assim as atividades tectônicas e processos morfoclimáticos pretéritos. Nesta região altamente antropizada, a vegetação primária já foi derrubada, sobrando apenas fragmentos florestais e espécies isoladas; o que ocasiona intensa degradação dos solos e visível assoreamento dos rios, entre outras consequências.

A estratificação de paisagem em unidades homogêneas por meio das ferramentas de sistema de informação geográfica (SIG) é importante para subsidiar programas de gestão ambiental, de planejamento e de ordenamento territorial, visando a utilização integrada e sustentável dos recursos naturais. Neste contexto, o presente capítulo objetivou estratificar, mapear e analisar os diferentes geoambientes na região ocidental do Haiti, dentro de uma metodologia paramétrica de classificação, baseando-se tanto nos atributos topográficos quanto nas características biofísicas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização da área

A área de estudo (Figura 1) possui aproximadamente 4.300 km² e localiza-se entre 18°15'30"N e 18°58'25" de latitude e 71°42'39"W e 73°4'22"W de longitudes, na região ocidental do Haiti. É caracterizada pelo relevo bastante acidentado, com forte amplitude topográfica, sendo bem representativa das condições gerais encontrada nas demais regiões do país, tanto do meio físico como das condições socioeconômicas.

Essa área inclui a capital Porto Príncipe, junto com a sua região metropolitana, bem como os municípios de *Gressier*, *Leogâne*, *Grand-Goâve*, *Petit-Goâve*, *Cabaret*, *Arcahaie*, *Thomazeau*, *Ganthier*, *Fond-Verette*, *Cornillon* e *Kenscoff*, com população aproximadamente de 4 milhões de habitantes, o que corresponde a aproximadamente 36% da população do país (IHSI, 2015).

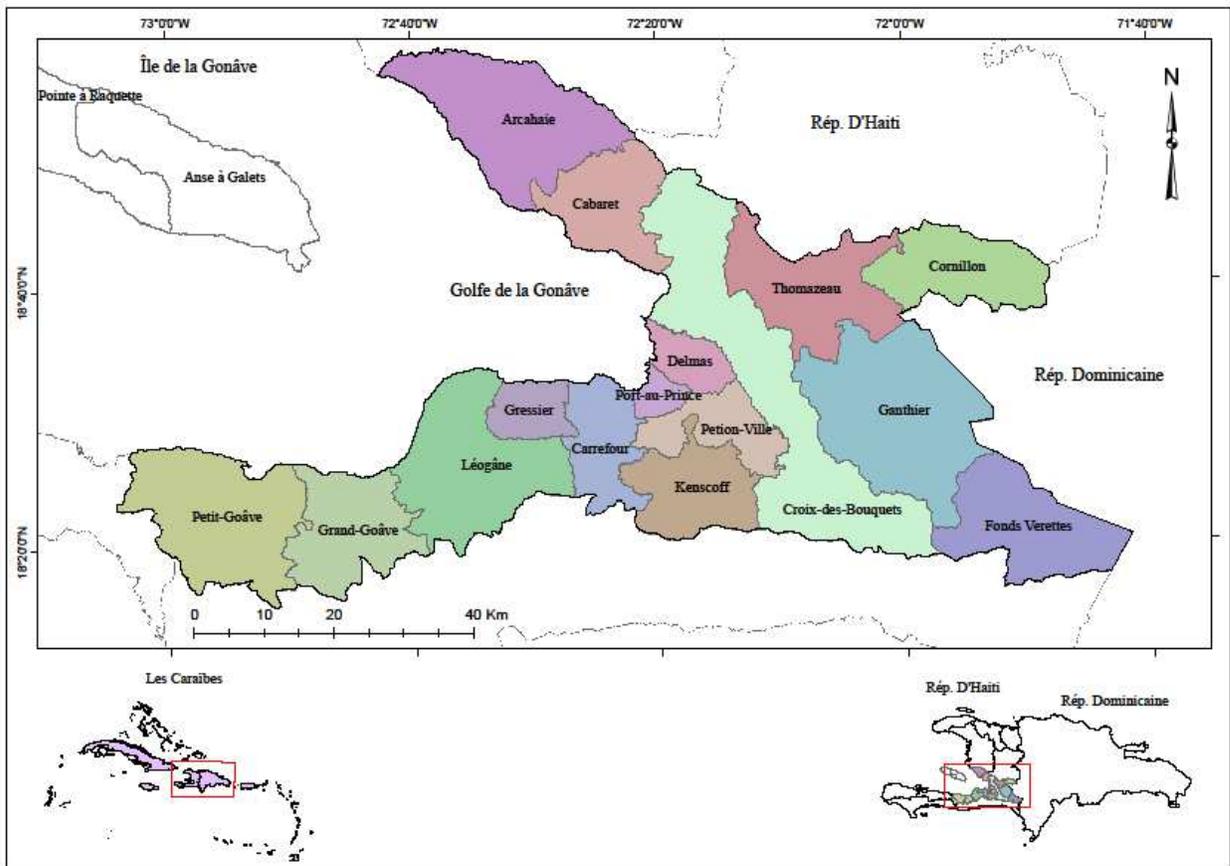


Figura 1. Mapa de delimitação geográfica da área de estudo.
Fonte: Base cartográfica originada do site <http://haitidata.org>.

2.2 Características gerais da área

2.2.1 Clima

A figura a seguir (Figura 2) mostra a distribuição da temperatura média mensal da região estudada. Esta distribuição evidencia a grande variabilidade climática. De acordo com o sistema de classificação climática de Koeppen (1945), a região apresenta dois tipos de clima devido à variação da altitude. O tipo tropical "Aw" caracteriza as planícies e colinas que têm uma baixa variação de temperatura durante ano; enquanto nas regiões mais altas encontra-se o tipo "Cwb", ou seja, clima tropical de altitude com inverno seco e verão quente. Na parte localizada na vizinhança do lago *Azuei* e na direção da fronteira haitiano-dominicana, o clima apresenta características de semi-áridez, se aproximando assim do tipo BSw. A temperatura média anual é de 27 °C, porém, na

parte montanhosa, esta pode ser menor que 20 °C, podendo atingir valores menores que 10 °C na região do *pico La Selle*, no inverno, particularmente entre dezembro e janeiro. Os meses de julho e agosto são os mais quentes com temperatura máxima de 34,2 e 34,4 °C respectivamente, enquanto que o período de novembro a janeiro é o mais frio (HIJMANS et al., 2005).

Tabela 1. Distribuição da temperatura média mensal (°C) na área de estudo.

T °C	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Min.	14,5	14,8	15,5	16,8	17,7	18,3	18,4	18,5	18,2	17,8	16,8	15,4
Max.	31,0	31,7	32,8	33,0	33,0	33,7	34,2	34,4	34,0	32,8	32,2	31,5
Méd.	24,9	25,3	26,4	26,8	27,4	28,0	28,4	28,4	28,0	27,5	26,6	25,5

Adaptado de Hijmans et al., (2005) – acesso <http://www.worldclim.org>; Min.= média das temperaturas mínimas; Max.= temperatura máxima; Méd.= Temperatura média.

A distribuição média anual da precipitação apresenta os meses de maio e outubro como os mais chuvosos; e os mais secos variam de dezembro a fevereiro (Figura 2). No entanto, a média anual é de 1.485 mm, com valor mínimo em torno de 700 mm e valor máximo de mais de 2000 mm. Por outro lado, a umidade relativa média anual do ar, segundo Woodring et al (1924), é de 80% no verão e de 78% no inverno.

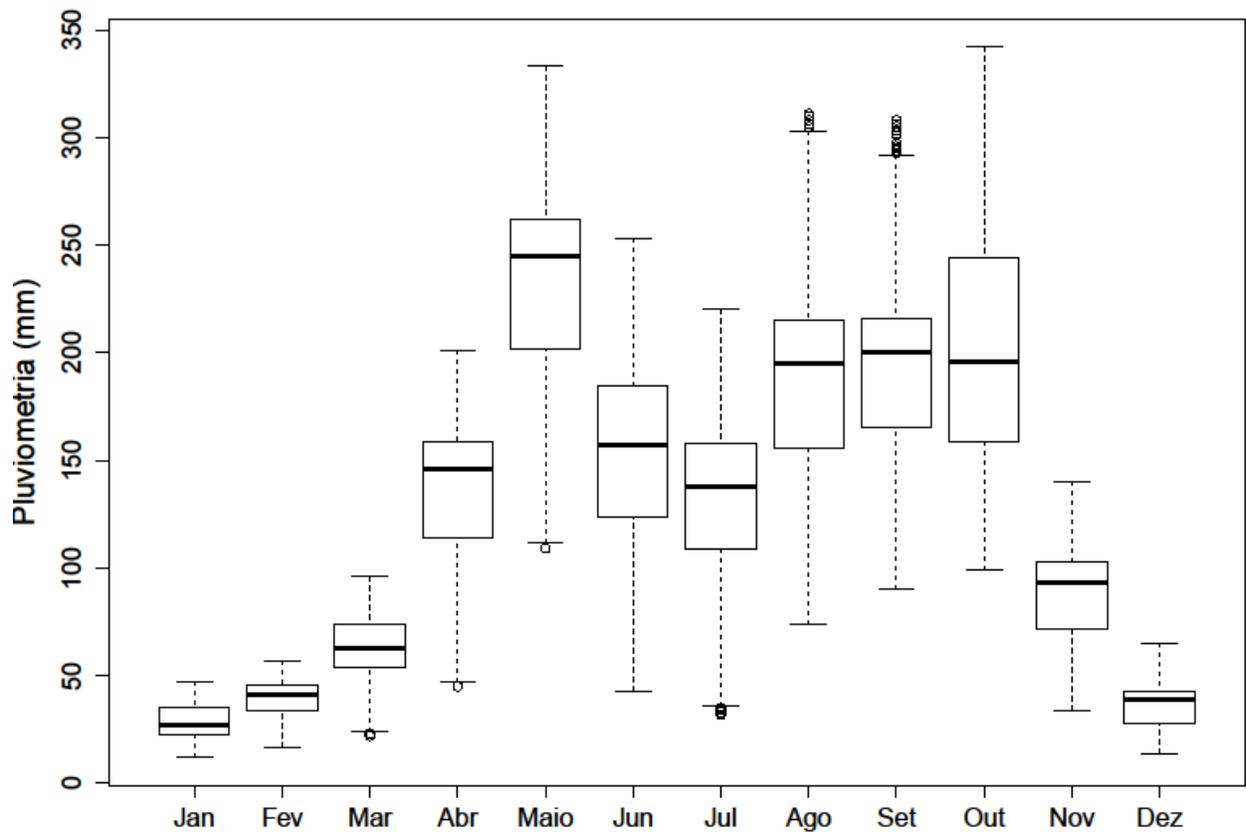


Figura 2. Precipitação média mensal (mm) na área de estudo. – Dados extraídos de imagens em formato matricial com 1 km de resolução espacial. – Adaptado de HIJMANS et al., (2005).

A distribuição espacial da precipitação é fortemente influenciada pela variação altitudinal, fazendo com que haja um padrão onde as planícies são mais secas e as áreas mais elevadas mais úmidas. Porém, a parte sul da região, incluindo a cadeia montanhosa mais elevada do país (*La Selle*), é a mais húmida (Figura 3). Vale ressaltar que a região, como todo o país, possui uma temporada de furacões situada entre os meses de junho e novembro.

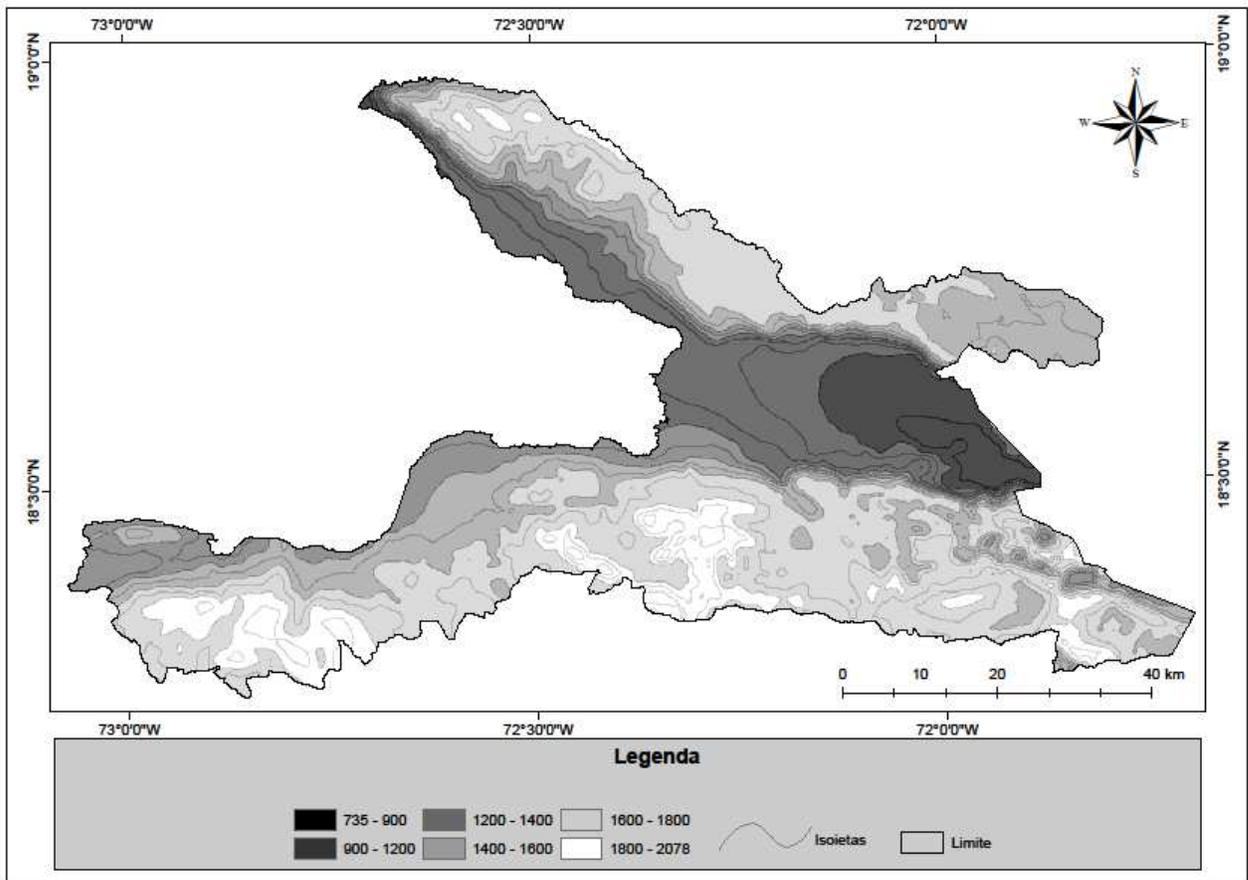


Figura 3. Distribuição da precipitação média mensal (mm) na área de estudo. – Mapa reamostrado em 30 m e especializado por krigagem ordinária (modelo esférico; Patamar: 115065.2; Alcance: 27224.2; Efeito Pepita: 0,0; R^2 : 0,98). – Adaptado de HIJMANS et al., (2005).

2.2.2 Geologia e litologia

O Departamento geográfico Oeste, onde está situada a área do presente estudo, é constituído de um embasamento basáltico do Cretáceo com afloramento no maciço *La Selle*, sendo coberto por uma série de calcários do Eoceno e Mioceno. Essas feições geológicas se encontram na parte norte da cadeia montanhosa *Matheux* e montanhas *Trou d'Eau* (BME, 1992). Conforme Woodring et al. (1924), a região está inserida num complexo geológico com diversas formações rochosas. Ademais, inclui-se a grande falha *Enriquillo-Plantain-Garden*, onde encontram-se os dois principais lagos do país: o Azueí (ou Etang Saumâtre) e o de Miragoâne (Etang Miragoâne). A região foi afetada pelos últimos eventos vulcânicos do Pleistoceno, dando origem a dois cones vulcânicos ainda bem conservados: o vulcão *La Vigie* e o vulcão de *Thomazeau*.

Quanto à litologia da área, destacam-se as formações sedimentares de calcário recifal, além de sedimentos Quaternários flúvio-aluvionares, cones de dejeção e manguezais. Formações rochosas carbonáticas do Terciário, como calcários marinhos e calcário margos, representam uma porcentagem bastante expressiva do território haitiano. Vale ressaltar que as formações carbonáticas representam mais de 65% de toda litologia da área (Figura 5 e Tabela 2). Desta forma, a litologia na área investigada é composta predominantemente de calcário duro e de aluviões e outros materiais detríticos, os quais representam 31,6% e 22,2%, respectivamente. No entanto as margas e calcário margoso, assim como as rochas vulcano-sedimentares, ocorrem de forma expressiva representando 30% da litologia da área.

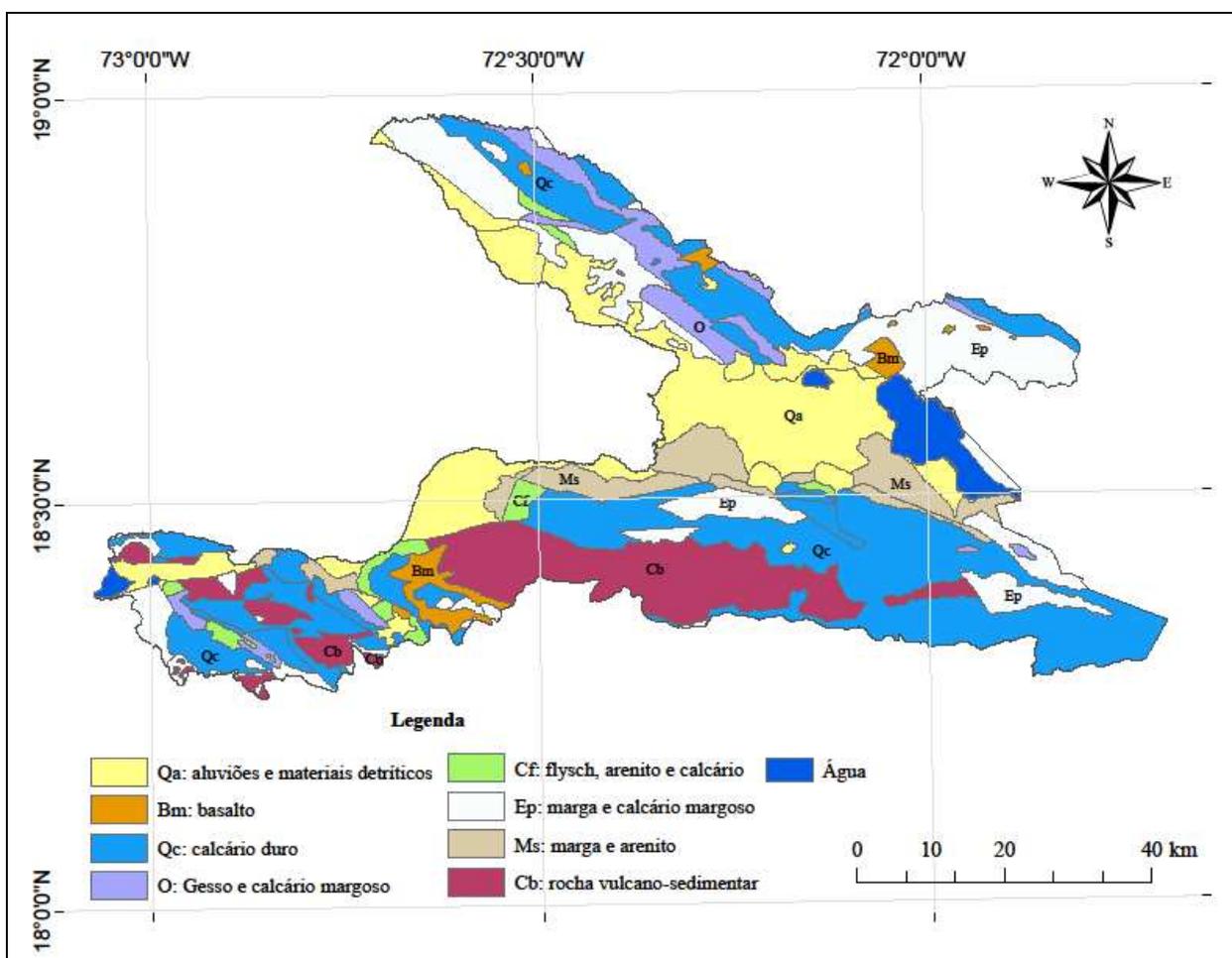


Figura 4. Unidades litológicas na área de estudo. - Extraídos do mapa geológico – Haiti. Formato arquivo: shapefile – BME na escala 1:250000. - <http://haitidata.org>.

Tabela 2. Distribuição da litologia da área

Litologia	Área (km²)	Área (%)
Aluviões e materiais detríticos	953,4	22,2
Basalto	95,6	2,2
Calcário duro	1356,8	31,6
Gesso e calcário margoso	208,3	4,8
Flysch, arenito e calcário	88,3	2,0
Margas e calcário margoso	751,7	17,5
Marga e arenito	288,2	6,7
Rocha volcano-sedimentar	557,6	13,0
Total	4300,0	100

Segundo Maurrasse et al. (1982), as formações geológicas de maior ocorrência na área podem ser divididas em dois períodos: Cretáceo–Paleogene e Cretáceo–Neogene.

i) Cretáceo–Paléogeno (K-pg)

- a) Formação *Abuillot* – encontrada a 15 km a sudoeste de Hinche, ao longo do vale do rio Abrio. Consiste de uma série de arenitos de coloração amarronzada provenientes do calcário. As fácies da formação ocorrem em diversas áreas da parte norte do graben *Cul-de-Sac/Enriquillo* e, particularmente, em *Montagnes Noires*.
- b) Formação *Beloc* – ocorre ao sul de Beloc na parte ocidental do *Massif de la Selle*. Constitui-se de basalto cobrindo as rochas intemperizadas da formação de *Dumisseau*. Nos conglomerados que fazem parte da formação, encontra-se o calcário marinho.
- c) Formação *Dumisseau* – encontrada a sudeste de Kenscoff, no Massif de La Selle, está caracterizada essencialmente por intercamadas de basalto e doleritos, de calcário marinho, além de turbiditos vulcânicos, *Cherts* multicoloridos e siltitos silicosos. A sequência é mais calcária na parte de cima.
- d) Formação *Perodin* – localizada no noroeste de “Montagnes Noires”, a litologia da formação *Perodin* é constituída de sequência de basalto espesso e andesito intercalados com margas multicoloridas. Estima-se em 1000 m a sua espessura.

ii) Cretáceo-Neógeno

- a) Formação *Morne Delmas* – Localizada na estrada Ruelle Nazon/Ave Martin Luther King, ao sul de Mornes Delmas, esta formação do Plioceno é constituída de conglomerados, arenitos e margas com cone de dejeção.
- b) Formação *Rivière Gauche* – Localizado no trecho da estrada Trouin-Jacmel a sudeste de Trouin. Essa formação contém conglomerado, areias e argilitos amarelados. Supõe-se que a formação *Rivière Gauche* foi formada por deposição de sedimentos terrígenos na depressão *Jacmel-Fauché*.
- c) Formação *Rivière Grise* – encontrada na encosta ao sul da comunidade Cadette Goujon, em 500 m de altitude, esta formação é composta por alternadas camadas de conglomerados com basalto, calcário e camadas de sílex, arenitos amarelados, calcários pardos e margas cinzas ou azuladas, geralmente em camadas.

2.2.3 Geomorfologia

A área investigada caracteriza-se pela complexidade das feições geomórficas resultantes das ações de eventos tectônicos e clima (Figura 5). Os processos morfodinâmicos de esculturação do relevo têm gerado diversos modelados de dissecação na área. Entre os modelados homogêneo e estrutural, destacam-se as formas de topos aguçados com vales encaixados e profundos, muito comuns na parte sul-sudoeste, inclusive em Kenscoff; *La selle* e na parte norte da região, que compreende *Chaîne des Matheux*. Esse topo aguçado refere-se às formações litológicas basálticas, visto que as formas de topos convexos caracterizam as formações carbonáticas (MORAL, 1961).

O grau de dissecação do relevo, principalmente montanhoso, está diretamente ligado com a alta densidade de drenagem entalhada no material carbonático junto ao material de origem vulcânica do período Cretáceo. Por outro lado, na parte central da região, que corresponde ao graben *Cul-de-Sac/Enriquillo*, ocorre relevo de agradação com formações Quaternárias.

Assim, as formações geomorfológicas de maior expressão são:

- Maciços Residuais: envolvem as Serras e maciços dissecados da cadeia *La Selle* ou *Massif La Selle*, localizada no sul da área, com orientação leste-oeste; e a cadeia montanhosa *Des Matheux*,

na parte noroeste. São também incluídas as montanhas de origem vulcânica tais como a montanha *La Vie* e de *Thomazeau*. Esses modelados ocupam mais de 60% da área.

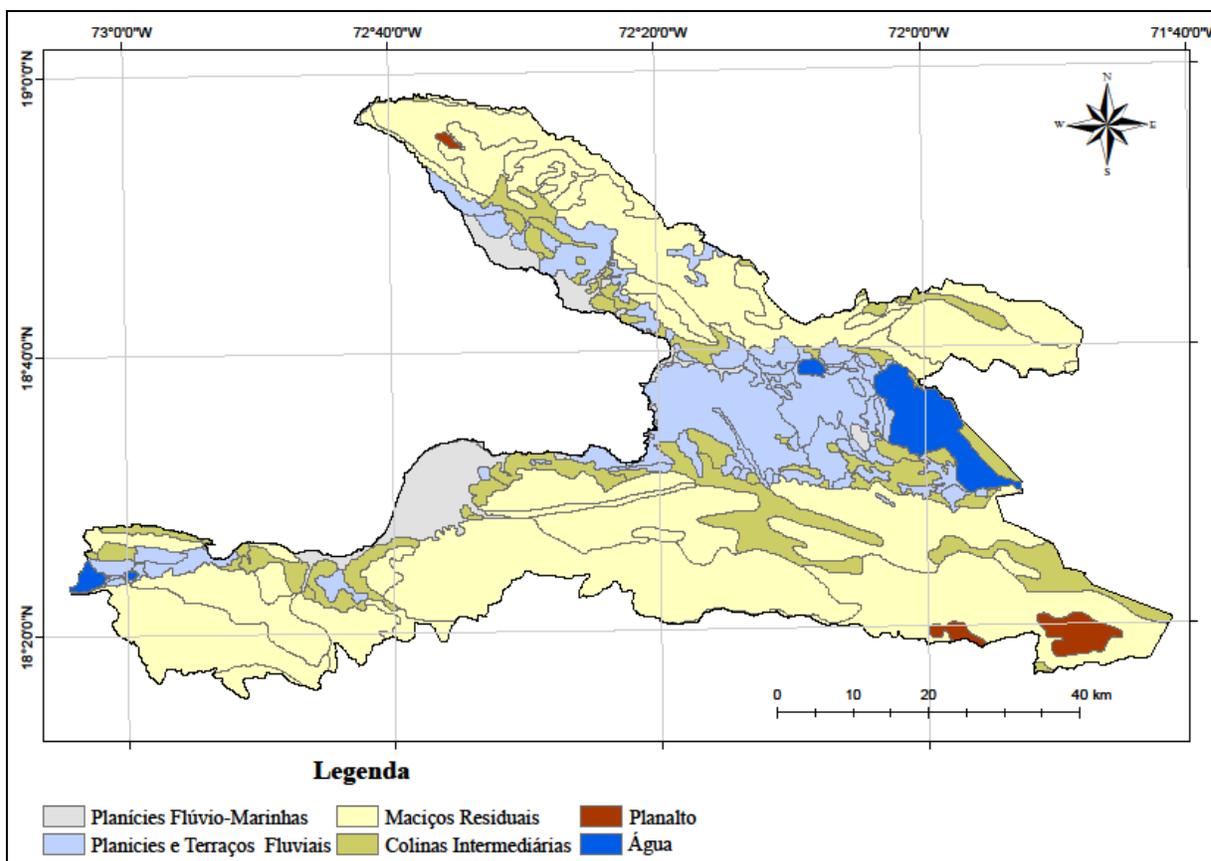


Figura 5. Unidades geomorfológicas na área estudada. - Extraídos do mapa geomorfológico – Haiti. - Formato arquivo: shapefile – BME na escala 1:250000. - <http://haitidata.org>.

- Planalto: essas feições de relevos planos ou dissecados, em que os processos de erosão superam os de deposição, são pouco expressivas e representam aproximadamente 1% da área. Ocorrem geralmente em altitude acima de 1200 m na parte noroeste e mais de 1500 m na parte sul da área.
- Colinas intermediárias: ocorrem em toda a área, na interface que conecta as serras e as planícies com padrão de topos convexos como principal característica, com presença também de morros dissecados.
- Planícies e Terraços fluviais: os processos erosivo-deposicionais, pela atividade fluvial rejuvenescedora contínua, têm propiciado a formação deste tipo de modelado. Essas feições

ocorrem particularmente no graben *Enriquillo-Plantain*, na depressão entre *Petit-Goâve* e *Miragoâne* e na baixada de *Cabaret-Arcahaie*.

– Planícies Flúvio-marinhas: correspondem a relevos de gradação em zona de acumulação atual. São superfícies planas, com amplitude de relevo nula, em ambientes mistos de interface dos Sistemas Depositionais Continentais e Marinhos. Estes sistemas são constituídos de depósitos argilo-arenosos a argilosos, com terrenos mal drenados, continuamente inundáveis, com padrão de canais meandantes e divagantes, sob influência das oscilações das marés ou resultantes da colmatção de paleo-lagunas. Essa formação corresponde à região banhada pelo Golfo de *la Gonâve*, onde ocorrem as baías de *Petit-Goâve*, de *Grand-Goâve* e de *Port-au-Prince*. Nessas feições, encontram-se diversos manguezais, sendo ecossistemas costeiros de transição entre os ambientes terrestre e marinho.

2.2.4 Hidrografia da área

A região apresenta um padrão de drenagem dendrítico, em que os talwegues têm variados comprimentos. Com rede de drenagem altamente densa, típica de rochas sedimentares, este possui hierarquia de até 6ª ordem (STRAHLER, 1974). Encontram-se várias bacias e sub-bacias hidrográficas, as quais são drenadas por 14 rios principais (Figura 6). A maioria delas deságua no *golfo de la Gonâve*. O comportamento hidrológico dos rios determina o modo de funcionamento extremo, com cheia em período chuvoso, e com vazão quase nula em período de estiagem, devido ao nível avançado de assoreamento dos rios em função da degradação ambiental de todas as bacias. O relevo acidentado associado às chuvas intensas no verão têm ocasionado frequentes enchentes e inundações com implicações socioeconômicas profundas, sobretudo nas planícies e cidades.

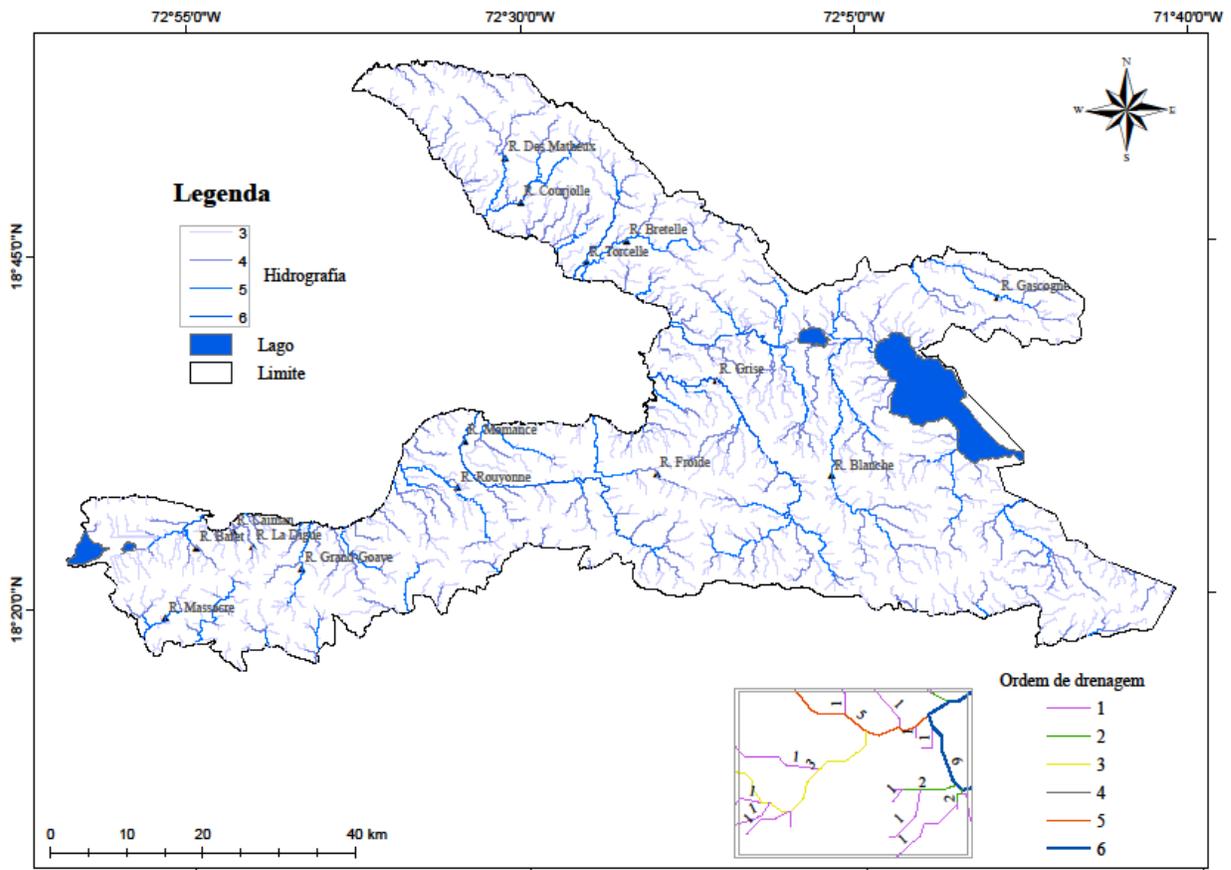


Figura 6. Rede hidrográfica da área de estudo

2.2.5 Solos

As unidades pedológicas do Haiti são pouco conhecidas, pois nenhum levantamento sistemático de solos foi realizado no passado. Os raros estudos pedológicos encontrados são antigos, pontuais e exploratórios, destacando-se o estudo de Sweet (1926) no Artibonite, o de Butterlin e Haspil (1955), Colmet-Daage (1969), o de Shannon e Guthrie (1995) no oeste e sudoeste, o de Chaves et al. (2010) na região de Mapou (Sudeste do país) e o de Hylkema (2011). Os resultados reportados no Capítulo 2 do presente estudo verificaram a presença de Neossolos Litólicos e Flúvicos, Chernossolos, Gleissolos e Cambissolos como sendo os tipos de solos com maior extensão geográfica, sobretudo na região ocidental do país. No entanto, há ocorrência de extensivas áreas com afloramento de rocha.

2.2.6 Histórico de uso e ocupação do solo

Os tipos de uso da terra no Haiti estão enraizados na história do país. E a independência do país em 1804 constitui um divisor entre o período colonial e a história recente do país.

Logo após a chegada de Cristóvão Colombo, em 5 de dezembro 1492, iniciaram-se no país as atividades de busca e extração de ouro pelos espanhóis, escravizando os Tainos, indígenas que habitavam a ilha na época (FONTANELLE e MEDEIROS, 2007). A dizimação dos indígenas por maltrato e doenças abriria uma nova página na história da ilha com a cessão da parte oeste da ilha à França pela Espanha, em 1697, e a importação de escravos da África. Entende-se que as atividades econômicas iniciadas teriam transformado a paisagem pelos diversos tipos de uso da terra. No entanto, o uso para fins agrícolas ganhou destaque naquela época pelo extenso espaço físico que ocupava. Conforme Girard (2010), os principais cultivos foram algodão, índigo, café e cana de açúcar.

No entanto, o Departamento Oeste, por compreender a capital e a maioria das atividades socioeconômicas do país, tem sido a região de uso mais diversificado e mais intenso. Os principais tipos de uso observáveis são agricultura, área urbana e/ou periurbana e florestas que ocupam exíguas áreas.

No princípio do século XVI, mais particularmente em 1517, iniciou-se a exploração da cana-de-açúcar no país para alimentar o mercado europeu (BAGGIONI-LOPEZ, 2013). A exploração se intensificou quando os espanhóis concederam a parte Oeste da ilha aos franceses. Assim, devido aos seus solos férteis, as atividades agropecuárias, inclusive a exploração da cana-de-açúcar, café, algodão e a pecuária, fez com que Saint-Domingue¹ fosse a colônia mais próspera da França no século XVIII (NAVARRO-ANDRAUD, 2007).

Desde o primórdio da independência em 1804, o Haiti continuou como um país essencialmente agrícola, como consequência da herança colonial. Segundo Moral (1961), os produtos agrícolas representavam pelo menos 97% das exportações do país, e os impostos arrecadados da exportação agrícola constituíram 75% da contribuição orçamentária do país. Situação essa que se manteve até o início dos anos 50.

¹ A ilha Hispaniola abrange a República do Haiti e a República Dominicana.

Atualmente a agricultura continua sendo um setor econômico de alta relevância no Haiti, empregando mais de 50% da mão de obra nacional (MARNDR, 2010) e contribuindo com 25% do PIB (CNSA, 2007).

Conforme GEO Haïti (2010), as culturas de arroz (*Oryza sativa* L.), manga (*Mangifera indica* L.) e banana (*Musa paradisiaca*) ocupam boa parte das terras agrícolas. Ainda, merecem destaque as culturas de milho (*Zea mays ssp*), feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), mandioca (*Manihot esculenta*), batata (*Solanum tuberosum*), repolho (*Brasica oleracea*) e cana-de-açúcar (*Saccharum ssp*). As áreas de pastagem contribuem com menos de 5% da utilização das terras (DOLISCA *et al.*, 2009).

Na região em estudo, a produção agrícola encontra-se em virtude da ocorrência de microclimas e do estabelecimento de infraestruturas hidroagrícolas nas planícies. Os principais cultivos encontrados nas áreas planas são banana, cana-de-açúcar, milho e feijão. Nas montanhas úmidas, predominam-se as hortaliças folhosas, de raízes e tubérculos.

Na atualidade, a utilização da terra para fins agrícolas vem sendo reduzida em decorrência da urbanização desordenada, particularmente nas planícies de *Arcahaie*, *Plaine du Cul-de-Sac* e *Léogâne*. Com isso surge uma nova situação que é a agricultura periurbana, em que os cultivos ocorrem em pequenas áreas às margens ou mesmo no núcleo urbano. São cultivados principalmente de banana, milho e hortaliças. Essa situação é encontrada principalmente nas cidades litorâneas e merece um estudo mais profundo para avaliar o crescimento desta atividade e sua importância socioeconômica.

2.2.7 Vegetação

A ilha Hispaniola possui cerca de 6.000 espécies diferentes de plantas vasculares, das quais 4500 são fanerógamas, sendo um terço destas endêmica (KÉBREAU, 1960). Segundo CRDA (1995), uma taxa de endemismo de 45% foi encontrada no Haiti pelo Dr. L. Eckman durante a sua visita em 1929.

A vegetação original da área é composta por diversas formações de florestas de altitude, florestas de pinus, floresta xerófila, savanas e manguezais. Encontram-se espécies de pinheiro (*Pinus occidentalis*.), palmeira-real (*Roystonea oleracea*), mogno (*Swietenia mahagoni*), Guaiaco

(*Guaiacum sp*), cedro-antilhano (*Cedrela odorata L*), amarelinho (*Chlorophora tinctoria L.*), Campêche (*Haematoxylon campechianum*), le tavernon² (*Lysiloma sabicu*), Carvalho Haitiano (*Catalpa longissima*) Simarouba (*Simaruba glauca*) (ROBAR, 1984).

As espécies de manguezais mais comuns são: *Avicennia germinans*, *Conocarpus erectus*, *Laguncularia racemosa* e *Rhizophora mangle*.

Na atualidade, as formações de floresta natural de pinheiro (*Pinus occidentalis*) e outras formações arbóreas têm sofrido forte redução, transformando-se em pequenos fragmentos vegetais e espécies isoladas, em função da pressão demográfica (KOOHAFKAN e LILIN, 1989). Este fato deve-se ao desmatamento incessante para abastecer o mercado de madeira, lenha e carvão, uma vez que a energia proveniente da biomassa lenhosa atende 75% das demandas energéticas domésticas (PNUD, 2010). Tal situação tem intensificado o processo erosivo, ocasionando profundas modificações na paisagem com imensas voçorocas e montanhas desnudas.

2.3 Atributos morfométricos

Alguns parâmetros morfométricos subsidiaram o reconhecimento de padrões topográficos da paisagem. Assim, a caracterização da região em estudo constou, entre outros, da utilização de atributos topográficos com os seus respectivos mapas. Para tanto, estes atributos divididos em primários e secundários foram derivados do modelo digital de elevação (MDE). No intuito de escolher o modelo mais acurado, foram comparados dois modelos digitais de elevação com 30 m (1") de resolução espacial, mas originados de fontes diferentes: O modelo ASTER-GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Global Digital Elevation Model*); e o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), gerado por sensor Radar na banda X. Assim, foi preciso efetuar o processamento dos modelos, removendo-se as depressões espúrias e examinando visualmente a rede de drenagem para torná-lo um modelo hidrologicamente consistente. Desta forma, a exatidão altimétrica desses MDEs foi avaliada por meio de 10 pontos de controle coletados no campo com o auxílio do receptor de sinais GNSS tipo geodésico, modelo Leica GS8 plus. O número reduzido de pontos foi em função na inexistência de base de monitoramento contínuo no Haiti, tendo que utilizar base existente na República Dominicana,

² Nome local haitiano

localizada a mais de 500 km da área de estudo, fazendo com que o tempo de registro no campo fosse superior a três horas para cada ponto. Os dados coletados foram processados no programa Leica Geo Office.

A partir das diferenças entre os pontos coletados e os MDEs utilizados, procedeu-se o cálculo da raiz quadrada média do erro quadrático (RMSE), que foi o parâmetro utilizado na avaliação da acurácia dos MDEs e, conseqüentemente, na sua comparação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_{pred} - Y_{ref})^2}{N}}, \text{ onde}$$

Y_{pred} : Valor predito;

Y_{ref} : Valor observado ou de referência; e

N: número de observação.

Além deste parâmetro, usaram-se alguns outros estatísticos juntos com os testes t de Student's e F de Fisher na comparação da média e do desvio padrão, respectivamente.

Na literatura o MDE SRTM tem acurácia vertical absoluta de 16 m (JARVIS et al., 2008; RABUS et al., 2003), enquanto o MDE Aster GDEM tem acurácia oscilando entre 20 m a 29 m (REUTER et al., 2009).

Os índices topográficos derivados dizem respeito à altimetria (MDE), declividade, aspecto, índice topográfico de umidade (TWI) e curvatura. Estes, conforme Western et al. (1999), assumem que a topografia é determinante no controle e na modificação dos processos hidrológicos atuantes na paisagem. Esses índices governam o fluxo de matéria e energia na paisagem, interferindo, portanto, nos atributos do solo (MOORE et al, 1993). Por isso, revelam relevantes na identificação dos padrões geomórficos observáveis na paisagem, explicando a variação local de parâmetros climáticos bem como a distribuição espacial de solos e de espécies vegetais, e levando em conta a intervenção humana na paisagem.

2.4 Estratificação geoambiental

O solo, em relação ao clima, à geologia e a outros fatores ambientais, é considerado como o melhor estratificador de ambientes (RESENDE & REZENDE, 1983). Neste sentido, a estratificação, a interpretação e a análise dos principais domínios geoambientais foram possibilitadas pelo reconhecimento de condicionantes biofísicos, os quais foram subsidiados por

bases cartográficas e visitas de campo na ocasião do levantamento pedológico. A demarcação das unidades geoambientais junto com o mapeamento destes, baseou-se em uma metodologia paramétrica utilizada em classificação de paisagem, a qual envolve o cruzamento de mapas temáticos para sintetizar as informações necessárias para distinguir os diferentes ambientes (KIM & PAULEIT, 2007; SWANWICK 2002). Trata-se, mais especificamente, de uma metodologia que se circunscreve no campo da ecogeografia e áreas afins.

Desta forma, os mapas de altitude, relevo, geologia, geomorfologia, de precipitação e de solos (Capítulos 2 e 4), juntamente com o conhecimento prévio da região em pauta, permitiram separar seis unidades geoambientais. Para este fim, os mapas no formato vetorial foram convertidos em formato matricial, sendo re-escalados para o intervalo entre 0 e 1. O re-escalamento foi aplicado para os demais atributos tais como a altitude e a relevo. Com o cruzamento desses mapas, as seis unidades geoambientais foram demarcadas, de forma semi-automatizada, auxiliando-se no classificador não supervisionado *Isocluste*. Portanto, foi necessário o pós-processamento do mapa derivado no intuito do seu refinamento, eliminando-se os possíveis ruídos.

O processamento dos dados espaciais foi realizado por meio dos aplicativos ArcGIS 10.2.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Acurácia do MDE, parâmetros estatísticos e distribuição dos atributos morfométricos

A comparação entre os MDEs utilizando os pontos de controle levantados com receptor GNSS geodésico como referência (Tabela 3), demonstrou que o MDE oriundo do SRTM apresentou RMSE de 14,7 m, enquanto o do Aster GDEM foi de 17,0 m. Foi também verificado o maior grau de aproximação dos pontos gerados pelo SRTM, dos de referência pelos testes de comparação da média e da variância, com p-valor de 0,96 e 0,9919, respectivamente.

Embora a amostra usada na avaliação dos modelos seja reduzida, o resultado obtido na comparação dos dois modelos concorda com o encontrado por Tighe e Chambelain (2009), comparando os modelos SRTM, ASTER, DED e NEXTMAP em diferentes áreas nos Estados Unidos. Por outro lado, a acurácia verificada pelo MDE SRTM no presente estudo supera o valor de 15,27 m (RMSE) encontrado pelos autores supracitados.

Quanto ao MDE Aster GDEM, verificou-se acurácia inferior à observada por Hirano et al. (2003), que encontraram RMSE com variação entre ± 7 m e ± 15 m. Porém, o mesmo resultado é inferior ao obtido por Tighe e Chamberlain (2009), que verificaram RMSE de 18,52 m. Entretanto, Tachikawa et al. (2011), reportaram valor de RMSE de 11,92 m para o Aster GDEM2 para a região da América do Norte; enquanto o valor diminuiu para 6,18 m quando a análise se restringe apenas às áreas expostas, sem floresta. Gesch et al. (2012) verificaram valores de RMSE de 9,34 m para o Aster GDEM 1 e 8,68 m para o Aster GDEM 2.

Tabela 3. Parâmetros estatísticos dos MDEs Aster GDEM e SRTM

Pontos	X	Y	Z	Erros Z	Aster GDEM	SRTM
GPS1	780984,74	2069862,73	77,19	0,0080	59,2	61,6
GPS2	780386,23	2072023,56	177,33	0,1605	160,0	160,2
GPS3	786669,31	2078974,93	643,27	0,0101	625,2	627,3
GPS4	771211,48	2074452,45	51,35	0,0296	40,0	40,5
GPS5	757170,95	2084505,50	72,54	0,0481	54,2	60,0
GPS6	743377,73	2095924,79	24,33	0,0207	12,5	13,6
GPS7	780968,38	2069878,48	78,55	0,7931	59,2	61,6
GPS8	784592,78	2063045,95	25,04	0,0062	10,8	0,0
GPS9	787721,77	2041455,34	1546,95	0,2708	1527,2	1540,0
GPS10	786899,19	2040226,39	1679,73	0,2276	1656,1	1664,9
GPS11	720987,74	2033754,12	581,63	0,0203	571,2	581,9
Parâmetros estatísticos						
Média	-	-	450,7	0,10	434,1	437,4
Desvio P.	-	-	615,2	0,24	612,9	617,2
Variância	-	-	378470,4	-	375626,6	380960,2
RMSEz	-	-	-	-	17,02	14,66
^{1/} Teste t (valor p)	-	-	-	-	0,95	0,96
^{2/} Teste F (valor p)	-	-	-	-	0,9907	0,9919

^{1/}Teste “t” de student’s entre Z e Aster GDEM; Z e SRTM ao nível de confiança de 95%.

^{2/} Teste de Fisher entre Z e Aster GDEM; Z e SRTM ao nível de confiança de 95%.

A partir do modelo digital SRTM foram derivados os atributos declividade; aspecto; índice de umidade topográfica (TWI); curvatura e perfil de curvatura, cujos parâmetros estatísticos são apresentados na Tabela 4. Nessa análise descritiva, é bem evidente a alta variabilidade dos atributos do terreno com destaque para altitude e declividade, com coeficiente de variação (CV%) de 85,7% e 83,5%, respectivamente (Tabela 4). No que tange à altitude da região, é possível observar que esta apresenta grande variação desde o litoral (~0 m) à elevação correspondente ao ponto

culminante: *La Selle* (mais de 2650 m). Já a declividade apresenta forte variação, semelhante à da altitude, com valores mínimo e máximo de 0% a 124%, respectivamente. Isso traduz a complexidade da paisagem estudada quanto à altitude e ao relevo.

Tabela 4. Parâmetros estatísticos dos atributos do terreno

Atributos	Min	Max	Média	Desvio padrão	CV (%)
Altitude (m)	0	2666	630	537	85,2
Declividade (%)	0,0	191,0	26,3	22,2	84,4
WTI	2,8	24,2	8,1	3,1	38,3
Curvatura	-3,4	5,9	0,0	0,4	-
Perfil de curvatura	-4,4	3,0	0,0	0,2	-
Aspecto	-1	360	175,3	115,7	66,0

a) Altitude

A altitude da região estudada apresenta-se com grande variação entre 0 m a 2666 m (Tabela 5, Figura 7). Ao analisar os valores, depreendeu-se que apenas 16,1% da área está abaixo da cota de 50 m. Por outro lado, foi observado que mais de 45% da área apresenta altitude acima de 600 m, destes 18,4% está entre 1000 m e 1600 m, e 5,9% ultrapassa os 1600 m. Essa grande variabilidade topográfica leva à diversificação do clima local, da fitofisionomia, e potencializa a susceptibilidade da região à erosão, conforme apontado por Moore et al. (1991).

Tabela 5. Distribuição da altitude na área estudada em porcentagem.

Classe de Altitude (m)	Área (%)
0-50	16,1
50-200	14,7
200-400	10,2
400-600	11,3
600-1000	23,4
1000-1600	18,4
1600-2000	4,2
>2000	1,7

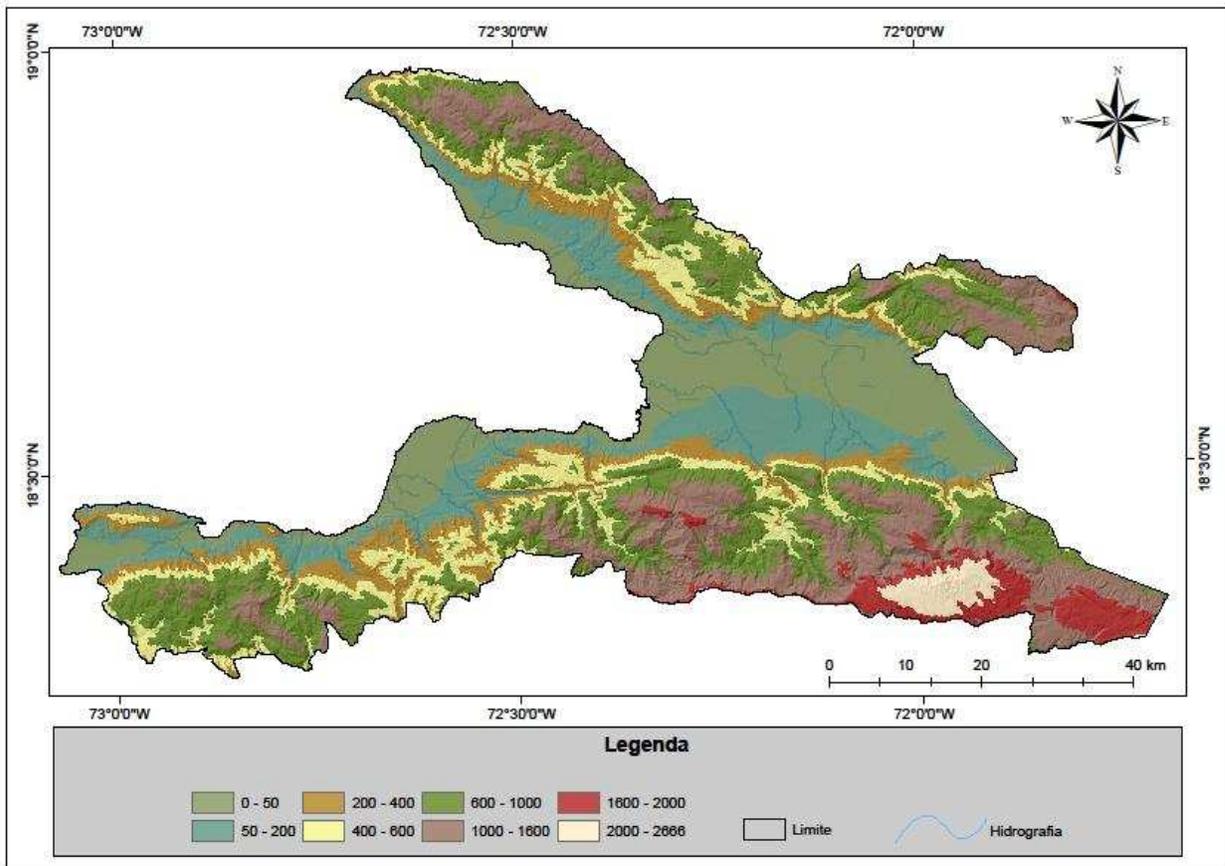


Figura 7. Modelo digital de elevação da região estudada.

b) Declividade

A declividade da região foi obtida segundo a classificação adotada pela Embrapa (1999). Com base nessa, foi verificado que o relevo da região é intensamente movimentado, com 42,5% da área apresenta relevo fortemente ondulado a montanhoso ($20\% < \text{declividade} \leq 75\%$), e apenas 20,0% com relevo plano (Tabela 6). Notou-se ainda uma proporção de 2,5% da área com relevo escarpado, o qual ocorre predominantemente nas vertentes superiores a 400 m (Figura 8).

Esta característica do relevo propicia condições favoráveis para a atuação de processos erosivos com intensa denudação e produção de sedimentos. Por conseguinte, o domínio dos relevos íngremes prioriza mecanismos de perdas de solos com constante rejuvenescimento dos mesmos.

Tabela 6. Distribuição do relevo na área estudada em porcentagem.

Classe de declividade (%)	Área (%)
0-3 (Plano)	20,0
3-8 (Suave ondulado)	8,6
8-20 (Ondulado)	16,4
20-45 (Forte ondulado)	34,1
45-75 (Montanhoso)	18,4
>75 (Escarpado)	2,5

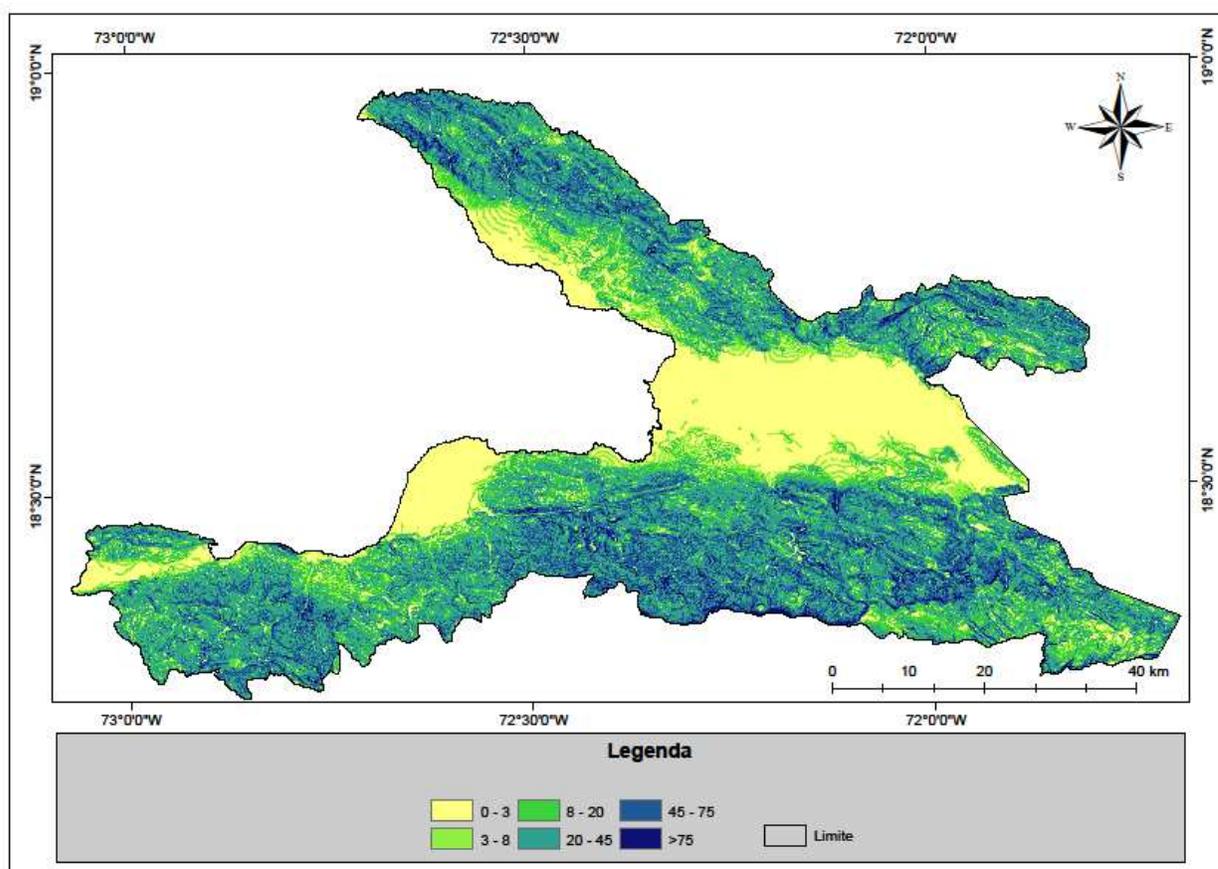


Figura 8. Distribuição espacial da declividade

c) Aspecto

O aspecto que define a orientação dos vertentes ou a variação no potencial de radiação solar em uma determinada bacia hidrográfica, ou numa região, foi reclassificado em cinco classes (Figura 9): plano (0°), norte ($0^{\circ} - 45^{\circ}$ e $315^{\circ} - 360^{\circ}$), leste ($45^{\circ} - 135^{\circ}$), sul ($135^{\circ} - 225^{\circ}$) e oeste ($225^{\circ} - 315^{\circ}$). Conforme apresentado na Tabela 6, observou-se o predomínio das faces voltadas pelo norte, representando 32,6% da área, seguidas pelas faces sul (24,1%), oeste (22,3%), leste (16,9%) e plano (4,1%). Esta configuração do terreno pode ser benéfica para a recuperação da vegetação na região, ao passo que as faces orientadas pelo norte no hemisfério norte costuma ser mais úmidas e mais frias (BOHN et al., 2002; MONGER e BESTELMEYER, 2006).

Tabela 7. Distribuição do aspecto na área estudada em porcentagem.

Aspecto ($^{\circ}$)	Área (%)
-1-0 (Plano)	4,1
0 - 45 e 315 - 360 (Norte)	32,6
45 - 135 (Leste)	16,9
135 - 225 (Sul)	24,1
225 - 315 (Oeste)	22,3

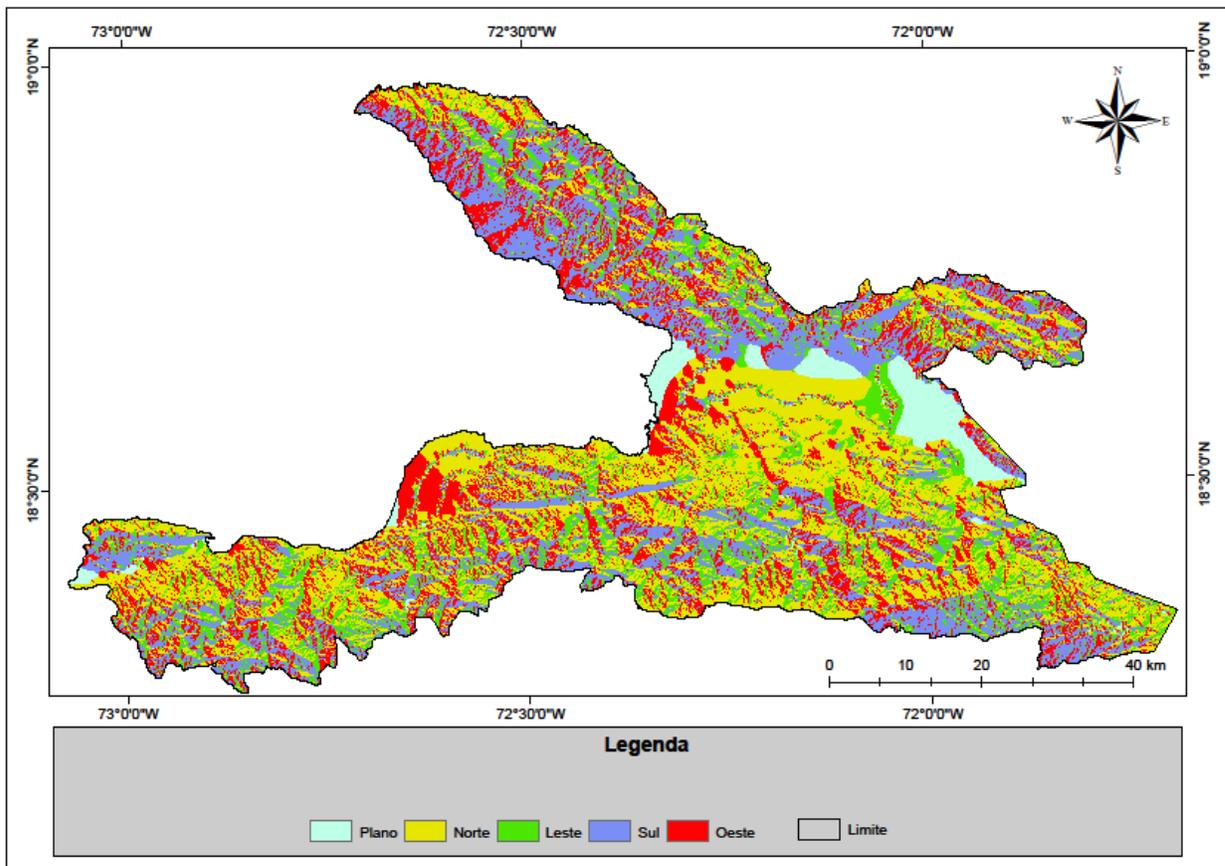


Figura 9. Aspecto

d) Curvatura e perfil de curvatura

A curvatura de uma determinada paisagem é importante para a interpretação dos processos de transporte de sedimentos. Nesta análise, consideraram-se a superfície de curvatura e o perfil de curvatura, os quais foram classificados em convexo, plano e côncavo (Tabela 8). Foi verificado que a superfície de curvatura planar foi de 31,0%; enquanto a curvatura côncava e a curvatura convexa foram praticamente iguais, 34,2% e 34,8%, respectivamente.

Os resultados encontrados para o perfil de curvatura indicam que 38,1% das encostas são planas, 30,2% são convexas e 31,7 são côncavas. O perfil de curvatura afeta a aceleração e desaceleração de fluxo. É um importante determinante dos processos de erosão e deposição na escala de encosta (MOORE e BURCH, 1986). Assim, a configuração do terreno a respeito desses dois atributos denota o comportamento pariforme do fluxo hidrológico na região.

Tabela 8. Distribuição da curvatura e do perfil de curvatura na área estudada em porcentagem.

Curvatura	Área (%)
-3,4 (Côncavo)	34,2
0 (Plano)	31,0
5,9 (Convexo)	34,8
Perfil de curvatura	Área (%)
-4,4 (Convexo)	30,2
0 (Plano)	38,1
3,0 (Côncavo)	31,7

e) Índice Topográfico de umidade (WTI)

Os resultados obtidos pelo índice topográfico de umidade (WTI) variam de 2,8 a 24,2, os quais foram reclassificados e apresentados na Tabela 9. Com base na classificação, foi verificado que valores menores que 6,0 representam 29,7% da área; os situados entre 6,0 e 9,0 correspondem a 41,1%; e os encontrados no intervalo 9,0 e 12,0 representam 15,8%. A quarta classe (12,0 e 15,0) e a quinta classe ($\geq 15,0$) por sua vez representam 8,4% e 5,0% da área, respectivamente. As duas primeiras classes, que totalizam uma área relativa de 70,8%, caracterizam os setores mais bem drenados e dissecados, os quais correspondem às vertentes mais declivosas com alta densidade de drenagem e locais de solos rasos. As três últimas classes, que perfazem 29,2% da área, refletem os locais com tendência a maior saturação por umidade (Figura 10).

Tabela 9. Distribuição do índice de umidade topográfica em porcentagem.

WTI	Área (%)
<6,0	29,7
6,0 – 9,0	41,1
9,0 – 12,0	15,8
12,0 – 15,0	8,4
$\geq 15,0$	5,0

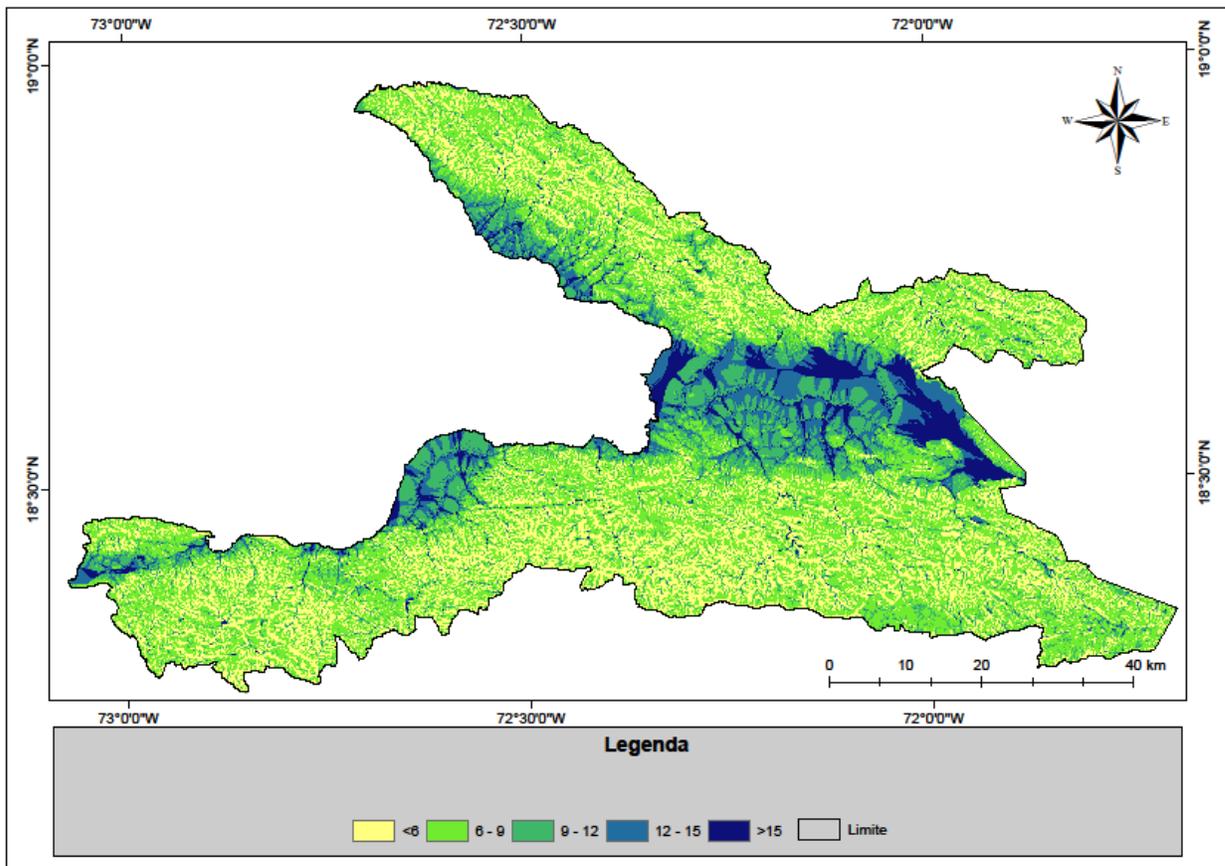


Figura 10. Índice de umidade topográfico

3.2 Caracterização dos principais domínios geoambientais

Conforme mencionado no item 2.4, foram demarcados 6 domínios geoambientais conforme apresentados na Figura 11 e resumidos na Tabela 10.

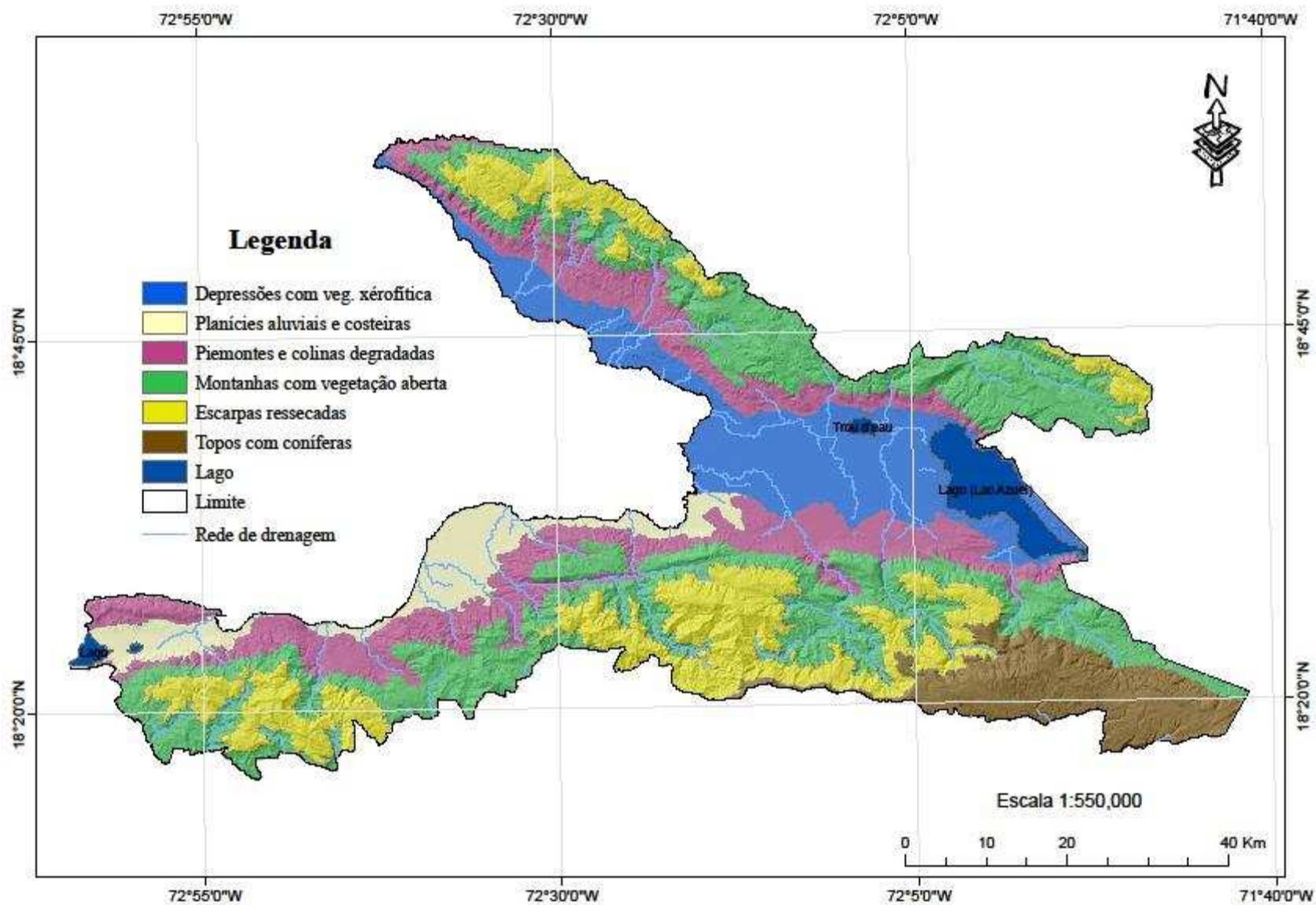


Figura 11. Unidades geoambientais da área de estudo.

3.2.1 Depressões com vegetação xerofítica

Características gerais- Esta unidade representa 16,4% da área total e se estende desde a fronteira haitiano-dominicana à toda faixa litorânea noroeste, compreendendo a baixada de de *Cul-de-sac*, *Port-au-Prince*, as planícies de Cabaret e *Arcahaie*.

Geologia, geomorfologia e solos- A litologia é composta, principalmente, por aluviões e materiais detríticos depositados pelos rios que atravessam a área e pelas águas de escoamento na ocasião de enxurradas. O relevo plano a suave ondulado, possui declividade média <3% e tem sido local de frequentes inundações. Apresenta alguns manguezais no litoral. O pedodomínio desta unidade é composto pelos Neossolos Flúvicos associados a Gleissolos e Cambissolos, todos com boa fertilidade natural (Capítulo II).

Clima e vegetação- Apresenta baixa precipitação, com média anual de 950 mm, podendo ser inferior a 750 mm, além de alta taxa de evapotranspiração. A situação típica de semiaridez também é reletida na fitofisionomia savânica, constituída principalmente por espécies xerófilas arbustivas. Entretanto, em locais onde o lençol freático se aproxima da superfície e também nas áreas irrigadas, encontram-se algumas árvores florestais e frutíferas isoladas.

Uso do solo- A agricultura irrigada e a urbanização constituem a principal classe de uso do solo. Dentre as culturas mais cultivadas destacam-se diferentes variedades de banana, feijão, milho e cana de açúcar. As mangas também têm uma contribuição importante na formação da renda dos agricultores.

Convém ressaltar que a capital era, antigamente, abastecida por diversos produtos agrícolas provindo deste ambiente. Apesar da sua importância agrícola, esta unidade tem sofrido profundas transformações nos últimos 30 anos que têm acarretado uma urbanização descontrolada em detrimento das atividades agropecuárias (Figura 12).



Figura 12. Paisagem típica e uso do solo na unidade “Depressões com vegetação xerofítica”. A esquerda bananeiras irrigadas por gravidade em área de Neossolo Flúvico. A esquerda, vegetação xerófila nativa.

3.2.2 Planícies aluviais e costeiras

Características gerais- Ocupando 6,5% da área, esta unidade corresponde à parte sudoeste da região e é formada pelas planícies que se estendem desde *Gresssier* a *Petit-Goâve*.

Geologia, geomorfologia e solos- A litologia é composta por acumulações detríticas e clásticas de origem calcária e basáltica; enquanto a geomorfologia envolve formas agradacionais flúvio-marinhas em relevo predominantemente plano com altitude média menor que 50 m e declividade média de 6%. Ambientes pantanosos e manguezais são observados em locais próximo ao litoral, promovendo a formação de Neossolos Flúvicos associados Gleissolos.

Clima e vegetação- Esta unidade é bem mais úmida que a apresentada anteriormente, com precipitação média de 1.345 mm. Além da presença de espécies arbustivas, encontram-se diversas espécies de árvores florestais e frutíferas, sendo as mais comuns a *Catalpa longissima* Cham., *Artocarpus incisa/Artocarpus communis*, *Mangifeira indica* L., *Oreodoxa regia* H.B.K., *Cocos nucifera* e *Switenia mahogani*.

Uso do solo- A presença de infraestruturas urbanas tem tornado esse domínio densamente povoado, com intensa e diversificada utilização do solo. A expansão descontrolada e desordenada das áreas urbanas e periurbanas tem restringido progressivamente as áreas agrícolas, sobretudo na planície de *Léogâne*. As principais culturas agrícolas encontradas neste domínio são: banana, feijão, milho, cana de açúcar, arroz e manga (Figura 13).



Figura 13. Paisagem típica e uso do solo na unidade “Depressões e planícies antropizadas”, com Organossolo ocupado com cana-de-açúcar.

3.2.3 Piemontes e colinas degradadas

Características gerais- Esta unidade localiza-se na borda superior das duas primeiras unidades e representa 19,2% da região em pauta.

Geologia, geomorfologia e solos- Os materiais litológicos encontrados nesta unidade são Leque aluvial, calcário duro e calcário margoso com intrusão de basalto na parte sudoeste. A altitude média é de 250 m e o relevo é fortemente ondulado (Figura 14). As feições geomórficas são compostas por morrotes e colinas onde os processos pedogenéticos são bem restritos. Os solos mais comuns são Neossolos Litólicos associados aos afloramentos rochosos. Entretanto, na parte sul-sudoeste ocorrem com menor extensão Cambissolos e Chernossolos.

Clima e vegetação- A precipitação média atinge 1.500 mm. Nesta unidade se desenvolve uma vegetação rala típica de solos rasos, em que as espécies arbustivas e herbáceas ocupam um grau de importância maior.

Uso do solo- Neste domínio geoambiental pratica-se uma agricultura pouco tecnificada com as culturas de sorgo, milho, feijão-guandu, batata-doce e mandioca. O amendoim cultivado em alguns locais potencializa ainda mais a erosão dos solos. Mesmo com densidade populacional relativamente menor, a supressão desenfreada da cobertura vegetal e as práticas agrícolas inadequadas aceleram o processo de degradação, acarretando extensas áreas desnudadas e de afloramentos rochosos.



Figura 14. Paisagem típica de “Piemontes e colinas degradadas”.

3.2.4 Montanhas com vegetação aberta

Características gerais- Esta unidade corresponde à parte das cadeias montanhosas *Chaîne des Matheux* e *Chaîne du Trou d’Eau*, incluindo o município de *Cornillon*, ocorrendo também em toda a parte sul da região, com maior extensão geográfica representando 31,4% da área total (Figura 15).

Geologia, geomorfologia e solos- O calcário duro, o calcário margoso, o basalto junto com materiais piroclásticos, compõem a litologia desta unidade. As feições geomorfológicas são dominadas pelos maciços residuais. A altitude média ultrapassa 700 m e o relevo é fortemente ondulado a montanhoso. Os Neossolos Litólicos e o afloramento rochoso predominam no

pedossistema desta unidade. Porém, em relevo um pouco aplainado ocorrem Luvisolos, Cambissolos, Chernossolos e Vertissolos.

Clima e vegetação- Este domínio apresenta clima mais úmido com uma temperatura amena. A precipitação média neste ambiente ultrapassa 1600 mm. A vegetação é do tipo aberto e composto por espécies de árvores e arbustivas.

Uso do solo - As condições climáticas locais favorecem a diversificação das atividades agrícolas com cultivos de milho, sorgo, amendoim, batata doce e banana. Em alguns locais é praticado sistema agroflorestal pouco tecnificado com plantação de cafeeiro e inhame. Entretanto, o relevo movimentado degradacional, em conjunto com o desmatamento acelerado e práticas agrícolas não conservacionistas, transforma esse domínio em um ambiente completamente alterado.



Figura 15. Paisagem típica de “Montanhas com vegetação aberta”.

3.2.5 Escarpas dissecadas

Características gerais- Este domínio apresenta-se fragmentado e abrange uma área correspondendo a 18,2% da área total (Figura 16).

Geologia, geomorfologia e solos- O calcário e formações vulcano-sedimentares formam a litologia desta unidade. A declividade média é de 39%, porém apresenta muitas encostas acima de 75%, dando características de relevo escarpado em boa parte da área. A altitude média é de 1.132 m, atingindo valores superiores a 1.900 m em alguns pontos. O ambiente é esculpado por intensa erosão, devido ao relevo ser íngreme; o que ocasiona a presença de uma rede de drenagem

desenvolvida com vales profundos associados a expressivas áreas de afloramento rochoso. Os Neossolos Litólicos e afloramento rochoso em associação com os Nitossolos e os Cambissolos compõem o pedodomínio.

Clima e vegetação- O clima desta unidade é mais úmido que as demais, com precipitação média de aproximadamente 1.800 mm e temperatura amena. A vegetação associada a este domínio envolve espécies arbustivas e arbórea, esta última é encontrada de forma esparsas, sendo incluídos pinheiros (*Pinus occidentalis*) e espécies ombrófilas.

Uso do solo- A agricultura praticada neste ambiente é de baixo nível tecnológico devido às restrições impostas pelo ambiente. As culturas comumente praticadas na parte menos úmidas são milho, feijão e sorgo; enquanto na parte mais úmida e fria predomina a cultura de hortaliças com tomate, alface, batata, couve e feijão.



Figura 16. Paisagem típica “Escarpas dissecadas”.

3.2.6 Topos com coníferas

Características gerais- Esta unidade que ocorre no sudoeste da região é a continuidade da cadeia montanhosa *La Selle* na direção Leste-Oeste, abrangendo 8,3% da área total da região.

Geologia, geomorfologia e solos- Neste domínio, encontram-se o calcário pelágico e rochas vulcano-sedimentares; e em diversos locais, aflora o embasamento basáltico. Esta unidade é caracterizada por suas montanhas imponentes e seus vales profundos e encaixados. A altitude média é de 1.700 m e abrange parte da cadeia montanhosa *La Selle* possuindo ponto culminante de mais de 2.600 m. Compõem ainda esta unidade os relevos montanhosos e escarpados (Figura 17). Encontram-se nesta região os solos mais intemperizados inclusive os Nitossolos em complexo com Neossolos Litólicos e afloramento de rochas

Clima e vegetação- A vegetação primária é em maioria composta por espécies de conífera (*Pinus occidentalis*) que formam uma floresta denominada *Forêt des pins*. Estas espécies se adaptam aos solos jovens, rasos e aos saprolitos do ambiente úmido.

Uso do solo- A densidade demográfica é menor neste ambiente e a cultura de hortaliças representa a principal produção agrícola desta região. Possui os últimos fragmentos maiores do *Pinnus occidentalis*.



Figura 17. Paisagem típica da unidade “Topos com coníferas”.

Tabela 10. Principais características dos domínios geoambientais

Domínio geoambiental	Litologia dominante	Pedodomínio	Precipitação (mm)	Altitude média (m)	Declive médio (%)	Vegetação	Área (%)
Depressões com vegetação xerofítica	Materiais detríticos, clásticos	Neossolo Flúvicos, Gleissolos	945	40	2,8	Mistura de suculentas e/ou espécies xerofíticas com outras espécies rasteiras; algumas árvores isoladas frutíferas e florestais.	16,4
Planícies aluviais e costeiras	Materiais detríticos, clásticos de origem calcária e basáltica	Neossolos Flúvicos, Gleissolos	1345	48	5,8	Mistura de espécies frutíferas e florestais em vegetação secundária. Área com intensas atividades agrícolas com diferentes tipos de lavouras.	6,5
Piemontes e colinas degradadas	Calcário, materiais coluvinares e cone de dejeção	Neossolos Litólicos, Cambissolos, Chernossolos, Afloramentos rochosos	1375	248	19,2	Vegetação arbustiva e esparsa.	19,2
Montanhas com vegetação aberta	Calcário com inclusão de Materiais vulcanicos	Neossolos Litólicos, Chernossolos, Afloramentos rochosos	1637	710	35,7	Vegetação aberta formada por espécies de árvores e arbustivas.	31,4
Escarpas dissecadas	Calcário com inclusão de Materiais vulcanicos	Afloramentos rochosos, Neossolos Litólicos	1793	1132	38,6	Espécies arbustivas e de árvores esparsas associadas a pinheiros.	18,2
Topos com coníferas	Calcário com inclusão de Materiais vulcanicos	Nitossolos, Chernossolos, Afloramentos rochosos, Neossolos Litólicos.	1696	1742	32,2	Vegetação primária é dominada pela espécie de Pinus occidentalis em formação florestal e presença de espécies ombrófilas.	8,3

4 CONCLUSÕES

- A região ocidental do Haiti apresentou seis unidades geoambientais considerando a integração de dados biofísicos ou ambientais em SIG no intuito de entender as interações dinâmicas entre atividades humanas e a paisagem.
- A região estudada apresenta grande complexidade geomorfológica, pois o relevo mostra-se bem movimentado com a rede de drenagem densa e bastante ramificada; o gradiente de elevação é altamente variável desde o litoral até as cadeias montanhosas proeminentes e a precipitação segue o gradiente topográfico. Tal complexidade foi revelada pelos atributos topográficos.
- Entre as seis unidades geoambientais, as unidades Depressões com vegetação xerófila e Planícies aluviais e costeiras se distinguiram pelas características pedogeomorfológicas, pelo potencial agrícola e pela forte pressão de uso, contrastando assim com os demais geoambientes.
- Devido ao relevo ser íngreme e à forte atuação dos processos morfogenéticos, os Neossolos Litólicos e os Afloramentos rochosos ocorrem em maior extensão geográfica. Estes condicionantes junto com a alta densidade demográfica, o desmatamento descontrolado e as práticas agrícolas não sustentáveis representam os principais agravantes para a avançada degradação do ambiente.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAGGIONI-LOPEZ, N. **Saint-Domingue/Haïti : histoire, géographie**. 2013. 118pp.
- BOLONGARO-CREVENNAA, A. ; TORRES-RODRÍGUEZA, V. ; SORANIC, V. ; FRAMED, D. ; ORTIZ, M. A. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. **Geomorphology**, 2005, p 407–422.
- BOHN, H. L.; MYER, R. A.; O'CONNOR, G. A. **Soil chemistry**. John Wiley & Sons, 2002, p. 320.
- BOHNET, I.; SMITH D. M. Planning future landscapes in the Wet Tropics of Australia: A social-ecological framework. **Landscape and Urban Planning**, v. 80, p. 137–152, 2007.
- BURBANK, D. R.; ANDERSON, S. **Tectonic geomorphology**. John Wiley & Sons. 2001. 287 p.

BUREAU DES MINES ET DE L'ÉNERGIE (BME). **Inventaire des ressources minières de la République d'Haiti – dossier promotionnel – Fasciculé VI Département de l'Ouest**. Direction de la géologie et des mines. Port-au-Prince - Haiti. 1992. P45.

BURGESS N. D.; CLARKE, G. P. **Coastal forests of eastern Africa**. IUCN—The World Conservation Union. Cambridge and Gland, IUCN, 2000. p 443.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. New York, Oxford University Press, 1986. p.237.

CENTRE DE RECHERCHE ET DE DOCUMENTATION AGRICOLE (CRDA). **Haiti : rapport de pays pour la conférence technique internationale de la FAO sur les ressources phytogenétiques** (Leipzig, 1996). MARNDR, Damien, Port-au-Prince. 1995. 27p.

CHAVES, A. D., ROCHA, M. F., PEREIRA, M. G. **Solos e aptidão agrícola das terras nas seções comunais do Mapou, Collines des chênes e Pichon**. 2010. 101p. Dissertação (Mestrado em ciência do solo), Instituto de Agronomia / Curso de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo - UFRRJ, Seropédica.

COLMET-DAAGE, F.; DELAUNE, M.; ROBBART, F.; LOHIER, G.; YOUANCE, J.; GAUTHEYROU, J. et M.; FUSIL, G.; KOUKOU, M. Caractéristiques et nature de la fraction argileuse de quelques sols rouges d'Haïti situés sur calcaires durs. **Cahier O.R.S.T.O.M.**, sér. Pédol., v. 7, n. 3, p. 1-71, 1969.

DIAS, H. C. T.; FILHO, E. I. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, L. E. F.; VENTORIM, L. B. Geoambiente do Parque Estadual do Ibitipoca município de Lima Duarte - MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 6, p.777-786, 2002.

DOLISCA, F.; MCDANIEL, J. M.; SHANNON D. A.; JOLLY, C. M. Modeling farm households for estimating the efficiency of policy instruments on sustainable land use in Haiti. **Land Use Policy**, v. 26, n. 1, p. 130–138, 2009.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, SPI/ CNPS, 1999. 412p.

EVANS, I. S; HENGL, T.; GORSEVSKI, P. Applications in Geomorphology. In: HENGL, T and REUTER, H. I. (eds), Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. **Developments in Soil Science**, vol. 33, Elsevier, Amsterdam, p. 497-525, 2009.

FAGERHOLM, N; KÄYHKÖ, N.; EETVELDE, V. V. Landscape Characterization Integrating Expert and Local Spatial Knowledge of Land and Forest Resources. **Environmental Management**, v. 52, p. 660–682, 2013.

FALL, A; FALL, J. A domain-specific language for models of landscape dynamics. **Ecological Modelling**. v. 141, n. 1, p. 1-18, 2001.

FLORINSKY, I.V., EILERS, R.G., MANNING, G.R., FULLER, L.G. Prediction of soil properties by digital terrain modelling. **Environmental Modelling and Software**. v. 17, n. 3, p. 295– 311, 2002.

FONTELLA, L. G.; MEDEIROS, E. W. Revolução haitiana: o medo negro assombra a américa. *Disc. Scientia. Série: Ciências Humanas*, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 59-70, 2007.

GEO HAITI. **État et Perspectives de l'Environnement**. PNUE/MDE/UNIQ. Haiti. 200p.2010.

GESCH, D., OIMOEN, M., ZHANG, Z., MEYER, D., DANIELSON, J. Validation of the Aster global digital elevation model version 2 over the conterminous United States. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Volume XXXIX-B4. 2012.

GIRARD, P. Haiti: **The Tumultuous History- From Pearl of the Caribbean to Broken Nation**. New York: Palgrave. 2010. 243 p.

GUTHRIE, R. L.; SHANNON, D. A. Soil profile descriptions for steeplands research sites in Haiti. United States Agency for International Development Soil Management. **Collaborative Research Support Program**. Auburn University, Alabama, 36849-5412 U.S.A. Technical Bulletin No. 2004-01. 24 p.

BUTTERLIN, J. ; & HASPIL, A. **Les principaux types de sols de la République d'Haïti et leur répartition géographique**. Port-au-Prince, 1955. P 1-15. (Bulletin agricole, février 1955).

HIJMANS, R.J., S.E. CAMERON, J.L. PARRA, P.G. JONES AND A. JARVIS. **Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas**. 2005. .

HOWARD, J. A.; MITCHELL, C. W. **Phytogeomorphology**, John Wiley and Sons, New York, New York. 1985. 222 p.

HUGGETT, R. J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. **Catena**, v. 32, n. 3, p. 155–172, 1998.

HUTCHINSON, M.; GALLANT, J. Digital elevation models and representation of terrain shape: **in Wilson, J; Gallant, J (ed.)**. Terrain Analysis: Principles and Applications. John Wiley & Sons, 2000, p. 29-50.

HYLKEMA, A. L. **Haiti Soil Fertility Analysis and Crop Interpretations for Principal Crops in the Five WINNER Watershed Zones of Intervention**. 2011. 38 p. Disponível em: <<https://soils.ifas.ufl.edu/docs/pdf/academic/papers/Hylkema-Amy.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2015.

INSTITUT HAÏTIEN DE STATISTIQUE ET D'INFORMATIQUE (IHSI). **Population totale, de 18 ans e plus : Ménages et densités estimés en 2015**. Ministère de l'Économie et des Finances (MEF). Port-au-Prince. 2015.

JARVIS, A., H.I. REUTER, A. NELSON, E. GUEVARA. **Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database**. 2008. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

KEBREAU, F. 1960. **Contribution à l'étude des plantes médicinales et toxiques d'Haïti**. (Cours Miméographie) FAMV, Damien Port-au-Prince, 82p.

- KIM, K-H, PAULEIT, S. Landscape character, biodiversity and landuse planning: the case of Kwangju City Region, South Korea. **Land Use Policy**, v. 24, p. 264–274, 2007.
- KOOHAFKAN, A. P; LILIN, CH. Arbres et arbustes d'Haïti. **MARNDR, FAO**, Haïti. 1989. pp 133.
- MAURRASSE, F., J-M. R. **Survey of the geology of Haiti. Guide to the field excursions in Haiti**. Miami Geological Society, Miami, FL., 103 p, 1982.
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE DES RESSOURCES NATURELLES ET DU DEVELOPPEMENT RURAL (MARNDR). **Plan d'action pour le relèvement et le développement national-les grands chantiers pour l'avenir (PARDN)**. Port-au-Prince, 2010. 34p. (Etudes post-séisme).
- MONGERA, H. C.; BESTELMEYER, B. T. The soil-geomorphic template and biotic change in arid and semi-arid ecosystems. **Journal of Arid Environments**, v. 65, n. 2, p. 207-218, 2006.
- MOORE I.D.; GRAYSON R.B.; LADSON A.R. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrol Process**, p.3–30, 1991.
- MOORE, D.; BURCH. G. J. Modelling erosion and deposition: topographic effects. **Transactions of the ASAE**, v. 29, n. 6, p. 1624- 1630, 1986.
- MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. **Soil Science Society of America**, v. 57, n. 2, p. 443-452, 1993.
- MORAL, P. **Le paysan Haitien** : Étude sur la vie rurale e Haiti. G. P. Maisonneuve & Larose, 1961. 375 p.
- NAVARRO-ANDRAUD, Z. **Les élites urbaines de Saint-Domingue dans la seconde moitié du XVIIIe siècle** : la place des administrateurs coloniaux (1763-1792). 2007. 1015 p.
- PNUD. **Environmental Degradation Plagues Haiti Earthquake Recovery. 2010**. Disponível em:<<http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=630&ArticleID=6656&l=en>>. Acesso em : 12 dez. 2014.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission — a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p. 241 – 262. 2003.
- RESENDE, M.; REZENDE, S. B. Levantamentos de solos: uma estratificação de ambientes. **Informe Agropecuário**, v. 9, n. 105, p. 3-25, 1983.
- RESENDE, M.; LANI, J. L.; REZENDE, S. B. Pedossistemas da Mata Atlântica: considerações pertinentes sobre a sustentabilidade. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 261-269, 2002.
- REUTER, H. I.; NELSON, A.; STROBL, P.; MEHL, W.; JARVIS, A. **A first assessment of ASTER GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters**. IGARSS. 2009. Disponível em:

<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.1653&rep=rep1&type=pdf>>.
Acesso em: 15 maio 2015.

ROBAR, G. **Végétation de la République d'Haiti**. 1984. 213p. (Thèse de Doctorat ès Sciences), Université Scientifique et Médicale de Grenoble : France. 1984.

SCHEIDEGGER, A. E. The principle of antagonism in the earth's evolution. **Tectonophysics**, v. 55, n. 3, p. 7-10, 1979.

SEN, G.; HICKEY-VARGAS, R.; WAGGONER, D. G; MAURRASSE, F. Geochemistry of basalts from the Dumisseau Formation, southern Haiti: implications for the origin of the Caribbean Sea crust. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 87, p. 423-437, 1988.

STRAHLER, A. **Geografia Física**. Barcelona: Omega. 1974, 550 p.

SWANWICK, C. **Landscape character assessment**. Guidance for England and Scotland. Countryside Agency, Cheltenham and Scottish Natural Heritage, Edinburgh, pp 84, 2002.

SWEET, A. T. The soils of Haiti. **US Bureau of Soils**. 1924. 86p. (Report).

TACHIKAWA, T.; KAKU, M.; IWASAKI, A.; GESCH, D.; OIMOEN, M.; ZHANG, Z.; DANIELSON, J.; KRIEGER, T.; CURTIS, B.; HAASE, J.; ABRAMS, M.; CRIPPEN, R.; CARABAJAL, C. **ASTER Global Digital Elevation Model Version 2** – Summary of Validation Results. ASTER GDEM Validation Team. 2011. 27p.

TIGHE, M. L.; CHAMBERLAIN, D. **Accuracy comparison of the SRTM, ASTER, NED, NEXTMap USA Digital Terrain Model over several USA study sites**. Proceedings of the ASPRS/MAPPS 2009 Fall Conference, San Antonio, TX. 2009.

WESTERN, A. W.; GRAYSON, R. B., BLÖSCHL, G., WILLGOOSE, G. R.; MCMAHON, T. A. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. **Water resources research**, v. 35, n. 3, p. 797-810, 1999.

WOODRING, W.P., J.S. BROWN, AND W.S. BURBANK. **Geology of the Republic of Haiti**. Department of Public Works, Baltimore, Maryland: Lord Baltimore Press. 1924. 631p.

CAPÍTULO II

SOLOS SOB INFLUÊNCIA DE MATERIAIS CALCÁRIOS E BASÁLTICOS NO HAITI OCIDENTAL

RESUMO

Os solos da região oeste do Haiti se desenvolveram em contexto geomorfológico complexo que propicia a atuação do mecanismo remoção-deposição. Esses solos que se formaram sob influência de materiais calcário e basáltico, relevo movimentado e clima espacialmente variável, têm sido pouco estudados quanto aos mecanismos e processos que condicionaram sua gênese. Diante disso, o principal objetivo deste estudo foi avaliar as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos da área em pauta. Para isso, realizou-se o levantamento pedológico na região, seguido por análises física, química e mineralógica das amostras coletadas. Os perfis levantados foram classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). A cobertura pedológica é diversificada e composta especialmente por Neossolos Litólicos, incluindo-se os Neossolos Flúvicos, Gleissolos, Cambissolos, Chernossolos. Foi também observada extensa área com afloramento de rochas, dados à baixa cobertura florestal e ao relevo acidentado. Os solos, apesar de serem rasos, são bem estruturados e apresentam as classes texturais variando de média a muito argilosa. Quimicamente, esses solos se caracterizam pelo pH básico ($\text{pH } 7,8 \pm 0,74$), saturação por bases acima de 90%, com contribuição expressiva do cálcio, traduzindo a forte ligação do solo com o material de origem. O caráter eutrófico desses solos se correlaciona com a presença de argilo-minerais 2:1, tais como esmectita, vermiculita, illita e mica, que prevalecem na mineralogia da fração argila. Além do quartzo ser o mineral mais comum nas frações areia e silte, verificou-se a ocorrência de vários minerais primários, tais como feldspatos, plagioclásio e calcita, constituindo a reserva mineralógica e química desses solos. A presença da caulinita nos solos alcalinos localizados em baixada, sugere que este mineral foi depositado pela erosão hídrica de antigas superfícies pré-intemperizadas, situadas em cotas mais elevadas, pois o baixo índice pluviométrico desfavorece a atuação do processo de dessilicificação dos minerais primários e secundários 2:1, necessário para a caulinitização. Este resultado é conclusivo do nível de intemperismo restrito que sofreram as formações litológicas, ressaltando o papel importante deste na riqueza química desses

solos. Desta forma, observou-se que os fatores de maior influência na formação dos solos foram o relevo, o clima e o material de origem, influenciados pelos mecanismos remoção-deposição. Tais resultados mostram um quadro de solos passíveis de exploração agrícola, sendo necessário levar em conta o grau de fragilidade da paisagem. A degradação física generalizada dos solos não é acompanhada de perdas significativas da fertilidade química, reforçando o potencial de recuperação dos solos.

Palavras-chave: Intemperismo. Solos eutróficos. Difractometria de raio-X.

SOIL UNDER LIMESTONE AND BASALT INFLUENCE IN WESTERN OF HAITI

ABSTRACT

Soils of the western region of Haiti developed in a geomorphological complex context that provides favorable conditions for removal and depositional mechanism. These soils, formed under influences of limestone and basalt materials, steep relief and spatially variable climate have not been studied well as to what pedogenetic processes have contributed to their formation. Thus, the main objective of this study is to assess physical, chemical and mineralogical characteristics of soils in the target region. For this, a pedological survey was carried out in the region, followed by a physical, chemical and mineralogical analysis of the collected samples. The points and profiles described were classified according to Brazilian Soil Classification System (SiBCS). Soils are diversified, consisting primarily of entisols (*Neossolo Litólico*), fluvents (*Neossolos Flúvicos*), Ustalfs (*Gleissolos*), inceptisols (*Cambissolos*), mollisols (*Chernossolos*); nevertheless, major part of the area is occupied by entisols. Large areas with rock outcrop were also observed, given the low forest cover and the steepy relief. Soils are shallow, displaying a medium to very clayey texture. Chemically, the soils are characterized by alkaline pH ($\text{pH } 7.8 \pm 0.74$), base saturation over 90% with a significant contribution of the calcium ion, reflecting the strong connection to parental material. The eutrophic character of these soils can also be explained by the presence of clay minerals 2:1 such as smectite, vermiculite, illite and mica prevailing in clay mineralogy. Although quartz is present in the sand and silt fractions, there was occurrence of multiple primary minerals such as feldspar, plagioclase and calcite, constituting the mineralogical and chemical reserve of these soils. The presence of kaolinite in soils located in lower elevations suggests that this mineral originated from pre-weathered material deposited, since the alkalinity of the associated environment and low rainfall slow desilicification process of primary and secondary minerals 2:1 needed for kaolinitisation. This result is conclusive about restricted weathering level that occurred in geological formations, highlighting the important role of these materials in chemical richness of the soils. Thus, the most influential factors in the formation of these soils were relief, climate and parent material, influenced by removal-deposition mechanisms. These results show a soil framework capable of farm, being necessary to take into account the degree of landscape fragility. The widespread physical degradation of soils is not accompanied by significant losses of chemical fertility, which enhances soil recovery potential.

Key-words: Weathering. Eutrophic Soils. X-ray diffractometry.

1 INTRODUÇÃO

O solo evolui concomitantemente com a paisagem numa interação dinâmica. De forma similar, as características físicas, químicas e mineralógicas do solo, herdadas principalmente do material de origem, sofrem diversas mudanças ao longo do tempo. Durante a pedogênese, ocorrem reações físicas, químicas e biológicas que determinam os diferentes horizontes com suas características peculiares (RESENDE et al., 2014). Entretanto, esses processos ocorrem de forma bastante complexa (BUOL et al., 1997; BIRKERLAND, 1999), pois a morfologia do perfil do solo nem sempre reflete apenas sua organização e seu desenvolvimento progressivo, mas também desordem, mistura, regressão e haploidização (PHILLIPS, 1992; SCHAETZL e ANDERSON, 2005; TAN, 2010). Por outro lado, o desenvolvimento regressivo diz respeito à ocorrência de acelerados processos de erosão e de sedimentação, devido ao desmatamento ou à intensificação do uso do solo sem o uso das devidas técnicas de conservação (SOMMER et al, 2008). De acordo com Goldberg et al., (2013), a pedogênese regressiva opera de forma a homogeneizar os perfis do solo e a truncar a horizontalização, retardando assim o seu desenvolvimento e favorecendo a erosão.

Estudos pormenorizados dos fatores, mecanismos e processos que determinam a formação do solo, revelam-se imprescindíveis para o entendimento da sua complexidade e, ao mesmo tempo, promover o seu manejo sustentável. Esses estudos são ainda mais relevantes quando se trata da região tropical, onde a tipologia climática acelera os mecanismos de perdas de solos, tornando, em muitos casos, inviáveis as atividades agrícolas sem as devidas práticas de conservação do solo, principalmente quando está associado a relevos acidentados, como é o caso do Haiti.

Neste país, existem domínios de solos jovens formados em locais declivosos sobre o calcário duro e solos bastante evoluídos localizados nas áreas mais úmidas (COLMET-DAAGE, 1969). Por estar localizado em região tropical e montanhosa, o Haiti sofre frequentes furações e inundações que, junto com o uso inadequado do solo, têm potencializado a erosão hídrica. Este cenário tem gerado grande preocupação, estimulando ações de preservação do solo, uma vez que este é um importante componente da biosfera, funcionando não apenas para a produção de alimentos e fibras, mas também para a manutenção da qualidade ambiental local, regional e global (GLANTZ, 1995).

O manejo adequado do solo tem papel de destaque nas ações que garantam a segurança alimentar e a conservação de ecossistemas. Isto se torna possível quando existem informações que

viabilizam os programas de desenvolvimento agrícola sem transgredir os limites da resiliência dos recursos naturais.

De acordo com Baxter e Crawford (2008), dados e mapas de solos confiáveis são indispensáveis para o manejo e a conservação deste recurso, como também auxilia no zoneamento ecológico e econômico e na implantação de políticas ambientais diversas. Ou seja, caracterizar o solo para entender a sua dinâmica evolutiva constitui um passo importante na otimização dos seus serviços ambientais e na mitigação dos impactos negativos aos ecossistemas oriundos da sua erosão.

O Haiti carece de estudos pedológicos. Nas últimas décadas, os poucos estudos pedológicos conduzidos possuem caráter exploratório com poucas informações esclarecedoras da pedogênese no país. Diante do exposto, objetivou-se com o presente estudo, caracterizar os solos da região oeste do Haiti, focalizando-se nos atributos físicos, químicos e mineralógicos, além de determinar os fatores e os mecanismos que envolveram-se na pedogênese desses solos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização da área de estudo

A área estudada está localizada no oeste do Haiti entre as coordenadas 18°15'30"N e 18°58'25" de latitude e 71°42'39"W e 73°4'22"W de longitudes, com extensão aproximativa de 4.300 km². Os solos da região, em maioria jovens e rasos, se formaram a partir de material geológico constituído essencialmente por calcário, seguido por sedimentos Quaternários e basalto. Ademais, esses solos foram influenciados pelo relevo inclinado e pela forte variação altimétrica com montanhas proeminentes. A vegetação é composta por misturas de espécies xerofíticas de porte baixo a médio em toda faixa norte da área, enquanto no sudeste a sudoeste ocorrem predominantemente espécies de porte maior.

2.2 Amostragem e levantamento de solos na área

O levantamento pedológico foi realizado a nível reconhecimento de alta intensidade por meio de uma amostragem aleatória estratificada que permite capturar a relação solo-paisagem. Os locais de abertura dos perfis descritos e amostrados foram previamente demarcados. Para isso, foi preciso incorporar no plano de informação de amostragem os atributos primários e secundários do terreno.

Para direcionar a amostragem para o mapeamento digital de solos e ao mesmo tempo facilitar o levantamento convencional dos solos, foi gerado um *buffer* de 100 m em torno da rede de estradas existentes. Os pontos localizados dentro do *buffer* foram extraídos, sendo amostrados aleatoriamente por meio do aplicativo Hipercubo latino ou LHCS (*Sandia National Laboratories - Matchworks, 2005*). Trata-se de método estatístico de amostragem randômica estratificada que possibilita a amostragem de variáveis a partir das suas distribuições multivariadas (MINASNY & McBRATNEY, 2006). Por essa técnica, foi selecionada a maioria dos 140 pontos analisados, sendo alguns destes levantados por caminhamento em locais de pouca acessibilidade (ver mapa no capítulo IV).

A identificação dos horizontes e a descrição morfológica foram realizadas conforme Santos et al. (2005), sendo os perfis classificados segundo critérios estabelecidos pelo Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SiBCS, 2009). Foram abertas mini-trincheiras, realizadas tradagens e utilizados cortes de estradas para ampliar a amostragem com pontos extras. Vários destes locais

não foram coletados, porém descritos e identificados. Foi utilizado no campo solução de HCl 10% com intuito de conferir a presença de carbonato nos solos.

2.3 Análises física e química de solos

As amostras foram analisadas em dois laboratórios: O Centro de Tecnologias Agrícolas (CENTA/IDIAF), pertencente ao Instituto Dominicano de Pesquisas Agropecuárias e Florestais (IDIAF). E o Departamento de Solos da UFV.

As análises químicas e físicas necessárias à classificação dos perfis foram realizadas conforme os métodos propostos pela *American Society of Agronomy* (1982) e EMBRAPA (1997). Fósforo (P) foi analisado por Mehlich-3; enquanto que o ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn) foram determinados pelo extrator Olsen modificado. Determinou-se o cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e sódio (Na) utilizando o acetato de amônio 1N a pH 7.0 e empregando adicionalmente KCl 1 N. As análises de matéria orgânica (MO) foram realizadas conforme Walkley & Black, e a condutividade elétrica (CE – 1:2 H₂O) foi medida na suspensão de decantação de argila e a textura pelo método de Bouyoucos.

Análise granulométrica foi efetuada pelo método pipeta modificado por Ruiz (2005). Com base nos valores dos atributos e/ou propriedades determinados, a soma de bases (S); a capacidade de troca de cátions (CTC) e a saturação por bases (V) foram calculadas.

2.4 Análise mineralógica

Na caracterização dos argilominerais que ocorrem na área, em amostras de TFSA, foi realizada a oxidação da matéria orgânica usando hipoclorito a 1%, seguido pela separação das frações areia, silte e argila. A separação da fração areia foi feita por peneiramento (0,053 mm), enquanto que foi realizada a separação da argila do silte com base na lei de Stoke.

Os minerais nas frações areia e silte foram determinados por difratometria de raios-X (DRX) em lâmina escavada. Após ter sido desferrificada pelo ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) e submetida a saturação com potássio (K) e Magnésio (Mg) usando o KCl e MgCl₂ (1 N), respectivamente, a fração argila foi analisada por DRX. As sub-amostras receberam três lavagens com os referidos sais, seguido pela remoção do excesso de sais utilizando água destilada. As sub-amostras saturadas com potássio (K) foram submetidas à tratamento térmico de 350 e 550 °C. Já as sub-amostras saturadas com Mg foram impregnadas com etinelo glicol (30%).

Os minerais foram identificados por difratometria de Raio-X usando o aparelho X'PERT PRO PANALYTICAL com radiação $\text{CoK}\alpha$, operado a 40kV e 30 mA. Desta forma, os argilominerais presentes nas amostras, foram identificados pela dimensão do espaçamento basal (d), determinado pela equação de Bragg:

$$n\lambda = 2d\sin\theta,$$

Onde,

n: número inteiro de ondas;

λ : comprimento de onda da radiação monocromática utilizada;

d: espaçamento interplanar (parametro que se deseja medir); e

θ : ângulo de incidência da radiação primária.

Os difratogramas foram interpretados de acordo com Chen (1977) e na informações disponibilizadas pelo site do Institute of Experimental Mineralogy (MINCRYST, 2015).

2.5 Análises químicas de amostras de rocha

Com o objetivo de avaliar a constituição química dos principais materiais de origem da região, foram coletadas amostras de rocha em diferentes pontos da área de estudo (rochas basálticas, calcárias e vulcano-sedimentares). Para isso, as amostras foram moídas e peneiradas em 300 mesh, tamanho aproximado do silte. Posteriormente foram prensadas a 4 t/cm² por 30 s em prensa hidráulica para formarem pastilha de 1,3 cm de diâmetro, as quais foram lidos em EDX (*Energy-dispersive X-ray spectroscopy*) para análise semi-quantitativa elementar. O EDX baseia-se no princípio fundamental de que cada elemento possui uma estrutura atômica única, fazendo com que os raios-X emitidos por cada elemento permitam a sua identificação.

2.6 Mapeamento convencional de solos

Para o mapeamento das classes de solos foram utilizados mapas geológico, geomorfológico e de altitude existentes. A frequência de amostragem foi de um perfil completo e um ponto de amostra extra por classe de solo componente de unidade de mapeamento simples ou de associação. Todas as classes de solos identificadas na área foram caracterizadas por um perfil representativo completo e georreferenciado.

As unidades de mapeamento foram demarcadas com base nas observações ao longo de percursos que cruzaram diferentes padrões de drenagem, relevo, vegetação, geologia e geomorfologia. A partir do modelo de distribuição dos solos na paisagem desenvolvido no campo, os limites entre unidades de mapeamento foi estabelecida, sendo estes constituídas por unidades simples ou por associações de até quatro componentes de Subgrupos de solos.

As descrições dos perfis foram realizadas de acordo com o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS *et al.*, 2005).

A vetorização das classes de solo foi realizada utilizando o software *ArcGIS 10.2*. Os critérios utilizados para o estabelecimento das classes de solo baseou-se nos princípios preconizados por EMBRAPA (2013).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do material de origem

As rochas basálticas analisadas possuem teores de sílica bem variáveis (~46,61% a 54,41%), bem como alumínio (15,08% a 22,60%) e ferro (8,06% a 29,98%) (Tabela 1). Os teores de cálcio e magnésio são normalmente elevados. O potássio e o manganês têm baixa porcentagem na composição das rochas, enquanto que o fósforo é mais presente nos materiais vulcânicos. É importante ressaltar que o sódio não é um elemento importante, sobretudo no basalto. Porém, além da rocha vulcano-sedimentar apresentar maior percentual de sílica (77,11), possui teor importante de sódio (9,41%) e pouco alumínio (1%). Quanto às amostras de rocha calcária, observou-se que o cálcio participa de mais de 84% da composição química, seguido do sódio (13,63%). A amostra de piroclástico-escória tem composição análoga à do basalto, sendo um pouco diferente pelo teor de sódio (13,64%), relativamente alto.

O resultado encontrado no estudo se aproxima dos valores encontrados por Mahoney et al., (2008) que analisaram amostras de basalto da ilha de Madagascar, usando a fluorescência de raios-X. Ao estudarem o basalto da formação *Dumisseau*, Sen et al., (1988) encontraram resultados parecidos, sobretudo para a sílica com variação entre 47,8-51,7%.

Resultados de uma amostra de calcário eoceno coletada na região do *Plateau de Rochelois* e analisada quimicamente, foram reportados por Goldich & Bergquist (1948) e revelaram uma composição de 55,9% de CaO, 0,05% de MgO, 0,02% de SiO₂, 0,01% de Al₂O₃, 0,08% de Fe₂O₃, 0,01% de P₂O₅. Esses valores diferem dos encontrados no presente estudo, em que foi verificado maior valor para o CaO (~84%) e nenhum valor para MgO, Al₂O₃ e P₂O₅.

Tabela 1. Composição química das amostras de rocha coletadas na área

Rocha	Coordenadas ¹		Composição química														
	X	Y	(%)														
			SiO ₂	Fe ₂ O	MgO	CaO	K ₂ O	MnO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	CuO	ZnO	TiO ₂	Cr ₂ O	Outros
R. vulcano-S.	720167,0	2035305,2	77,11	9,55	2,41	0,17	0,04	0,01	9,41	1,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,14	0,09
Basalto1	786781,0	2079053,6	46,61	8,06	5,97	11,07	0,21	0,10	0,00	22,60	2,12	0,00	0,00	0,01	1,58	0,00	1,66
Basalto2	731480,0	2037269,0	43,97	29,98	0,00	0,13	0,16	5,39	0,00	15,08	2,81	0,00	0,00	0,04	1,97	0,12	0,35
Basalto3	786690,4	2038617,2	54,41	10,27	4,94	7,51	0,22	0,11	0,00	20,02	0,00	0,00	0,03	0,01	2,32	0,04	0,11
Basalto4	721026,0	2033762,0	53,10	8,73	10,01	8,78	0,08	0,05	0,00	18,02	0,00	0,08	0,02	0,01	0,99	0,07	0,04
Basalto5	720167,0	2035305,2	50,29	17,97	5,41	1,20	0,37	0,06	0,00	21,63	0,29	0,00	0,03	0,03	2,58	0,04	0,09
Calcário	787130,6	2040933,9	1,23	0,44	0,00	84,29	0,31	0,04	13,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,02
P-escoria	786400,7	2078635,8	41,15	7,58	5,98	9,62	0,09	0,12	13,64	16,87	2,76	0,00	0,01	0,01	1,80	0,04	0,33
Min	-	-	1,23	0,44	0,0	0,13	0,04	0,01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,02
Max	-	-	77,11	29,98	10,01	84,29	0,37	5,39	13,64	22,6	2,81	0,08	0,03	0,04	2,58	0,14	1,66
Méd	-	-	45,98	11,57	4,34	15,35	0,19	0,74	4,59	14,40	1,00	0,02	0,01	0,02	1,41	0,06	0,34
DP	-	-	21,18	8,83	3,39	28,21	0,12	1,88	6,46	8,93	1,32	0,03	0,01	0,01	0,99	0,05	0,55
CV (%)	-	-	46,1	76,3	78,1	183,8	63,2	254,0	140,7	62,0	132,0	150,0	100,0	50,0	70,2	83,3	161,8

¹UTM-Zona 18N, WGS-84; R. Vulcano-S.= Rocha vulcano-sedimentar; P-escoria= Material piroclástico-escoria. - Min: mínimo; Max: máximo; Med: Média; Dp: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação.

3.2 Classes de solos e relação com o ambiente

Os solos da região foram enquadrados em sete (7) ordens, são elas: Neossolo Litólico, Neossolo Flúvico; Cambissolo, Chernossolo, Luvisso, Gleissolo, Vertissolo e Nitossolo, sendo o Neossolos Litólicos os mais comuns.

Os Neossolos e Cambissolos são as ordens mais expressivas e ocorrem, preferencialmente, em área de calcário duro e nas áreas de maior declive, onde os mecanismos de remoção de materiais favorecem a morfogênese e a perda de solos em detrimento dos processos pedogenéticos. São os domínios dos Neossolos Litólicos e dos Cambissolos, que ocorrem associados com outras ordens menos expressivas, como os Chernossolos, que ocupam áreas sobre o material calcário em relevo plano a suave ondulado, geralmente localizadas nos fundos dos vales.

Já os Neossolos Flúvicos e os Gleissolos são encontrados, particularmente, em material aluvionar e detrítico e nas baixadas litorâneas em geoformas agradacionais. Convém ressaltar que os Gleissolos são igualmente relacionados aos locais com solos alagados e ambientes de mangues.

Observaram-se ainda alguns locais com Nitossolos que ocorrem principalmente na região de Kenscoff, região mais úmida e de altitude elevada, em áreas com influência de diques de material máfico. Sabe-se que esses solos mais intemperizados ocorrem, particularmente, em todas as montanhas úmidas do país com pluviometria anual acima de 1.600 mm. Tal fato também foi verificado por Colmet-Daage et al. (1969).

Por outro lado, os Luvisso encontram-se na parte sudoeste da área abaixo de 400 m de altitude, em regiões com influência de material vulcânico. A presença de inclusões de Vertissolos desenvolvidos em sedimentos de origem vulcano-sedimentar e em relevo plano também foi verificada.

Observou-se ainda a ocorrência de extensas áreas com afloramento rochoso ocupando os relevos mais declivosos.

As associações realizadas em nível categórico de ordem originaram 13 unidades de mapeamento, destes, a mais comum foi a unidade RL3 que ocupou 1.050,8 km² (24,4%). A associação de menor extensão diz respeito à unidade MX3 que ocupa 0,4% (Tabela 2). A seguir é apresentado o mapa de solos (Figura 1).

Tabela 2. Unidades de mapeamento no Haiti ocidental

Simbologia	Unidades de mapeamento	Área (km ²)	Área (%)
CX1	Associação de Cambissolo + Neossolo Litólico + Chernossolo com inclusões de Gleissolo	148,0	3,4
CX2	Associação Cambissolo + Neossolo Litólico+ Chernossolo	113,1	2,6
GX1	Complexo de Gleissolo+ Neossolo Flúvico com inclusões de Neossolo Litólico + Vertissolo	159,1	3,7
GX2	Complexo de Gleissolo + Neossolo Flúvico	426,1	9,9
MX1	Chernossolo + Cambissolo + Luvissole	60,8	1,4
MX2	Chernossolo + Cambissolo	253,2	5,9
MX3	Chernossolo + Neossolo Litólico + Vertissolo	17,3	0,4
NV1	Associações Nitossolo + Cambissolo+ Neossolo Litólico + AR	313,8	7,3
RL1	Neossolo Litólico + Luvissole + Chernossolo + AR	753,5	17,5
RL2	Neossolo Litólico + Luvissole + Cambissolo	162,0	3,8
RL3	Neossolo Litólico + Chernossolo+ AR + Cambissolo	1050,8	24,4
RL4	Neossolo Litólico + Cambissolo + AR	230,3	5,4
RL5	Neossolo Litólico + Chernossolo + AR	322,2	7,5
Área urbana	-	158,2	3,7
Lago	-	131,2	3,1

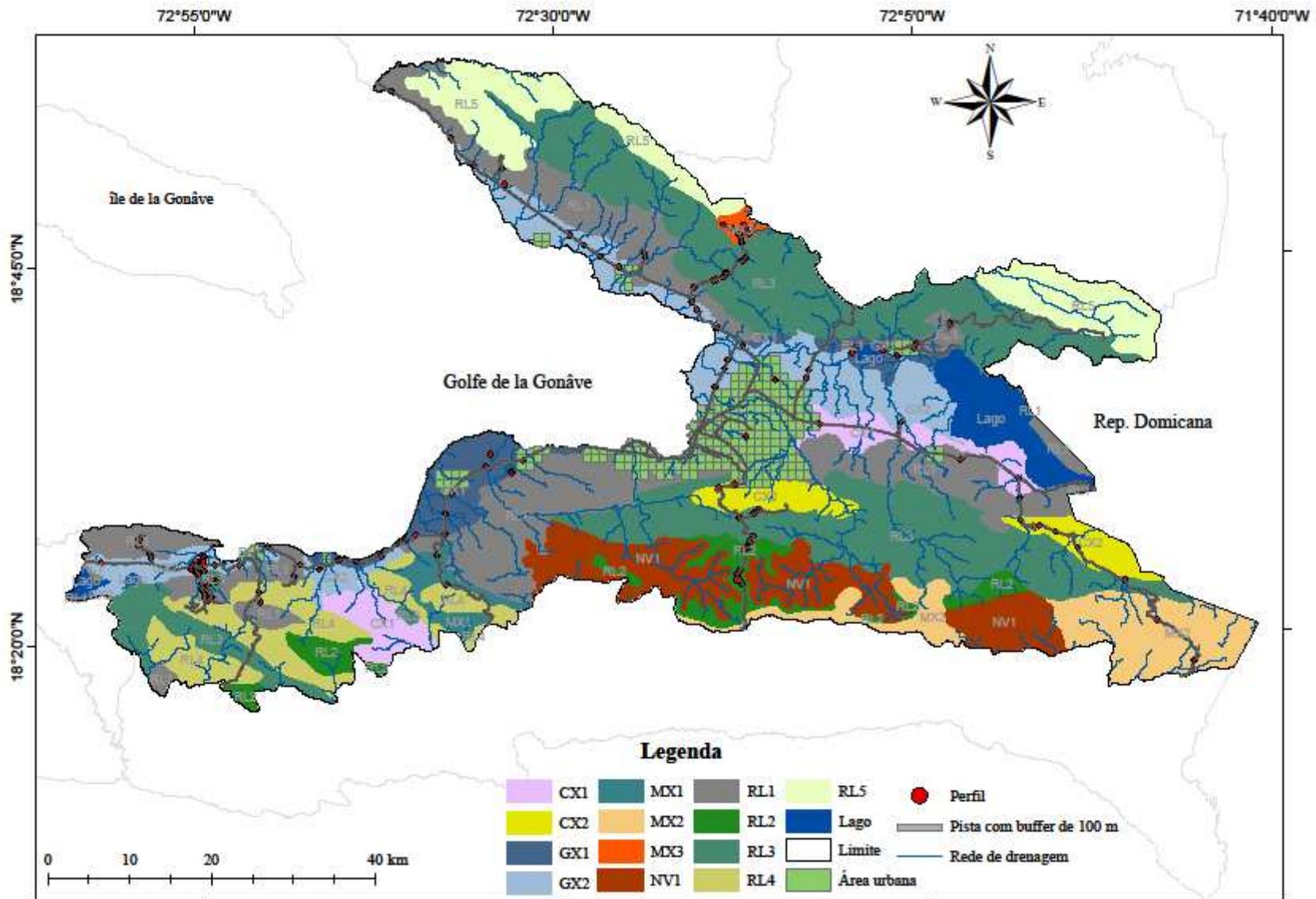


Figura 1. Mapa de solos convencional no Haiti ocidental.

3.3 Características morfológicas e físicas dos solos

As principais características morfológicas e físicas dos solos da região são representadas pelos perfis tipos e apresentadas na Tabela 3.

O Neossolo Litólico e o Neossolo Flúvico apresentaram cores Bruno-amarelado e Cinzento-brunado-claro, respectivamente. O Cambissolo apresenta cores variando de Cinzento-brunado-claro, Bruno e Bruno-escuro. As cores mais escuras ou Bruno-escuro são representadas pelas seguintes classes: Gleissolo, Chernossolo, Vertissolo e Luvisolo. Segundo Breeman e Buurman (2002), a coloração escura pode refletir a presença do carbono orgânico, podendo ser ao mesmo tempo explicada pela associação altamente estável entre a esmectita e parte do carbono orgânico. Esse mesmo fato também foi observado por Sobrinho (1987) nos Chernossolos e Vertissolos oriundos do calcário Jandaíra na Chapada do Apodi, região oeste do estado do Rio Grande do Norte, sendo nesse caso, explicado pela forte associação do cálcio com a matéria orgânica.

Para a classe Nitossolo, as cores variam de Bruno-avermelhado a Vermelho-escuro. As cores avermelhadas dos solos encontrados nas montanhas mais úmidas da área são consequência de impurezas ferruginosas do calcário, ou ainda da presença de materiais vulcânicos no meio do calcário.

Foram identificados solos com variação textural de média a muito-argilosa (Figura 2). Observou-se teores de areia variando de 1 a 60 dag/kg, correspondendo ao horizonte B do Nitossolo (P10) e o horizonte A do Luvisolo (P8), respectivamente. Quanto à fração silte, foi verificada variação de 13 dag/kg para o horizonte B3 do Nitossolo (P10) e 60 dag/kg para o Gleissolo (P5). No que se refere à fração argila, o valor mínimo diz respeito ao horizonte A do Luvisolo com 17 dag/kg e o máximo corresponde ao Horizonte B3 de Nitossolo (P10) com 82 dag/kg.

Por outro lado, a relação silte/argila, que evidencia grau de intemperização dos solos conforme critério estabelecido no SiBCS (2013)³, mostrou-se coerente com os tipos de solos estudados. Os valores variam de 0,16 a 2,11, correspondendo ao horizonte B3 do Nitossolo (P9) e ao horizonte C1 do Neossolo Flúvico (P2), respectivamente. Contudo, a relação silte/argila para a maioria dos perfis analisados apresentou valor acima de 0,6 para textura média e 0,7 para textura

³ Valores inferiores a 0,7 nos solos de textura média ou inferiores a 0,6 nos de textura argilosa ou muito argilosa são indicativos de intemperismo mais acentuado.

argilosa a muito argilosa. Todavia, para os dois Nitossolos de textura muito argilosa, foram verificados valores menores que 0,6, o que indica o avançado grau de intemperismo deste solo.

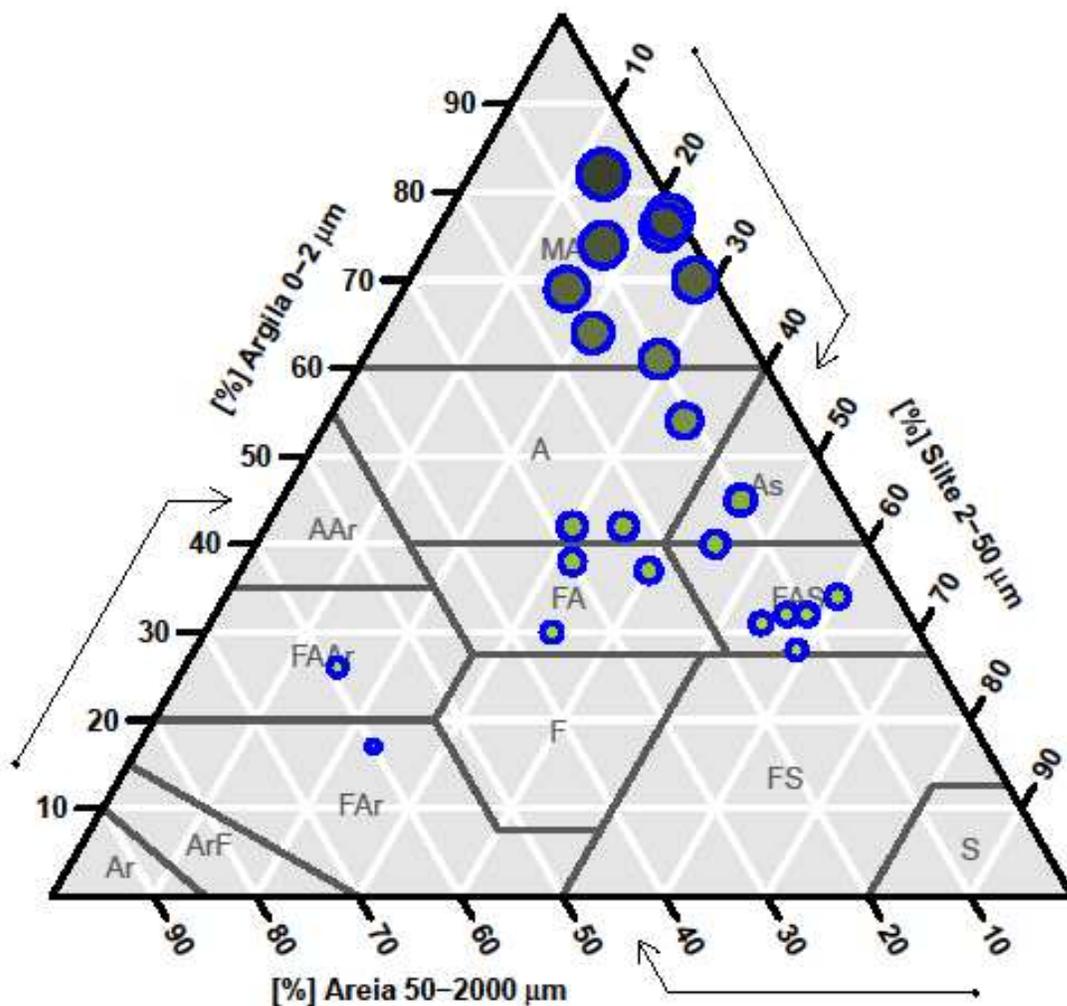


Figura 2. Representação da granulométrica dos perfis tipos.

Ar: areia; ArF: areia franca; FAr: franco-arenosa; F: franca; FS: franco siltosa; S: silte; FAAr: franco argilo arenosa; FA: franco-argilosa; FAS: franco argilo siltosa; As: argilo siltosa; A: argila; MA: muito argilosa. – Ilustração: Quanto maior o tamanho dos círculos, maior valor de argila.

Nesses solos, prevalecem estruturas granulares, blocos angulares e subangulares com grau de desenvolvimento forte, exceto o Gleissolo que apresenta estrutura maciça. A formação destas estruturas está ligada provavelmente à presença de argila de alta atividade, interagindo com a matéria orgânica, conforme explicitado por Velde e Barré (2010). Entretanto, por serem em maioria rasos e situados em locais declivosos, esses solos podem ser considerados potencialmente erodíveis.

Embora esses solos sejam originados de calcário, basalto e sedimentos vulcano-sedimentares, sendo materiais facilmente intemperizáveis, a maioria não evidenciou processos pedogenéticos avançados. Esta constatação resulta do predomínio do relevo íngreme na região, afetando diretamente o mecanismo remoção-deposição.

Tabela 3. Atributos morfológicos e físicos dos perfis típicos

Hor.	Prof. (cm)	Cor	Estrutura	Transição	Granulometria			
					Areia	Silte	Argila	Silte/Argila
-----dag/kg-----								
P1- NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico Fragmentário (RLe)								
Ap	0-25	10YR 5/4	mo, md, gr/bs;	Plana e clara	26	28	46	0,61
R	25-60+	-	-	-	-	-	-	
P2- NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico carbonático (RYve)								
Apk	0-10	2,5Y 6/2	fr pq gr	Plana e clara	15	54	31	1,74
C1	10-22	2,5Y 6/2	fr, pq, bs	Plana e clara	13	59	28	2,11
C2	22-34	2,5Y 6/4	fr, pq, bs	Plana e clara	12	56	32	1,75
C3	34-45+	2,5Y 6/4	fr, pq, bs	-	10	58	32	1,81
P3- CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico léptico (CXve)								
Ap	0-18	2,5Y 6/2	mo pq gr/bs	Ondulada e Clara	23	40	37	1,08
Bi	18-40	2,5Y 6/2	mo md gr/ba	Ondulada e clara	28	30	42	0,71
C	40-80+	2,5Y 6/3	-	-	-	-	-	
P4- CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico (CXve)								
A	0-20	7,5YR 4/3	mo pq ba	Ondulada e clara	36	34	30	1,13
Bi	20-50+	7,5YR 2,5/2	mo pq ba	-	30	32	38	0,84
P5- GLEISSOLO HÁPLICO sódico (GXn)								
Ap	0-38	10YR 4/1	mc	Ondulada, clara	6	60	34	1,76
Cg	38-60+	2,5Y5/2	mc	-	15	45	40	1,12

Tabela 3. Atributos morfológicos e físicos de perfis típicos (continuação)

Hor.	Prof. (cm)	Cor	Estrutura	Transição	Granulometria			Silte/Argila
					Areia	Silte	Argila	
					-----dag/kg-----			
P6- GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico (GXve)								
Ap	0-30	10YR 3/3	fo, pq, gr	Plana e clara	10	45	45	1,00
Cg	30-55+	10YR 3/1	mc	-	-	-	-	
P7- CHERNOSSOLO RENDZICO Lítico típico (MDI)								
Ap	0-15	7,5YR 3/1	fo pq gr	Plana, clara	11	35	54	0,65
Bi	15-23	7,5YR 3/1	fo md bs	-	10	29	61	0,48
P8- LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico (TCo)								
Ap	0-20	10YR 4/4	mo pq gr/bs	Gradual, ondulada	60	23	17	1,35
Bt	20-45+	10YR 4/2	fo md ba	-	15	16	69	0,23
P9- NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (NVe)								
Ap	0-22	2,5YR 4/4	fo gd ba	Difusa	15	21	64	0,32
B2	22-50	2,5YR 4/4	fo gd ba	Difusa	9	17	74	0,23
B3	50-110+	2,5YR 3/6	fo gd ba	-	5	13	82	0,16
P10- NITOSSOLO VERMELHO Epieutrófico típico (NVe)								
B1	0-40	2,5YR 3/6	mo, md, ba	Difusa	2	28	70	0,40
B2	40-90	2,5YR 2,5/4	fo, md, ba	Difusa	1	22	77	0,29
B3	90-135+	2,5YR 4/6	fo, md, ba	-	2	22	76	0,29
P11- VERTISSOLO HÁPLICO Órtico gleissólico (VXo)								
Ap	0-40	7,5YR 3/1	fo gd ba	Irregular e gradual	23	35	42	0,83
Cvg	40-65+	7,5YR 6/3	fo gd ba	-	59	15	26	0,58

fr: fraça; mc: maciço; mo: moderada; fo: forte; mp: muito pequena; pq: pequena; gd: grande; md: média; gr: granular; ba: blocos angulares; bsa: blocos subangulares.

3.4 Características químicas dos solos

O resultado da análise química (Tabela 4) indica que na maior parte dos solos estudados, o pH varia de moderadamente alcalino a fortemente alcalino, com valores entre 7,4 a 8,6. Apenas o perfil do Nitossolo apresentou pH moderadamente ácido (6,0) a ácido (4,6).

Os teores de matéria orgânica variam de 0,4 dag/kg no horizonte C do Vertissolo (P11) a 7,29 dag/kg no horizonte A de um Cambissolo (P3).

É importante sinalizar os altos valores da saturação por bases (V%) oscilando entre 73,1 a 100% nos horizontes superficiais; e nos quais o cálcio assume elevados teores altos com variação entre 3,2 cmol_c/dm³ a 64,4 cmol_c/dm³. Nos horizontes subsuperficiais, foram verificados valores baixos de 25,6 e 35,6% apenas para o perfil (P10) do Nitossolo, sendo esse o solo mais intemperizado encontrado no presente estudo. Da mesma forma, houve alta variação da capacidade de troca de cátions (CTC) com valores entre 5,3 cmol_c/dm³ e 72,5 cmol_c/dm³. No entanto, na maioria dos casos, os valores são bem superiores a 27 cmol_c/dm³, critério para definir argila de atividade alta (SiBCS, 2013). Os menores valores da CTC correspondem aos dois perfis de Nitossolos que evidenciam avançada evolução pedogenética. Ao considerar o conjunto de solos, os valores da CTC caracterizam o predomínio de argilominerais de alta atividade.

Essas características dos solos da região podem ser explicadas pela riqueza química do material de origem dominada pelo calcário e basalto; também pela baixa expressão dos processos pedogenéticos. Por outro lado, a escassez de alumínio trocável nos solos corrobora a pedogênese reduzida (limitada), mantendo o pH geralmente acima da neutralidade e altos teores de bases.

Estes resultados são condizentes com os encontrados por Guthrie e Shannon (2004) e Chaves et al. (2010), os quais estudaram regiões circunvizinhas com condição pedogeomorfológica similares.

Embora os solos alcalinos favoreçam a disponibilidade dos macronutrientes e reduzam o teor de alumínio trocável, porém estes afetam a disponibilidade da maioria dos micronutrientes (MILLER e DONAHUE, 1990), e também do fósforo, dada à formação de fosfato de cálcio pouco solúvel e não aproveitável pelas plantas (RYAN et al., 1985).

Tabela 4. Características químicas dos solos

Hor.	Prof. (cm)	pH	Ca ²⁺ ----cmol _c /dm ³ ----	Mg ²⁺	K ⁺ -----mg/dm ³ -----	Na ⁺	SB -----cmol _c /dm ³ -----	H+Al	CTC	V (%)	P mg/dm ³	MO dag/kg
P1- NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico Fragmentário (RLe)												
Ap	0-50	7,9	18,64	0,98	173,00	21,40	20,16	0,2	20,36	99,02	4,2	6,02
R	50-80+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2- NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico carbonático (RYve)												
Apk	0-10	8,0	20,29	1,75	169,00	26,40	22,59	0,3	22,89	98,68	10,90	2,91
C1	10-22	7,7	24,95	2,06	64,00	29,40	27,30	0,2	27,50	99,28	10,50	2,53
C2	22-34	8,0	22,15	2,07	53,00	32,40	24,50	0,3	24,80	98,78	10,70	2,22
C3	34-45+	7,6	24,45	1,97	19,00	39,30	26,64	1,2	27,84	95,69	15,40	1,27
P3- CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico léptico (CXve)												
Ap	0-18	7,7	18,56	0,88	36,00	10,50	19,58	0,2	19,78	98,99	7,20	7,29
Bi	18-40	8,0	16,22	1,05	6,00	11,50	17,34	0,2	17,54	98,86	6,60	4,44
C	40-80+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4- CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico (CXve)												
Ap	0-20	6,3	37,71	12,84	163	17,5	51,04	3,0	54,04	94,4	11,6	2,53
Bi	20-50+	7,4	38,13	13,04	99	23,4	51,53	4,1	55,63	92,6	8,5	4,44
P5- GLEISSOLO HÁPLICO Sódico (GXn)												
Ap	0-38	8,3	32,74	9,87	21,00	435,40	44,56	0,3	44,86	99,30	12,7	4,75
Cg	38-60+	8,6	16,22	11,01	3,00	1318,20	32,97	0,2	33,17	99,40	1,5	0,95
P6- GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típicos (GXve)												
Ap	0-30	7,9	48,0	1,57	12,0	145,7	50,23	0,2	50,43	99,6	2,0	4,12
Cg	30-55+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 4. Características químicas dos solos (continuação)

Hor.	Prof.	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB	H+Al	CTC	V	P	MO
-	(cm)	-	----cmol _c /dm ³ ----	----mg/dm ³ ----	----mg/dm ³ ----	-----cmol _c /dm ³ -----				(%)	mg/dm ³	dag/kg
P7- CHERNOSSOLO RENDZICO Lítico típico (MDI)												
0-15	Ap	8,0	34,05	9,08	60,00	47,30	43,54	0,2	43,74	99,5	33,2	5,7
15-23	B	7,8	37,79	10,62	14,00	49,30	48,77	0,2	51,87	94,0	59,10	5,07
P8- LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico (Tco) -												
0-20	Ap	7,9	47	5,5	11,7	9,2	53,2	0,0	53,2	100	2,8	1,0
20-45+	Bt	7,9	63,9	7,7	15,6	11,5	72,5	0,0	72,5	100	1,9	2,0
P9- NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (NVe)												
0-22	Ap	6,0	12,9	0,4	15,6	6,9	13,3	1,0	14,3	93,0	5,8	4,2
22-50	B2	5,6	5,2	0,2	11,7	36,8	5,4	0,0	5,4	100	1,6	1,8
50-110+	B3	4,6	3,2	0,2	11,7	6,9	4,0	1,3	5,3	75,5	3,6	1,1
P10- NITOSSOLO VERMELHO Epieutrófico típico (NVe)												
0-40	B1	6,9	11,8	0,28	166	2,6	12,6	4,6	17,1	73,1	8,8	4,8
40-90	B2	5,2	2,0	0,1	93	0,6	2,3	6,8	9,1	25,6	7,9	5,2
90-135+	B3	5,3	2,84	0,1	96	0,0	3,2	5,8	9,0	35,6	4,1	1,8
P11- VERTISSOLO HÁPLICO Órtico gleissólico (VXo)												
0-40	Ap	7,4	39,1	25,3	15,6	9,2	64,4	0,0	64,4	100	13,3	3,3
40-65+	Cvg	7,7	30	26,2	11,7	9,2	56,2	0,0	56,2	100	23,0	0,4

3.5 Composição mineralógica

Conforme descrito no item 2.4, os resultados da difratometria de raios-X são apresentados e discutidos para as frações areia, silte e argila, sendo estes resumidos na Tabela 5.

3.5.1 Mineralogia da fração areia

Dentre os minerais que compõem a fração areia dos solos analisados, destacam-se quartzo, calcita, plagioclásio e feldspatos potássicos, conforme mostrado nos difratogramas apresentados nas Figuras 3 a 10.

O difratograma do perfil P1, Neossolo Litólico, evidencia a presença de biotita (1,033; 0,336; 0,266 nm), calcita (0,304; 0,385; 0,249; 0,228 nm); quartzo (0,426; 0,334; 0,246 nm) e pirita (0,270; 0,242; 0,221 nm). Este perfil com caráter fragmentário, situado em pé de encosta a 15 m de altitude, recebe materiais provenientes de formação cárstica do mio-plioceno da montanha *des Matheux*. A presença de pirita em calcário já foi comprovada por vários estudos (MENON, 1967; SUK et al., 1990; SIMÓN et al., 2005; MARENCO et al., 2008).

O perfil P2, Neossolo Flúvico desenvolvido em relevo plano sobre sedimentos Quaternários com forte influência calcária e vulcânica, é composto por Quartzo (0,426; 0,334; 0,245; 0,223 nm), calcita (0,386; 0,303; 0,249; 0,228; 0,212 nm) e plagioclásio (0,379; 0,319; 0,295; 0,284 nm).

Os minerais encontrados na fração areia dos perfis P3 e P4, ambos Cambissolos, são bem distintos, pois o primeiro se desenvolveu em materiais detríticos em condição de semiaridez e o segundo em complexo vulcano-sedimentar do cretáceo sob condição úmida de altitude. O Quartzo (0,426; 0,334 nm) e a calcita (0,385; 0,303; 0,249; 0,228 nm) constituem os principais minerais do primeiro perfil. Neste ainda foram identificados a dolomita (0,289 nm) e os feldspatos potássicos (0,324 nm), nos horizontes Ap e Bi respectivamente. Outros minerais tais como plagioclásio (0,284 nm) e brucita (0,237 nm) mostram reflexos discretos.

No que tange ao perfil P4, foi verificada a presença de illita-montmorilonita (1,245; 0,310 nm); haloisita (0,749; 0,443; 0,256 nm); illita/mica (0,498; 0,448; 0,334; 0,257 nm), quartzo (0,426; 0,334; 0,228 nm); e plagioclásio (0,403; 0,320; 0,256 nm).

A fração areia dos perfis P5 e P6, Gleissolos, apresentou mineralogia diversificada e distinta. O primeiro está composto por feldspato potássico (0,428; 0,378; 0,333; 0,324 nm); calcita (0,304; 0,249; 0,228 nm); plagioclásio (0,407; 0,387; 0,364; 0,323; 0,318; 0,295; 0,285 nm); e

dolomita (0,288; 0,271; 0,239 nm). Neste perfil a presença de minerais 2:1 mesmo com reflexo discreto foi também verificada.

Já no perfil P6 ocorreram quartzo (0,426; 0,334 nm), calcita (0,386; 0,303; 0,285; 0,228 nm), caulinita (0,715; 0,249; 0,238; 0,234 nm) e a pirita (0,270 nm) em pequena quantidade.

O perfil P7 (Chernossolo) possui uma grande diversidade mineralógica na sua fração areia, pois se encontra localizado em área sob domínio de calcários e de materiais de origem vulcânica. Neste foi detectada a presença de quartzo (0,426; 0,334; 0,246 nm), calcita (0,385; 0,304; 0,249 nm), feldspato potássico (0,447; 0,324 nm), carbonato-apatita/ carbonato-fluorapatita (0,279; 0,269; 0,225 nm) e pequeno reflexo de ilita/mica (0,500; 0,447 nm). Ainda no horizonte B, o expressivo reflexo de 0,300 nm sugere a ocorrência de calcita magnesiana (Mg-Ct) e do diopsídio (0,300; 0,289 nm).

A mineralogia da fração areia do perfil P10, (Nitossolo), é composta de gibbsita (0,485; 0,437; 0,432; 0,239 nm), quartzo (0,426; 0,334; 0,246; 0,228 nm); plagioclásio (0,404; 0,320 nm); hematita (0,269; 0,252; 0,221 nm). A presença da gibbsita na fração areia não é surpreendente, pois segundo Truffi e Clemente (2002), processo de hidrólise total (alitização) pode promover a evolução dos cristais de plagioclásio diretamente em gibbsita. Esses minerais encontrados são condizentes com as características químicas do solo que confirmam a ocorrência de avançado grau de intemperismo neste tipo de solo.

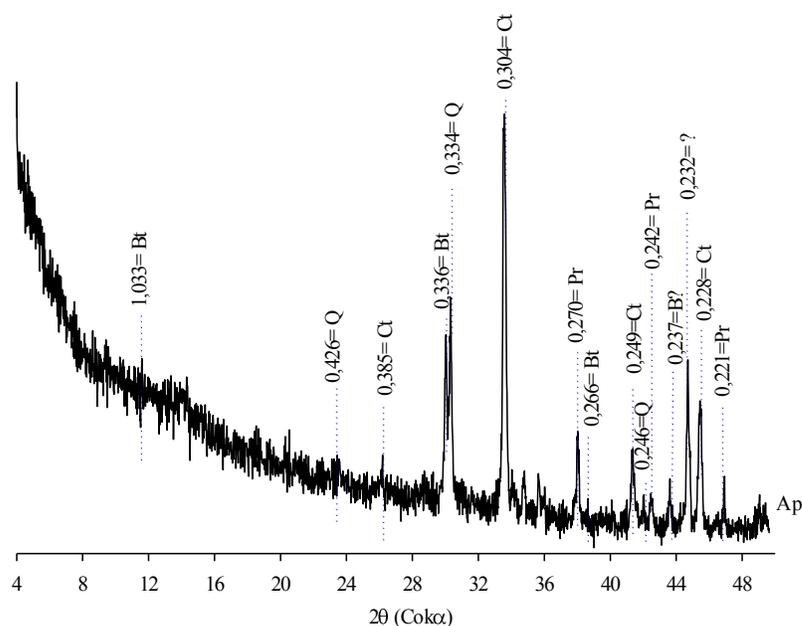


Figura 3. Difratoograma de raios-X da fração areia do perfil P1 (RLe). — Símbolos: Bt= biotita; Pr= pirita; Q= quartzo; Ct= calcita; B= brucita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

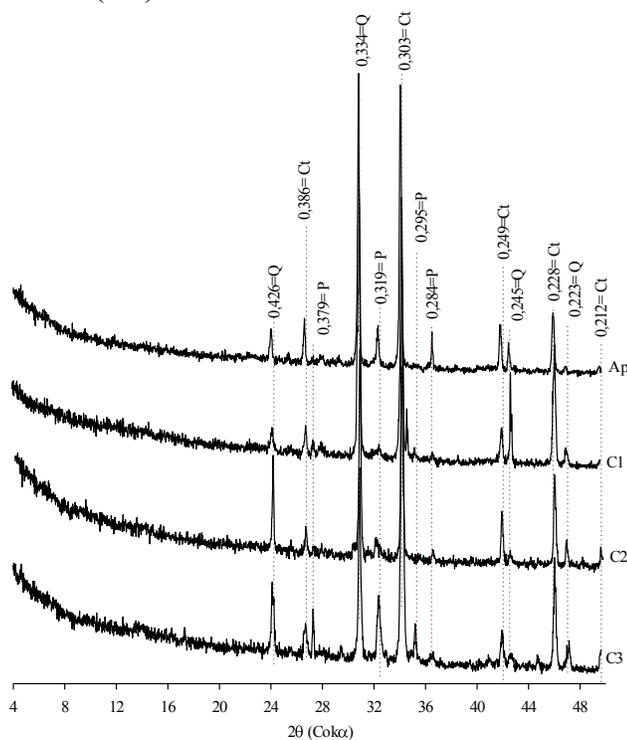


Figura 4. Difratoograma de raios-X da fração areia do perfil P2 (RYve). — Símbolos: Q= quartzo; P= plagioclásio; Ct= calcita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

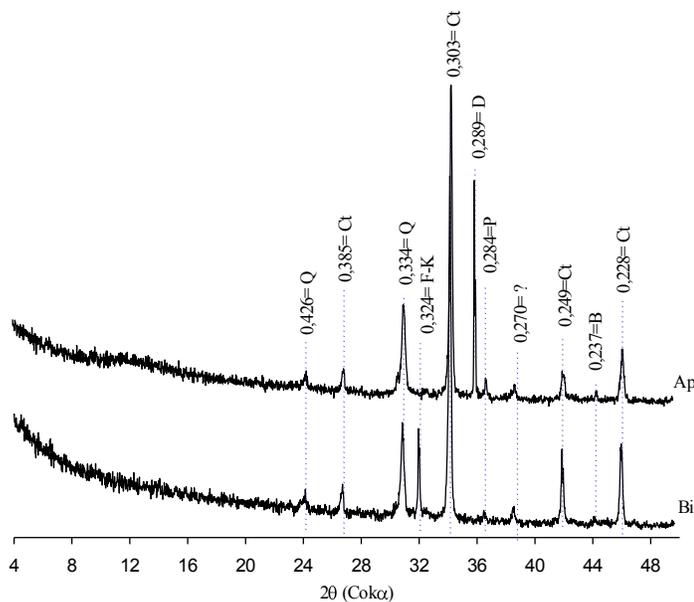


Figura 5. Difratoograma de raios-X da fração areia P3 (CXve). — Símbolos: Q= quartzo; P= plagioclásio; Ct= calcita; F-K= feldspato potássico; D= dolomita; B= brucita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

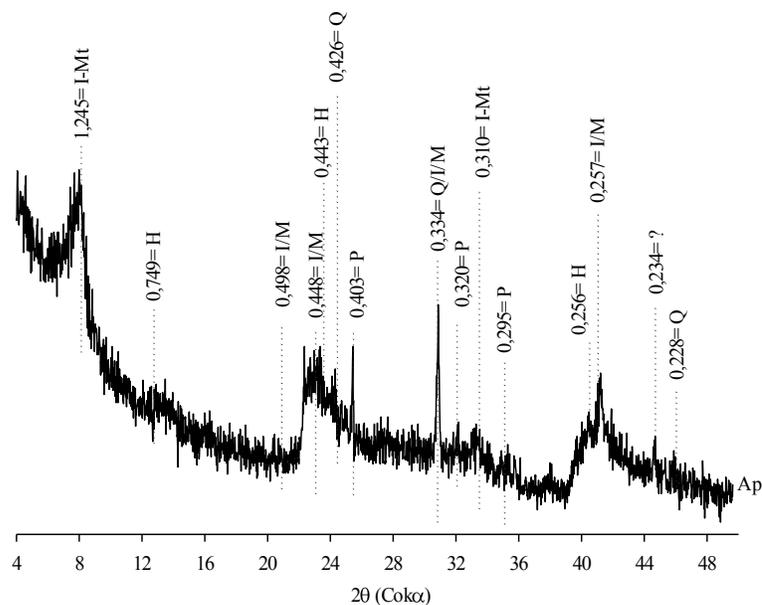


Figura 6. Difratoograma de raios-X da fração areia P4 (CXve) — Símbolos: Q= quartzo; I-Mt= ilita-montmorilonita; I/M= ilita/mica; P= plagioclásio; H= haloisita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

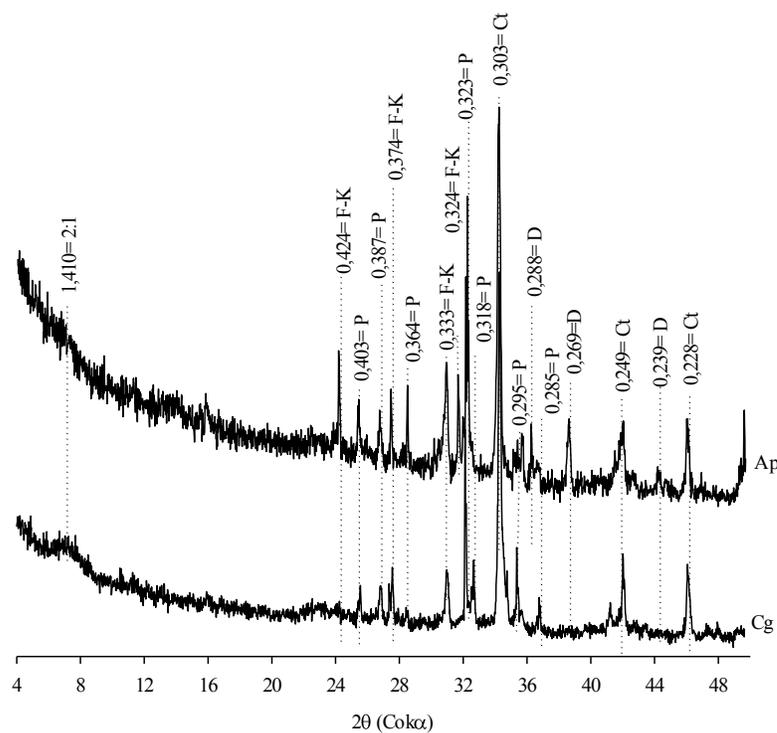


Figura 7. Difratoograma de raios-X da fração areia P5 (GX) — Símbolos: P= plagioclásio; Ct= calcita; D= dolomita; F-K= feldspato potássico. Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

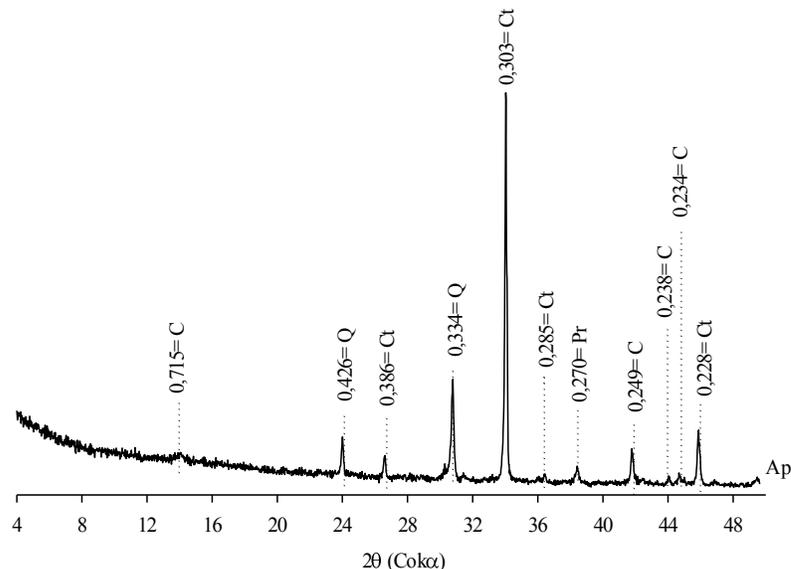


Figura 8. Difratoograma de raios-X da fração areia P6 (GX). — Símbolos: C= caulinita; Q= quartzo; Ct= calcita; Pr= pirita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

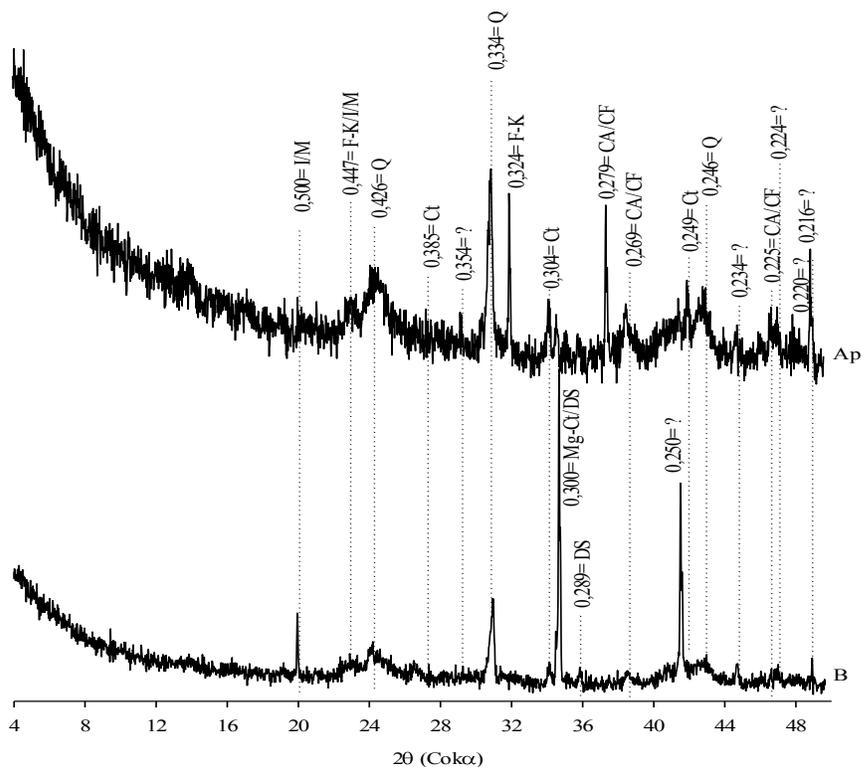


Figura 9. Difratoograma de raios-X da fração areia P7 (MDI). — Símbolos: Q= quartzo; Ct= calcita; I/M= ilita/mica; F-K/I/M= feldspato potássico/ilita/mica; Mg-Ct= Mg-calcita; CA/CF= carbonato-apatita/carbonato-fluorapatita; DS= diopsídio. — Números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

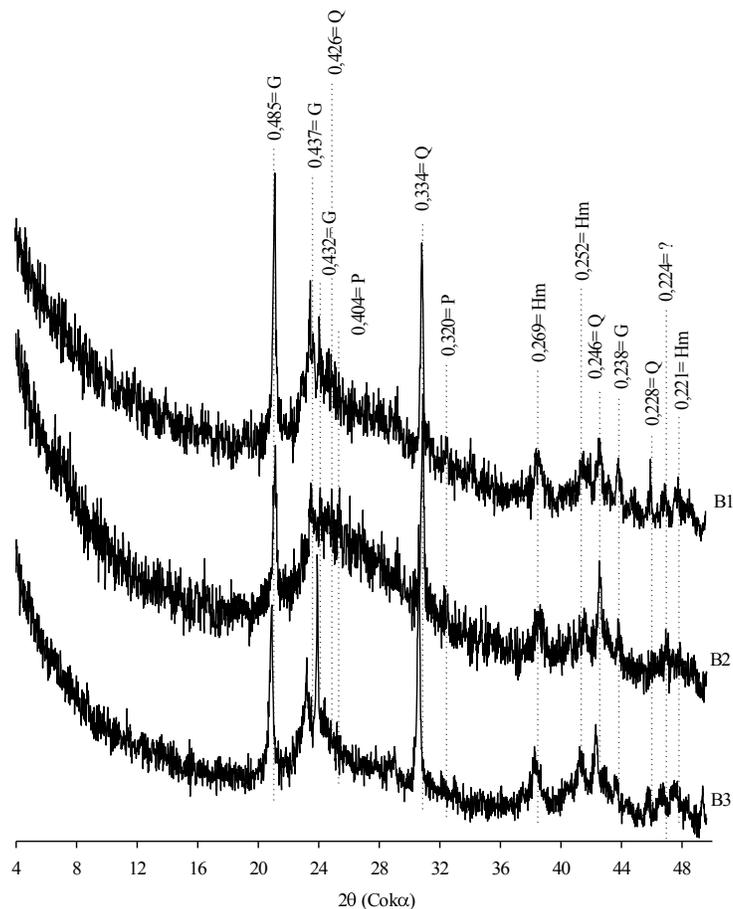


Figura 10. Difratoograma de raios-X da fração areia P10 (NV) — Símbolos: G= gibsitá; Q= quartzo; P= plagioclásio; Hm= hematita. — Números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

3.5.2 Mineralogia da fração silte

A difratometria de raios-X da fração silte revela o quartzo, a calcita, o plagioclásio, a ilita e a caulinita como sendo os minerais de maior ocorrência, conforme apresentado nas Figuras 11 a 18. Esses minerais refletem a litologia da área, dominada pelo calcário, basalto e sedimentos originados desses materiais.

No perfil P1 (RY), foi verificada a presença da ilita (1,034; 0,334, 0,285 nm); calcita (0,385; 0,303; 0,249; 0,228 nm); quartzo (0,426; 0,334 nm) e traço de plagioclásio (0,318 nm), revelado por picos de baixa intensidade.

Além da calcita (0,385; 0,303; 0,249; 0,228 nm); do quartzo (0,426; 0,334; 0,246 nm) e de plagioclásio (0,404; 0,375; 0,365; 0,318 nm), o perfil P2 possui mineralogia formada por esmectita (1,443 nm), clorita/vermiculita (1,443; 0,716; 0,283 nm).

Os perfis P3 (CX) e P4 (CX) possuem em comum a calcita o quartzo e a clorita e/ou vermiculita como principais minerais constituintes da sua fração silte. Já no perfil P4 foram observados plagioclásio (0,403; 0,374; 0,320; 0,295; 0,252 nm), e haloisita (0,742; 0,444; 0,362; 0,256 nm). Esse difratograma sugere a presença de minerais pouco cristalizados.

Os difratogramas da fração silte dos perfis P5 (GX) e P6 (GX) revelam a presença de calcita, quartzo, como principais minerais. Somados a estes, encontram-se no P5 outros minerais como plagioclásio, clorita e/ou vermiculita e esmectita.

A difratometria de raios-X da fração silte do perfil P7 (MDI) revela a ocorrência do quartzo (0,426; 0,334; 0,246; 0,223 nm), da calcita (0,385; 0,304; 0,249; 0,228 nm), de plagioclásios (0,404; 0,320; 0,295 nm), traços do feldspato potássico (0,289 nm) e da hematita (0,269 nm).

Na fração silte do perfil P10 (NV), os difratogramas sugeriram apenas a presença do quartzo (0,426; 0,334; 0,245; 0,228; 0,233; 0,212 nm) nos três horizontes. Este resultado parece surpreendente, porém Paiva (2010) em estudo de solos carbonático-fosfáticos na Bahia, verificou apenas o quartzo na fração silte de um Cambissolo. Resultados parecidos foram encontrados por Bardales (2009) em Argissolos Vermelho e Vermelho-Amarelo do Acre. O resultado sugere a ocorrência de processo de hidrólise intenso neste solo.

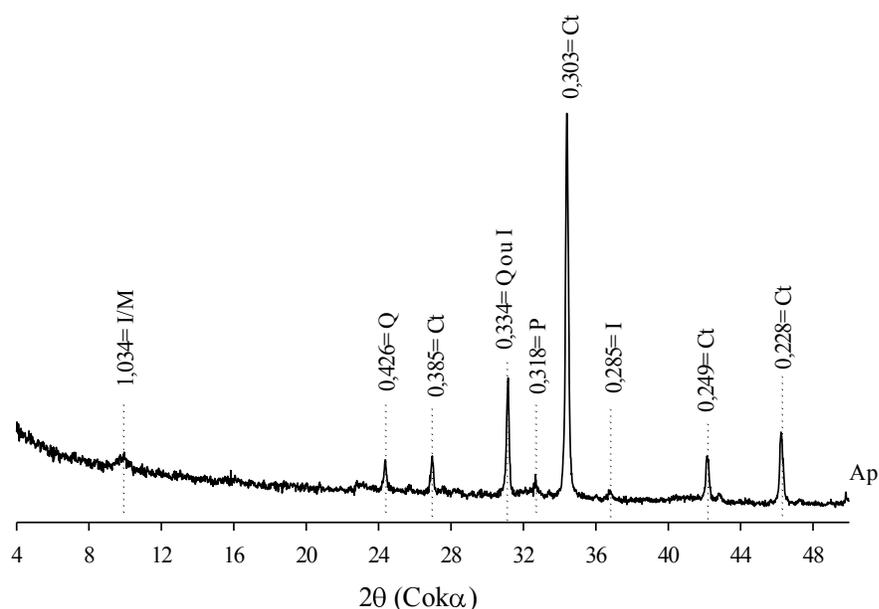


Figura 11. Difratoograma de raios-X da fração silte do perfil P1 (RLe). — Símbolos: I/M= ilita/mica; Q= quartzo; P= plagioclásio; Ct= calcita; I= ilita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

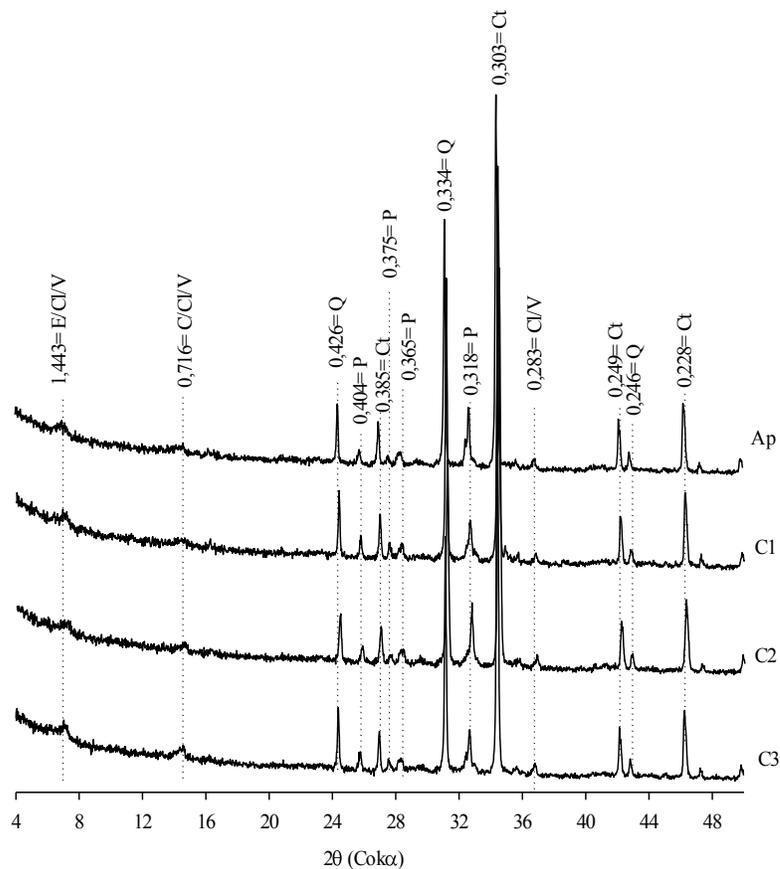


Figura 12. Difratoograma de raios-X da fração silte do perfil P2 (RYve). — Símbolos: Q= quartzo; P= plagioclásio; Ct= calcita; C= caulinita; E= esmectita; Cl/V= clorita/vermiculita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

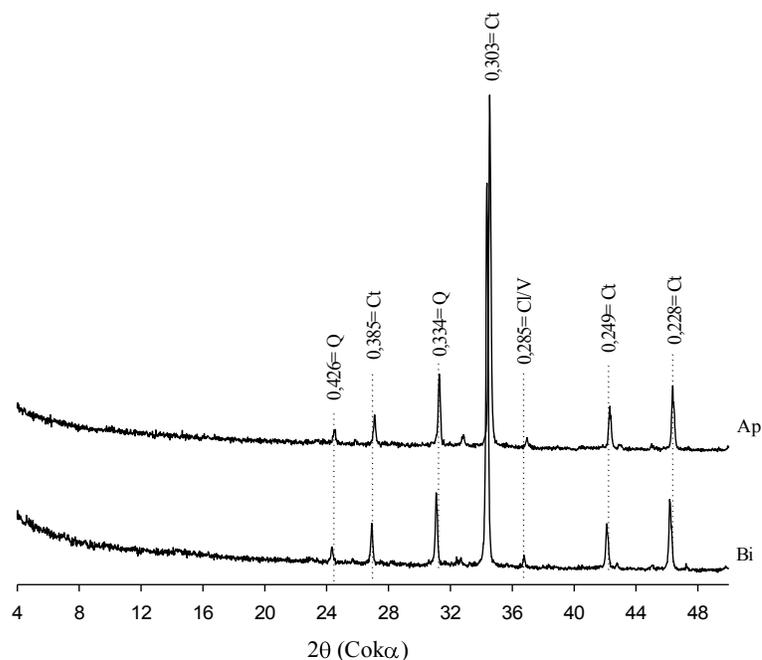


Figura 13. Difratoograma de raios-X da fração silte do perfil P3 (CX). — Símbolos: Q= quartzo; Ct= calcita; Cl/V= clorita/vermiculita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

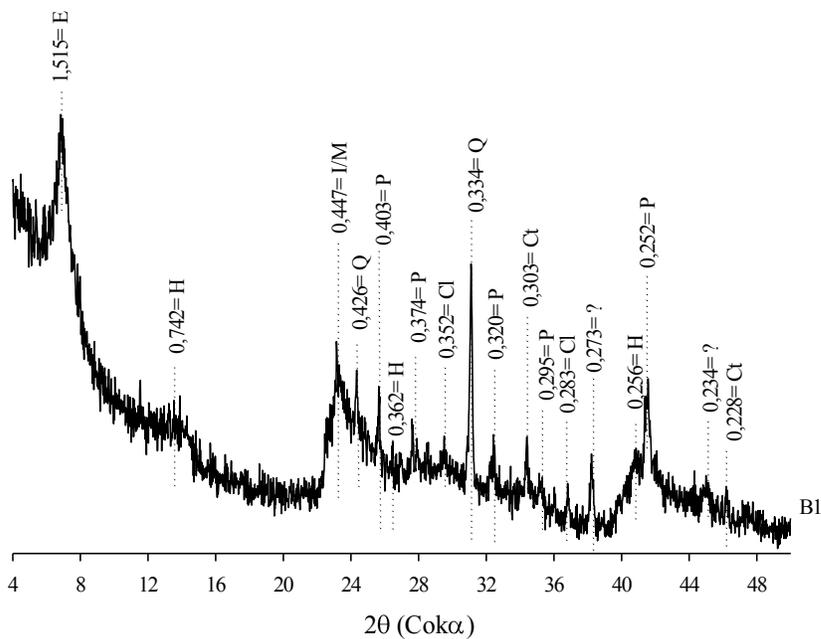


Figura 14. Difratoograma de raios-X da fração silte do perfil P4 (CXe). — Símbolos: Q= quartzo; P= plagioclásio; Ct= calcita; H= haloisita; E/Cl= esmectita/clorita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

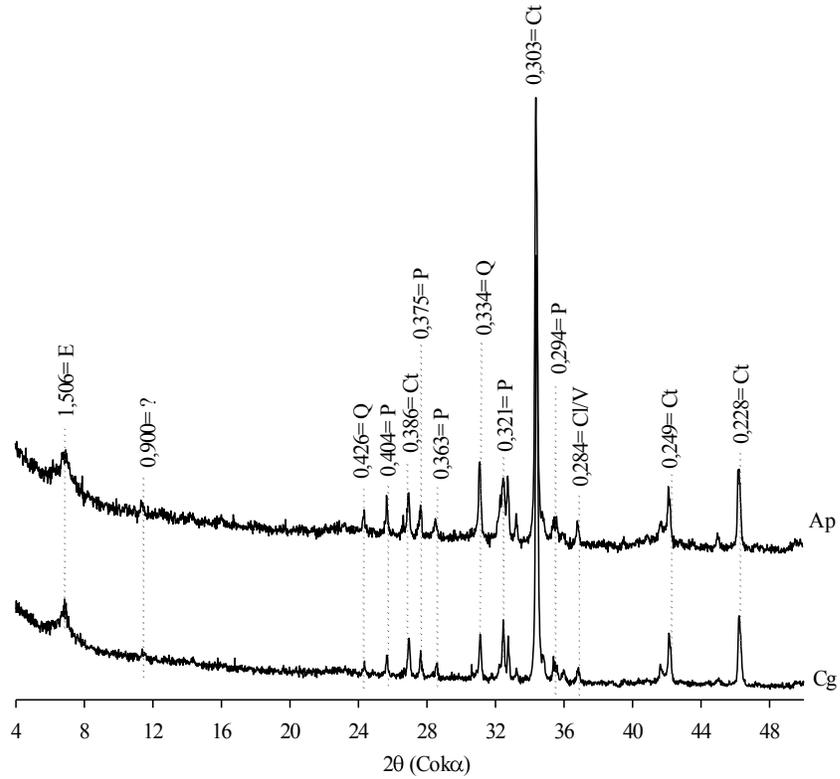


Figura 15. Difratoograma de raios-X da fração silte do perfil P5 (GX). — Símbolos: Q= quartzo; P= plagioclásio; Ct= calcita; E= esmetita; Cl/V= clorita/vermiculite. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

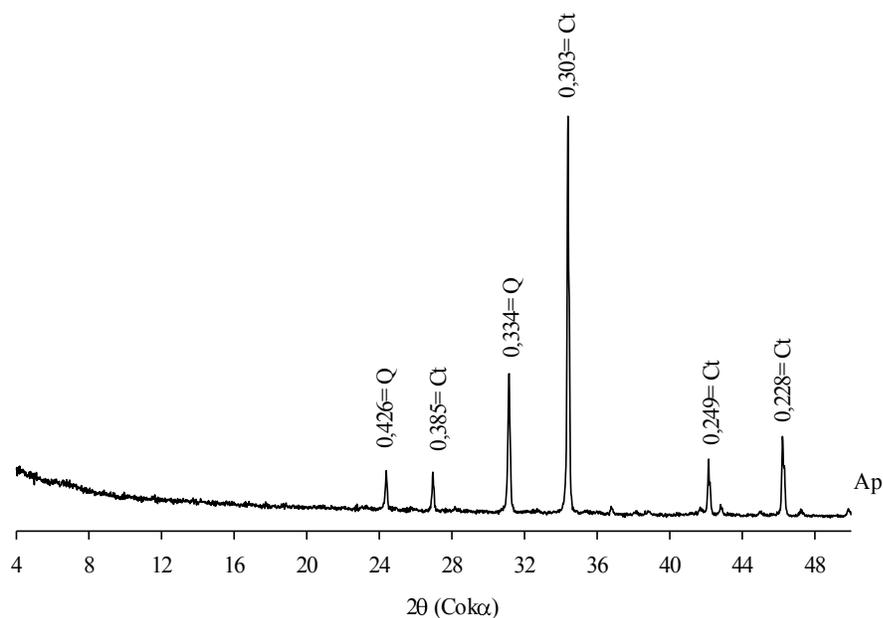


Figura 16. Difratoograma de raios-X da fração silte do perfil P6 (GX). — Símbolos: Q= quartzo; Ct= calcita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

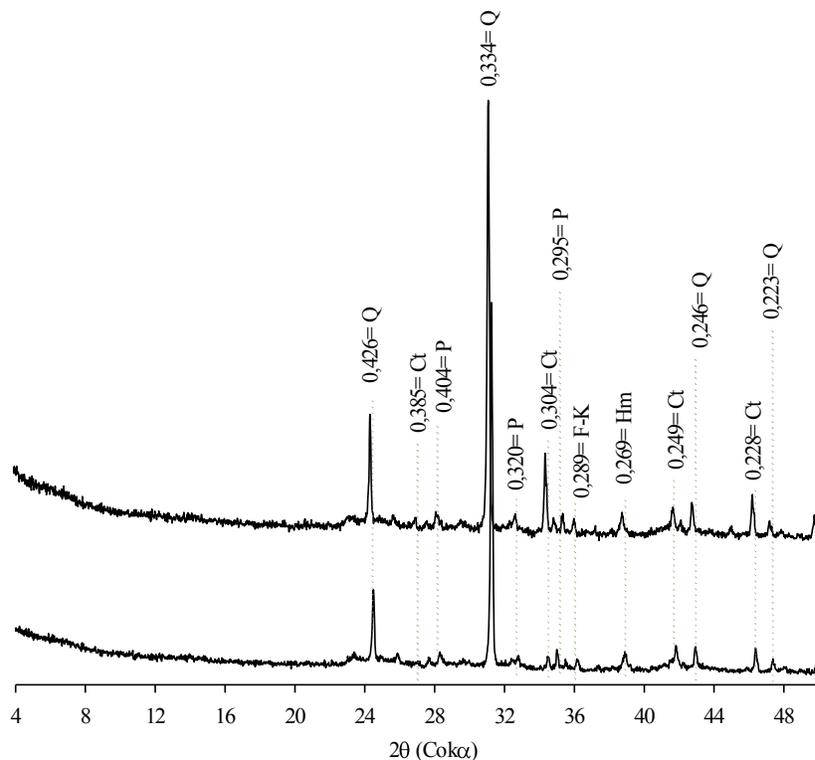


Figura 17. Difratoograma de raios-X da fração silte do perfil P7 (MDI). — Símbolos: Q= quartzo; Ct= calcita; p= plagioclásio; Hm= hematita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

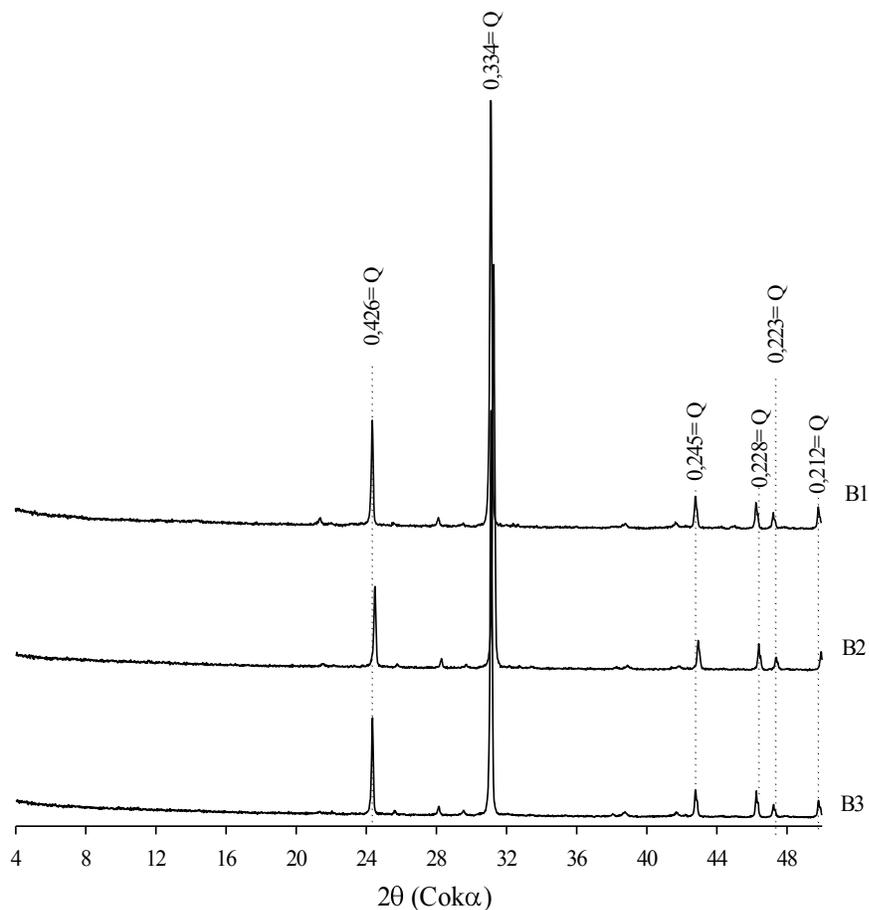


Figura 18. Difratoograma de raios-X da fração silte do perfil P10 (NV). — Símbolos: Q= quartzo. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

3.5.3 Mineralogia da fração argila

Os difratogramas da fração argila (Figuras 19 a 29) indicam a ocorrência de esmectita, ilita, mica, caulinita, calcita e quartzo como minerais predominantes na maioria dos solos analisados.

No perfil P1 (RL), foi detectada a presença de ilita/mica (1,044; 0,498; 0,447; 0,323; 0,255 nm), calcita (0,385; 0,304; 0,249; 0,228 nm), quartzo (0,426; 0,334 nm) e resíduo de caulinita (0,714 nm) com reflexo discreto. A presença de ilita foi inferida pela persistência do reflexo mais intenso (1,044) que não se deslocou com os tratamentos térmicos e de solvatação. Segundo Velde e Barré (2010), reflexos entre 1,02–1,06 nm sugerem a baixa cristalinidade da ilita.

Quanto à presença de caulinita, é provável que seja herdado, pois o pH alcalino do solo, a localização do perfil em sopé de encosta bem como o processo intempérico pouco expressivo não propiciaram condição para a sua formação pedogenética.

O horizonte A do perfil P2 (RY) é composto por esmectita (1,487 nm), illita/mica (1,026; 0,500; 0,448; 0,335; 0,257 nm), caulinita (7,14 nm), clorita (0,714; 0,472; 0,355 nm) e quartzo (0,426; 0,334 nm). A presença da esmectita foi corroborada pela expansão do pico 1,448 para 1,791 nm na amostra solvatada; e também pelo seu colapso para 1,00 nm quando aquecida a 550 °C. Por outro lado, a ocorrência de illita e clorita foi revelada pela persistência do reflexo 1,420 mesmo com os tratamentos; enquanto o pico da caulinita desaparece quando a mesma foi aquecida a 550 °C. O horizonte C2 teve a sua mineralogia formada pelos mesmos minerais do horizonte superficial. Por outro lado, o intenso reflexo de primeira ordem entre 1,5–1,0 nm da esmectita, indica a incompleta ocupação ou presença de molécula de água na entrecamada (VALDE e BARRÉ, 2010).

A fração argila dos Cambissolos, perfis (P3 e P4), contém apenas esmectita e quartzo em comum. Fora dos minerais supracitados, encontram-se nos horizontes Ap e Bi do P3 illita/mica, calcita, e pouca quantidade de caulinita e clorita. É essencial ressaltar que os reflexos da caulinita (0,720 nm) no horizonte Ap e (0,714 nm) no Bi se tornaram mais intensos nas amostras desferrificadas. A remoção dos óxidos de ferro permitiu a completa orientação paralela dos planos atômicos dos argilo-minerais, possibilitando a detecção de picos (MEHRA & JACKSON, 1958; JONES, 1963). Desta forma, a interação dos óxidos de ferro com a caulinita deve ter contribuído para o mascaramento dos reflexos. Assim, acredita-se que a baixa intensidade de reflexos da caulinita em amostras desferrificadas seja consequência da sua baixa quantidade, uma vez que o ambiente deste solo não é propício à sua formação.

Já no horizonte Bi do perfil P4, foram detectados também vermiculita, haloisita e traços de quartzo e gibbsita. Esta diferença traduz a ocorrência de processos pedogenéticos distantes nos dois perfis, com grau de intemperismo mais avançado no P4.

Os Gleissolos (P5 e P6) possuem composição mineralógica semelhante na fração argila. No horizonte Ap do perfil P5, detectou-se a presença de esmectita (1,486 nm), vermiculita (1,486; 0,355 nm), illita/mica (0,978; 0,498; 0,447; 0,257 nm), quartzo (0,426; 0,334 nm) e plagioclásio (0,320 nm). Já no horizonte subsuperficial (Cg), além de esmectita, vermiculita, illita/mica e quartzo, foram verificados calcita (0,385; 0,303; 0,249; 0,228 nm) e discretos reflexos de caulinita (0,716; 0,358; 0,258 nm). No que diz respeito ao P6, foi verificada a presença de esmectita (1,468 nm), vermiculita (1,468; 0,356 nm), illita/mica (0,500; 0,257 nm), caulinita (0,720 nm) e quartzo (0,426; 0,334 nm). O pH alcalino e o caráter palustre do ambiente no qual se encontram estes dois solos, sugerem que a caulinita não se formou por processos pedogenéticos; mas teria sido de origem

alóctone. Furquim et al. (2010), ao estudar a mineralogia dos solos de Salina do Meio no Pantanal brasileiro, chegam a conclusões parecidas.

O perfil P7 do Chernossolo apresenta na sua fração argila esmectita (1,585 nm), caulinita (0,720; 0,444; 0,358; 0,256 nm) e quartzo (0,426; 0,334 nm), tanto no horizonte Ap quanto no B. A presença da caulinita com picos expressivos é incomum em Chernossolos. Segundo Ellis e Foth (1997), a caulinita ocorre com mais frequência em solos muito intemperizados tais como Argissolos (Ultisols) e Latossolos (Oxisols); por conseguinte, a sua ocorrência em Chernossolo (Mollisols) e Vertissolo (Vertisols) deve-se ao carreamento de materiais pré-intemperizados originados de cotas mais elevadas. Muhs et al., (1990), ao estudarem os solos derivados do calcário na região caribenha e na Atlântico Oeste, sugeriram que a ocorrência de aluminossilicatos nestes solos se deve à deposição fluvial de argilas provenientes de altitudes maiores.

A fração argila do horizonte B1 do perfil P10 (NV) possui vermiculita com hidróxi-Al entrecamada (1,427; 0,355; 0,285 nm), caulinita (0,715; 0,435; 0,234 nm), hematita (0,368; 0,269; 0,251; 0,220 nm), gibbsita (0,482; 0,238 nm), quartzo (0,334; 0,245; 0,228 nm) e resíduo de plagioclásio (0,318 nm). Estes mesmos minerais foram detectados no horizonte B3, exceto o plagioclásio. A presença de vermiculita com hidróxi-Al entrecamada foi revelada pelo colapso parcial do reflexo 1,443 para 1,171 nm ao ser aquecida a 550 °C, e a persistência do pico de primeira ordem quando saturada com Mg e solvatada com glicerol. De forma similar, a detecção de gibbsita e caulinita foi evidenciada pelo desaparecimento dos picos de primeira ordem ao serem aquecidas a 350 e 550 °C, respectivamente. A intensidade do reflexo da gibbsita tanto no horizonte B1 quanto no B2, é reveladora do seu alto grau de cristalinidade. A mineralogia deste perfil, embora inclua a vermiculita como mineral 2:1, confirma o avançado estágio de intemperismo que sofreu os solos localizados na região sul da área de estudo, que apresenta altitude elevada e índice pluviométrico maior que os demais locais, podendo ultrapassar 2000 mm ao ano, conforme citado no Capítulo I.

O caráter eutrófico desse solo desenvolvido sobre materiais de origem calcária e basáltica está concordante com os minerais observados cuja formação ocorreu em condição de intemperismo químico restrito. Dentre os minerais contribuintes da alta saturação por bases, destacam-se a vermiculita e a esmectita que se observam na maioria dos perfis. Vale lembrar que a presença da esmectita no material calcário é proveniente do basalto ou outros materiais; pois segundo Retallack (2012), este mineral é impureza do calcário. A maioria dos minerais encontrados no presente estudo

foi identificada por Colmet-Daage (1969) e Gutrie e Shannon (2004); porém o primeiro autor não verificou a presença de ilita tanto nos solos haitianos quanto nos outros países do Caribe.

Ao levar em conta a alta saturação por bases deste solo, é possível que o percentual de caulinita encontrado seja muito baixo.

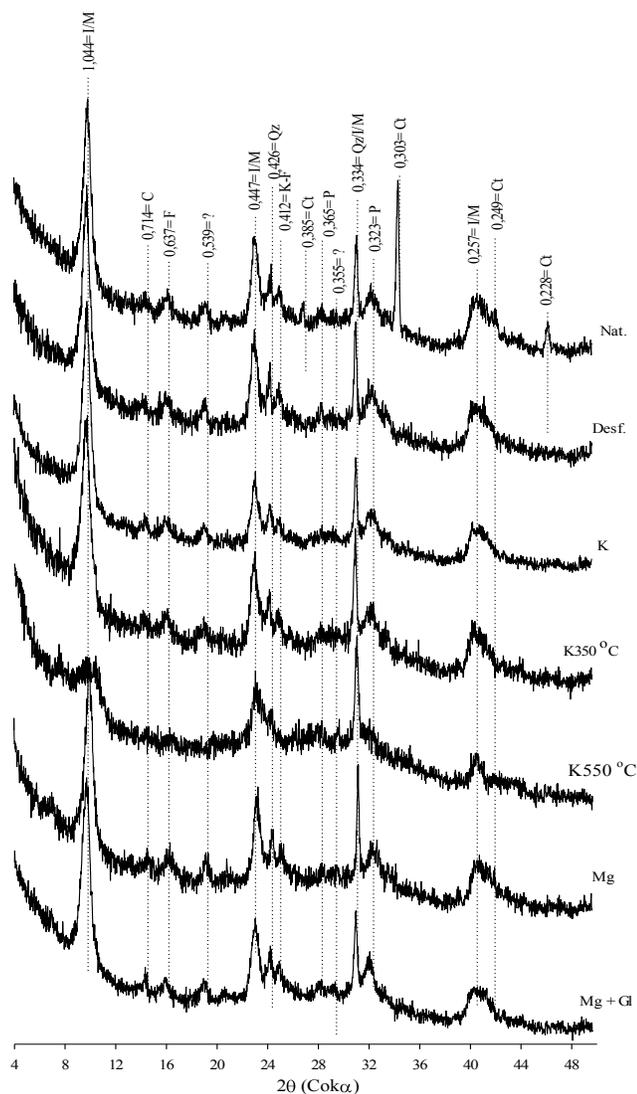


Figura 19. Difratograma de raios-X da fração argila do perfil P1 (RL- hor. Ap). — Símbolos: C= caulinita; Q= quartzo; I/M= ilita/mica; P= plagioclásio; F-K=feldspato potássico; F= feldspato; Ct= calcita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

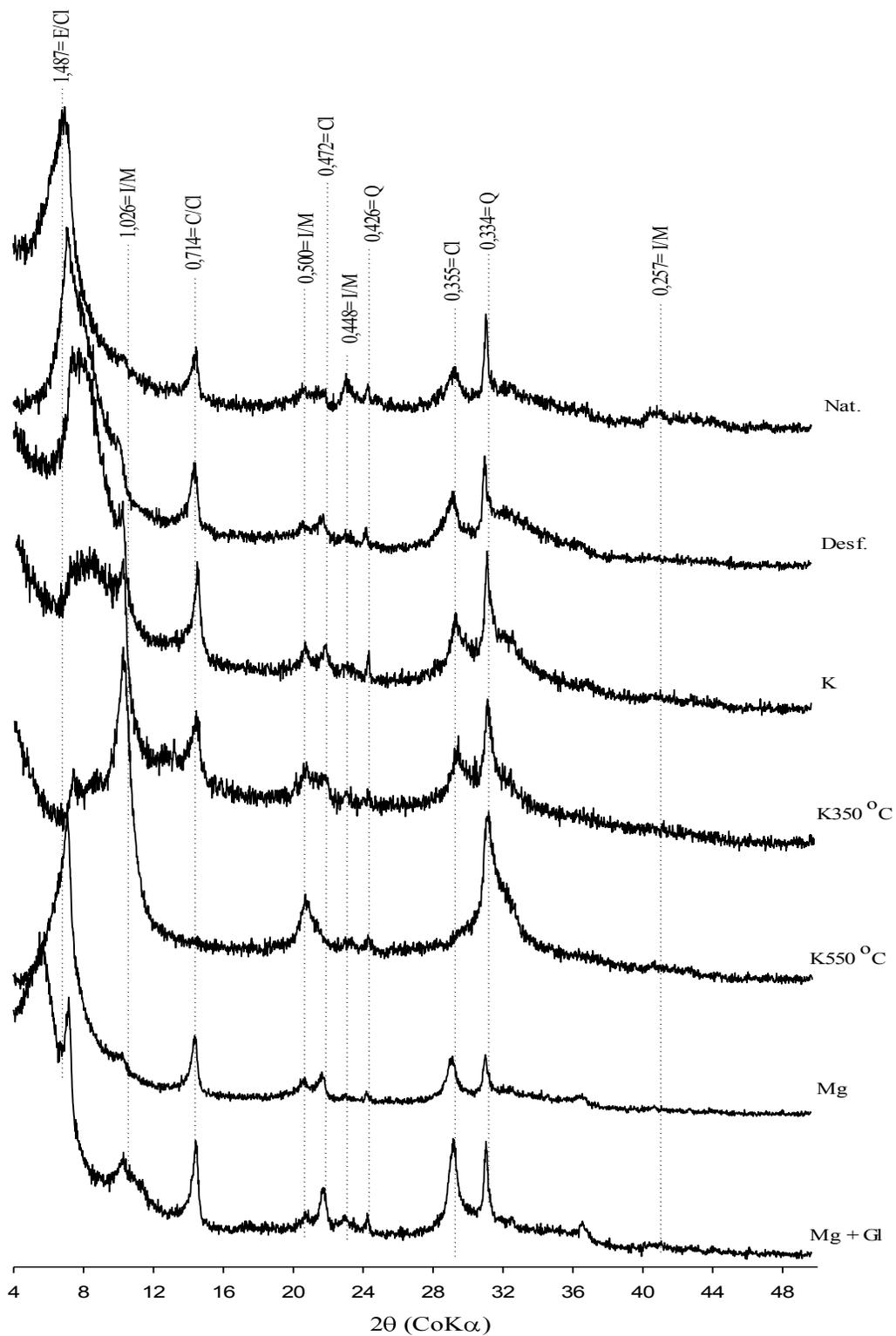


Figura 20. Difratograma de raios-X da fração argila do perfil P2 (RY – hor. Ap). — Símbolos: Q= quartzo; Pg= paligorsquita; Ct= calcita; E/Cl= esmectita/clorita; Cl= clorita; I/M= ilita/mica. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

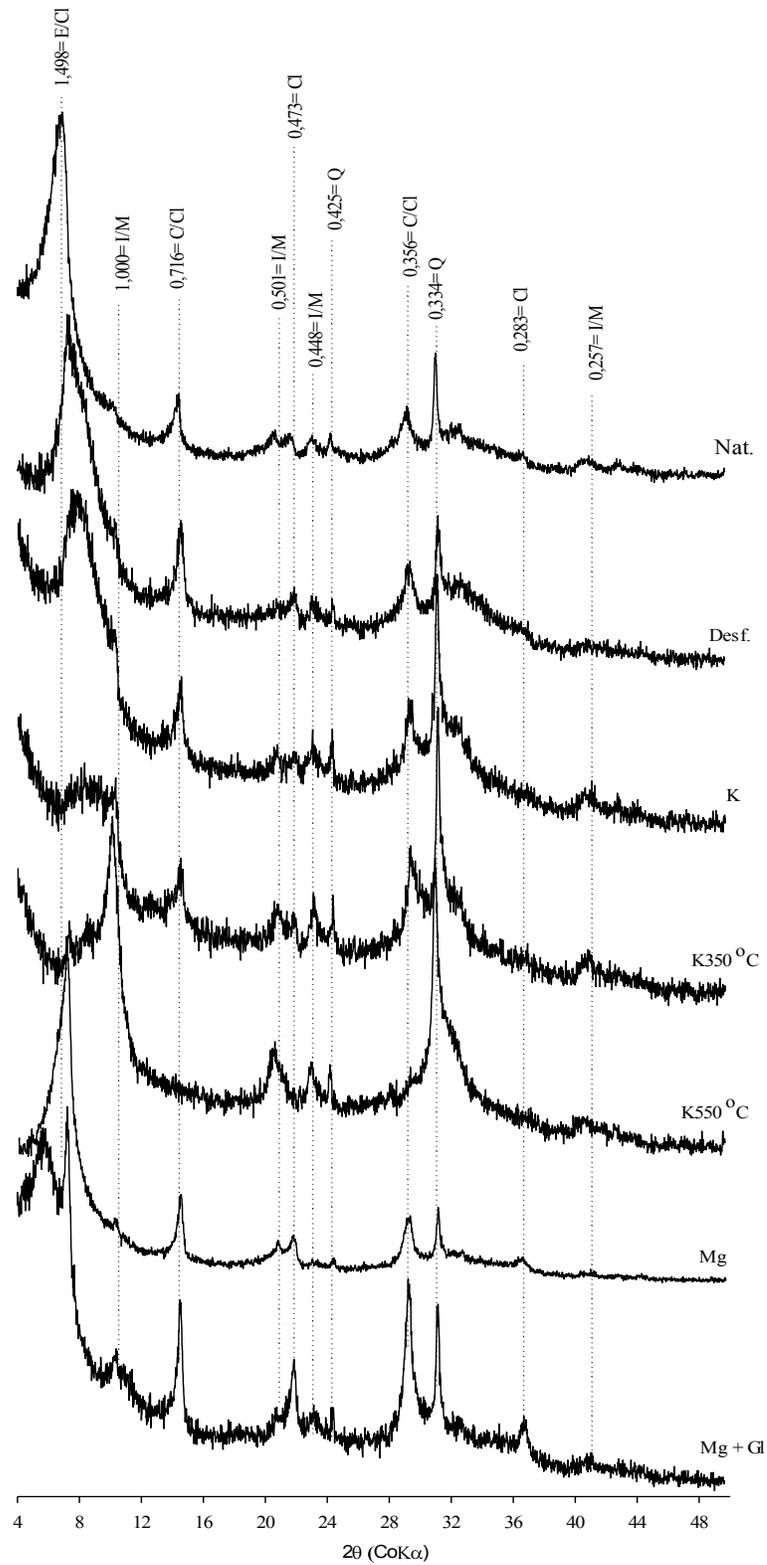


Figura 21. Difratograma de raios-X da fração argila do perfil P2 (RY- hor. C2). — Símbolos: Q= quartzo; Ct= calcita; C= caulinita; E/Cl= esmectita/clorita; Cl= clorita; I/M= ilita/mica. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

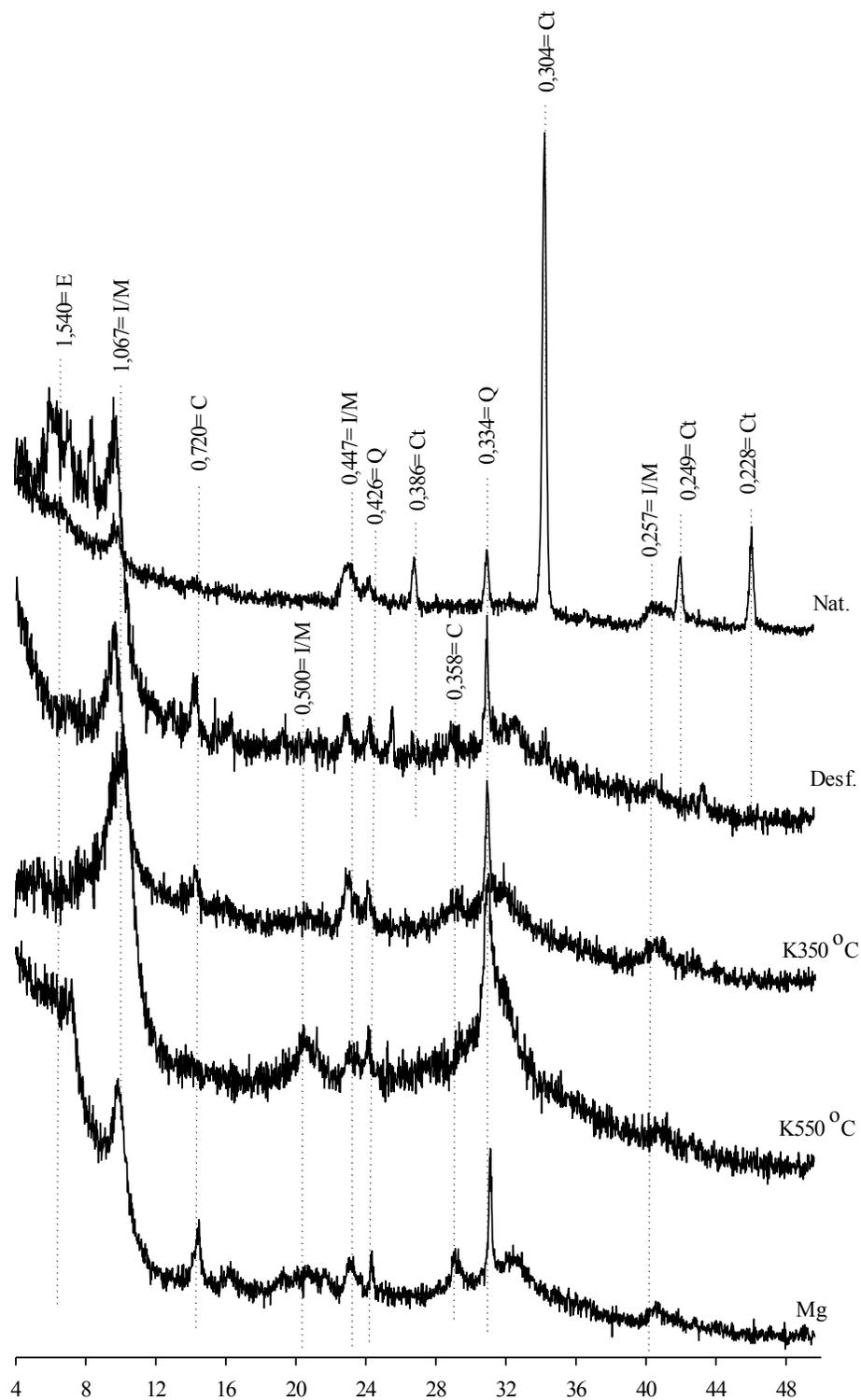


Figura 22. Difratoograma de raios-X da fração argila do perfil P3 (CX- hor. Ap). — Símbolos: Q= quartzo; Ct= calcita; E = esmectita/clorita; Cl= clorita; I/M= ilita/mica. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

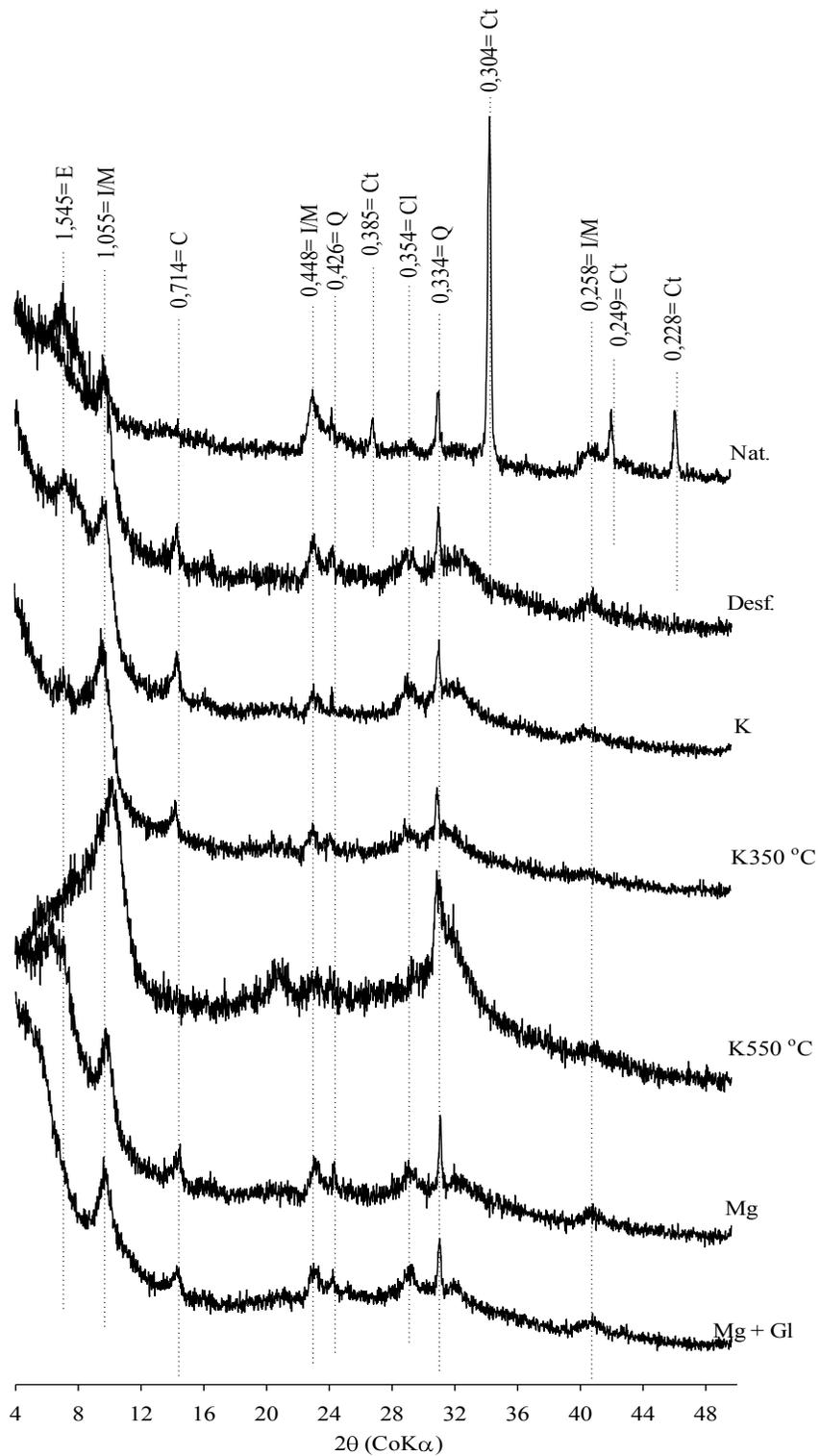


Figura 23. Difratograma de raios-X da fração argila do perfil P3 (CX- hor. Bi). — Símbolos: Q= quartzo; Ct= calcita; C= caulinita; E= esmectita; Cl= clorita; I/M= ilita/mica. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

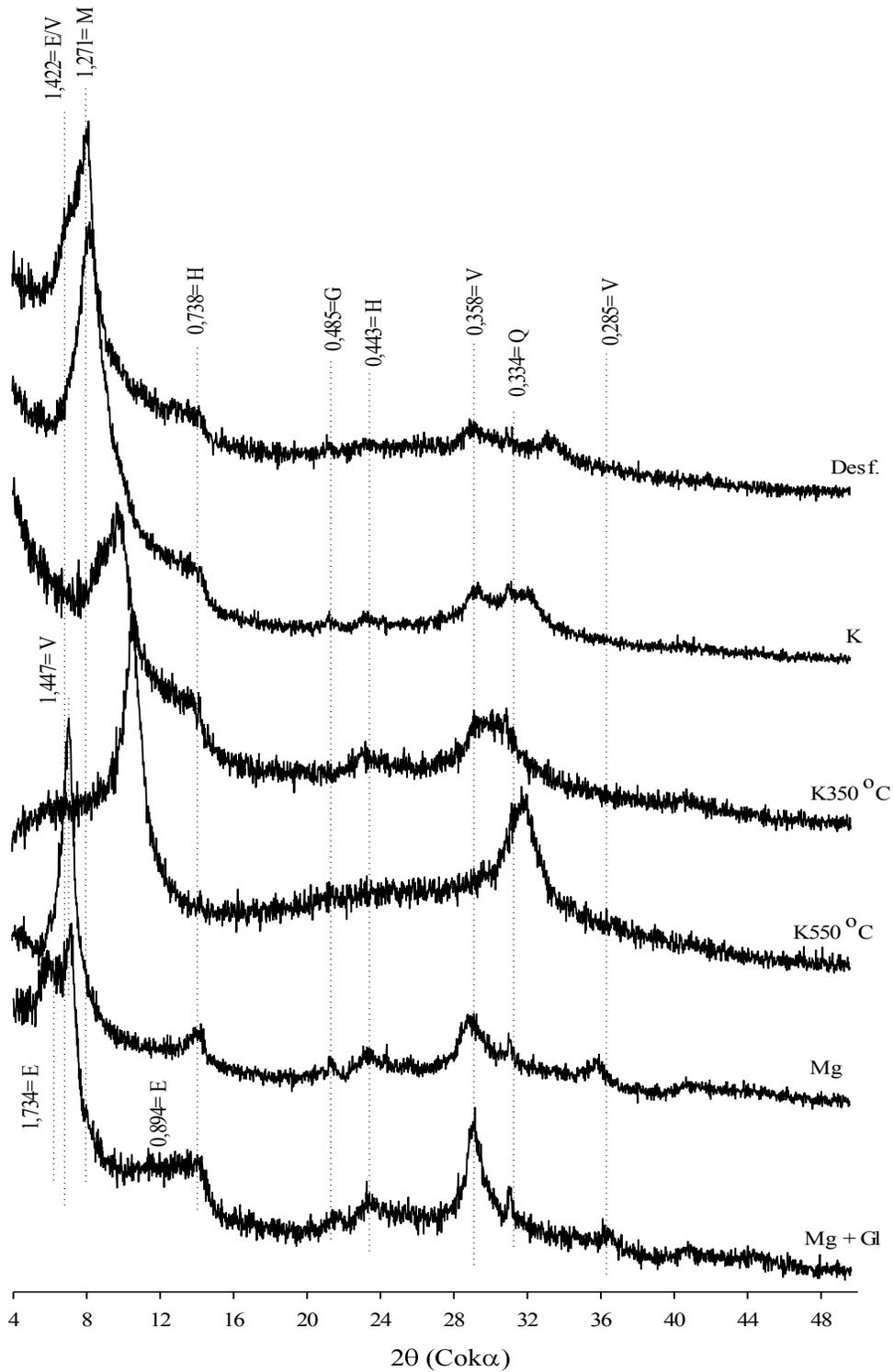


Figura 24. Difratoograma de raios-X da fração argila do perfil P4 (CX- hor. Ap). — Símbolos: Q= quartzo; Ct= calcita; E/V= esmectita/vermiculita; Cl= clorita; M= mica; G= gibbsita; H= haloisita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

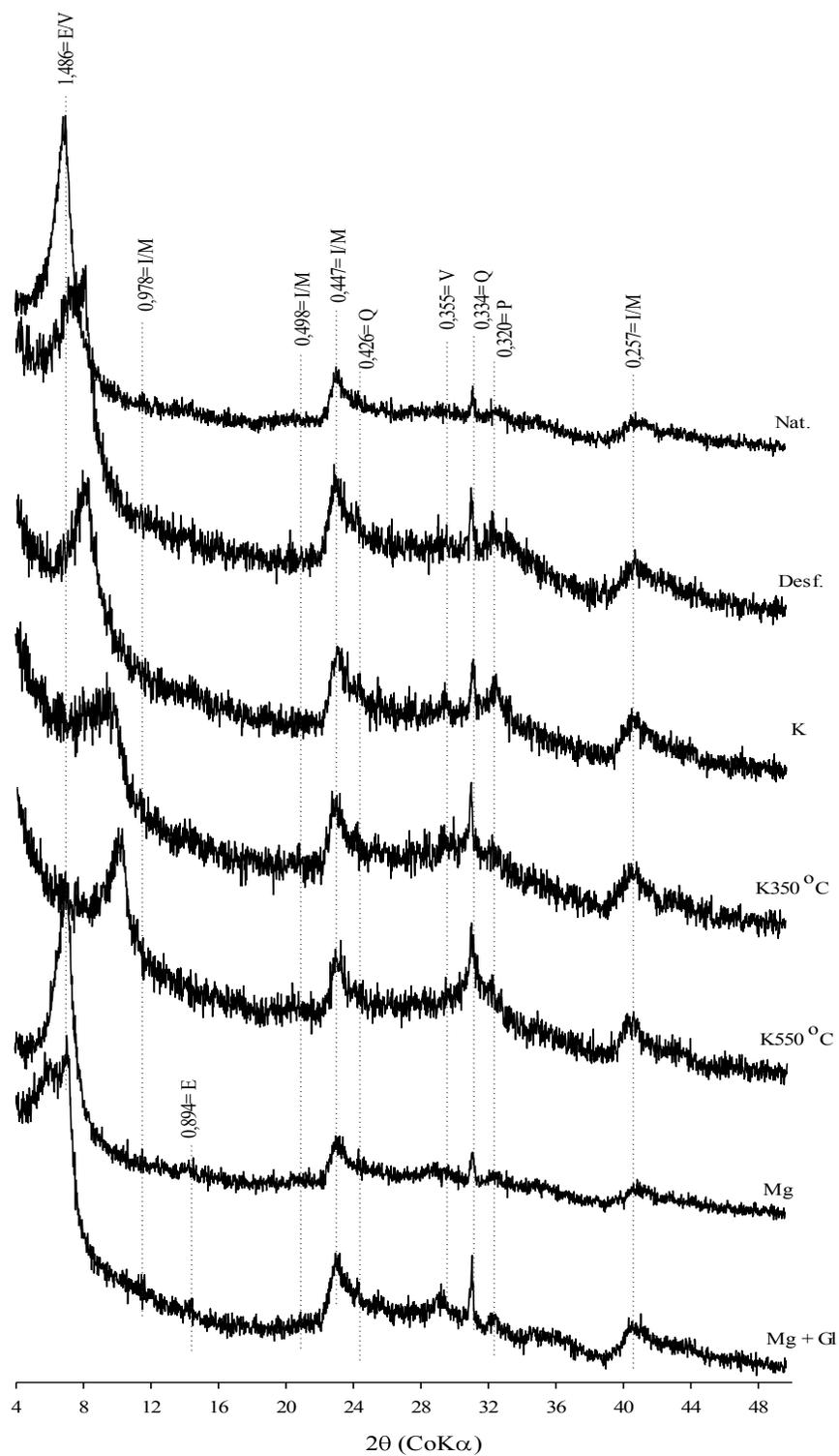


Figura 25. Difratoograma de raios-X da fração argila do perfil P5 (GX- hor. Ap). — Símbolos: Q= quartzo; Ct= calcita; E/V= esmectita/vermiculita; Cl= clorita; I/M= illita/mica; P= plagioclásio. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

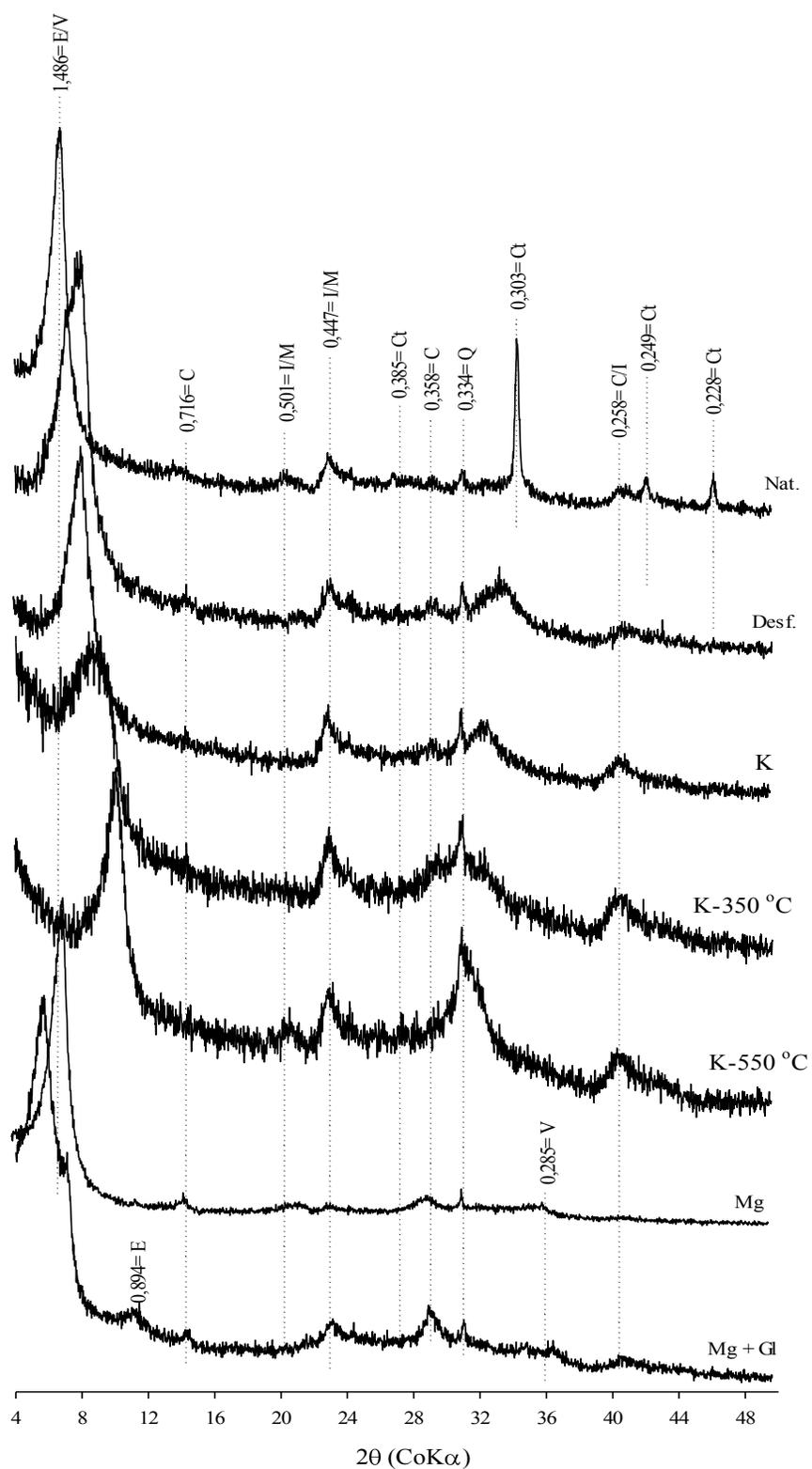


Figura 26. Difratoograma de raios-X da fração argila do perfil P5 (GX- hor. Cg). — Símbolos: Q= quartzo; Ct= calcita; E/V= esmectita/vermiculita; I/M= ilita/mica; C= caulinita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

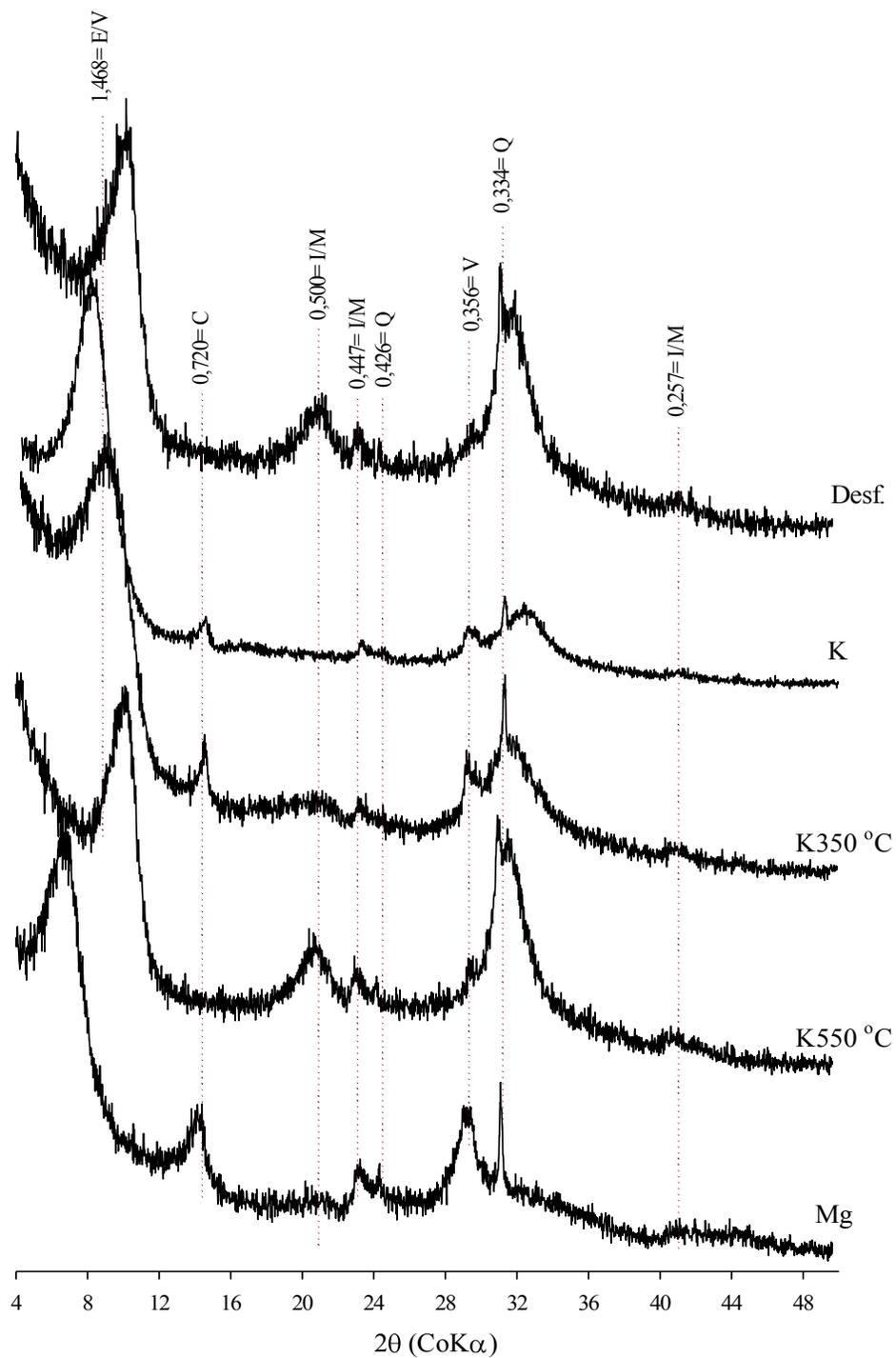


Figura 27. Difratograma de raios-X da fração argila do perfil P6 (GX- hor. Ap). — Símbolos: Q= quartzo; C= caulinita; E/V= esmectita/vermiculita; I/M= ilita/mica;. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

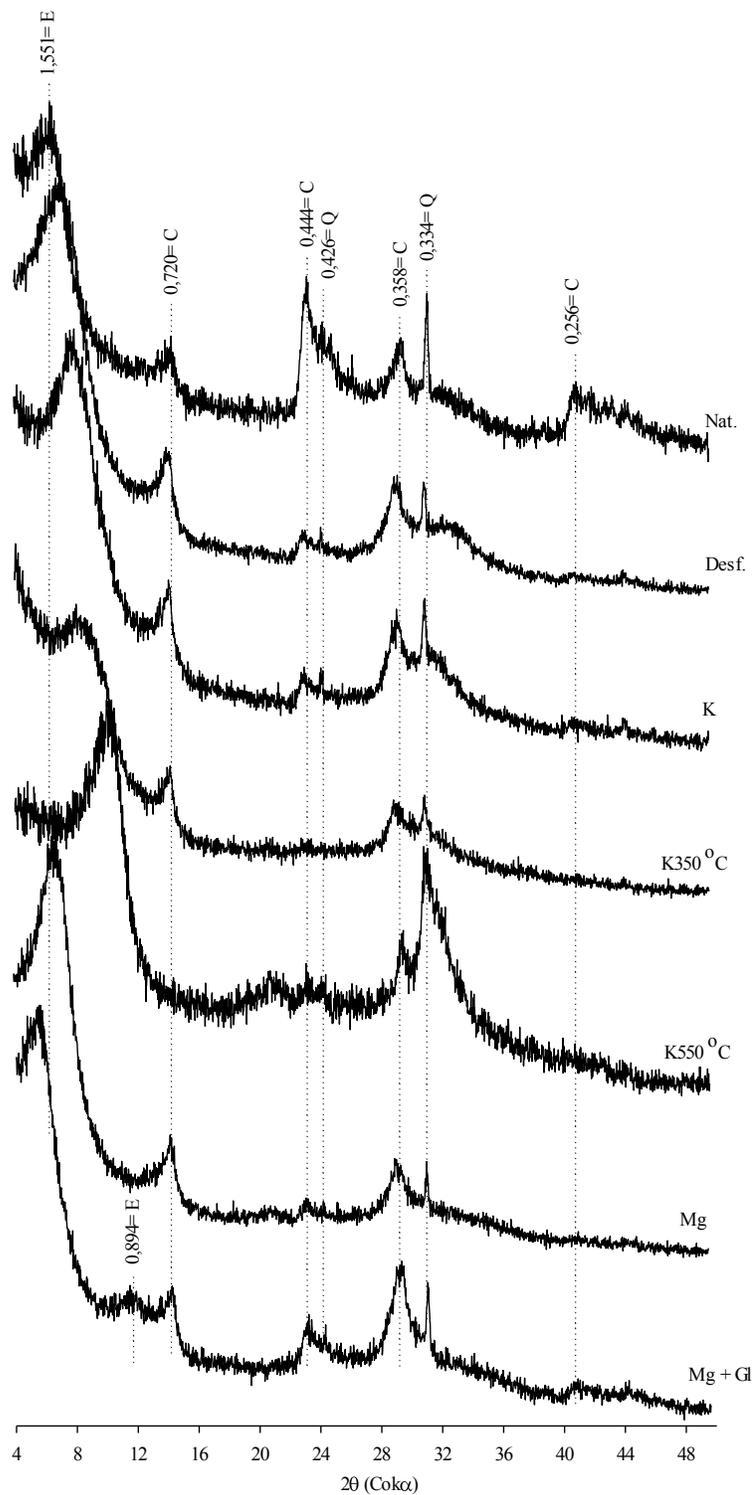


Figura 28. Difratograma de raios-X da fração argila do perfil P7 (MDI- hor. Ap). — Símbolos: Q= quartzo; E= esmectita; C= caulinita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

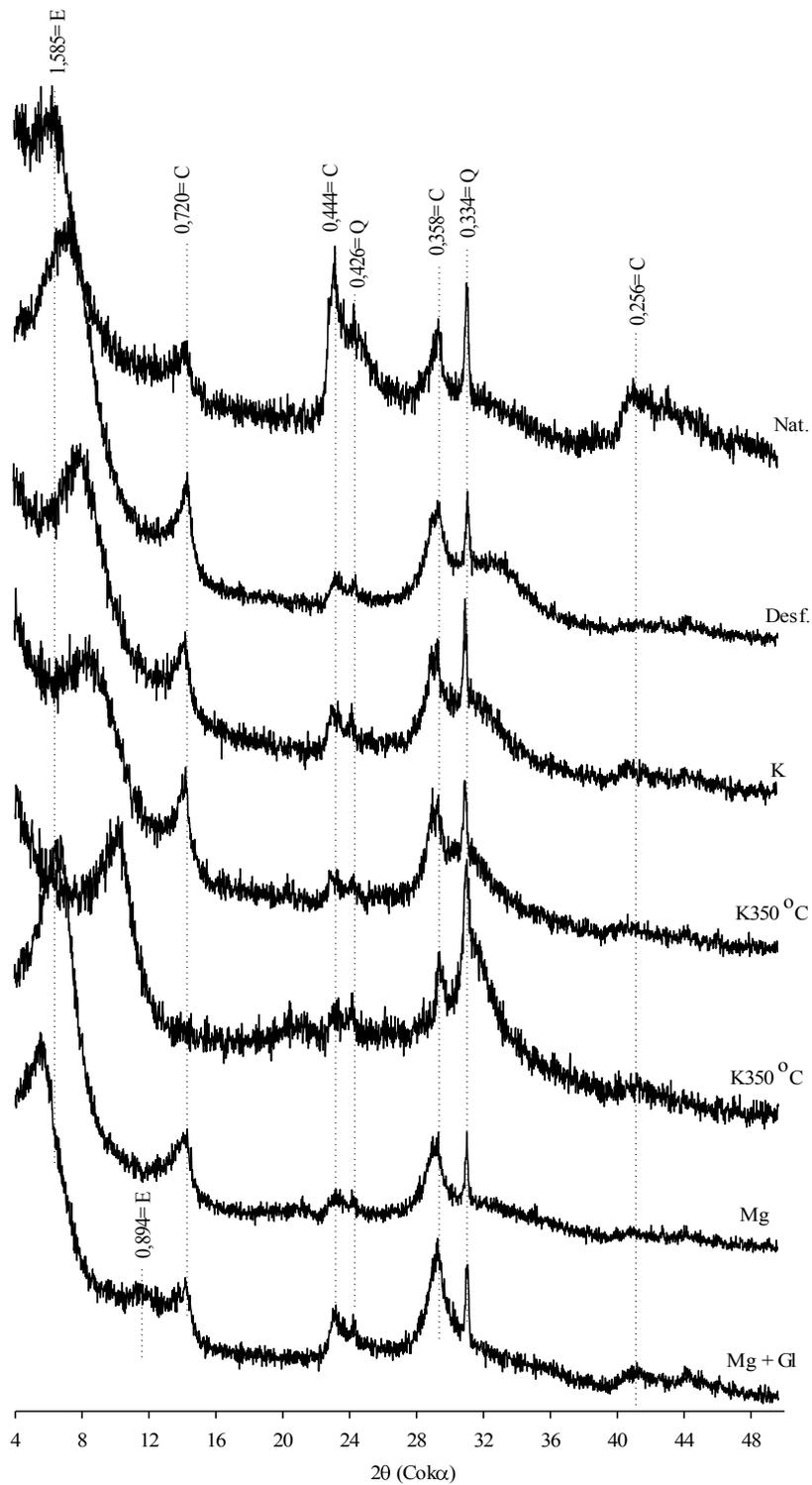


Figura 29. Difratograma de raios-X da fração argila do perfil P7 (MDI- hor. B). — Símbolos: Q= quartzo; E= esmectita; C= caulinita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

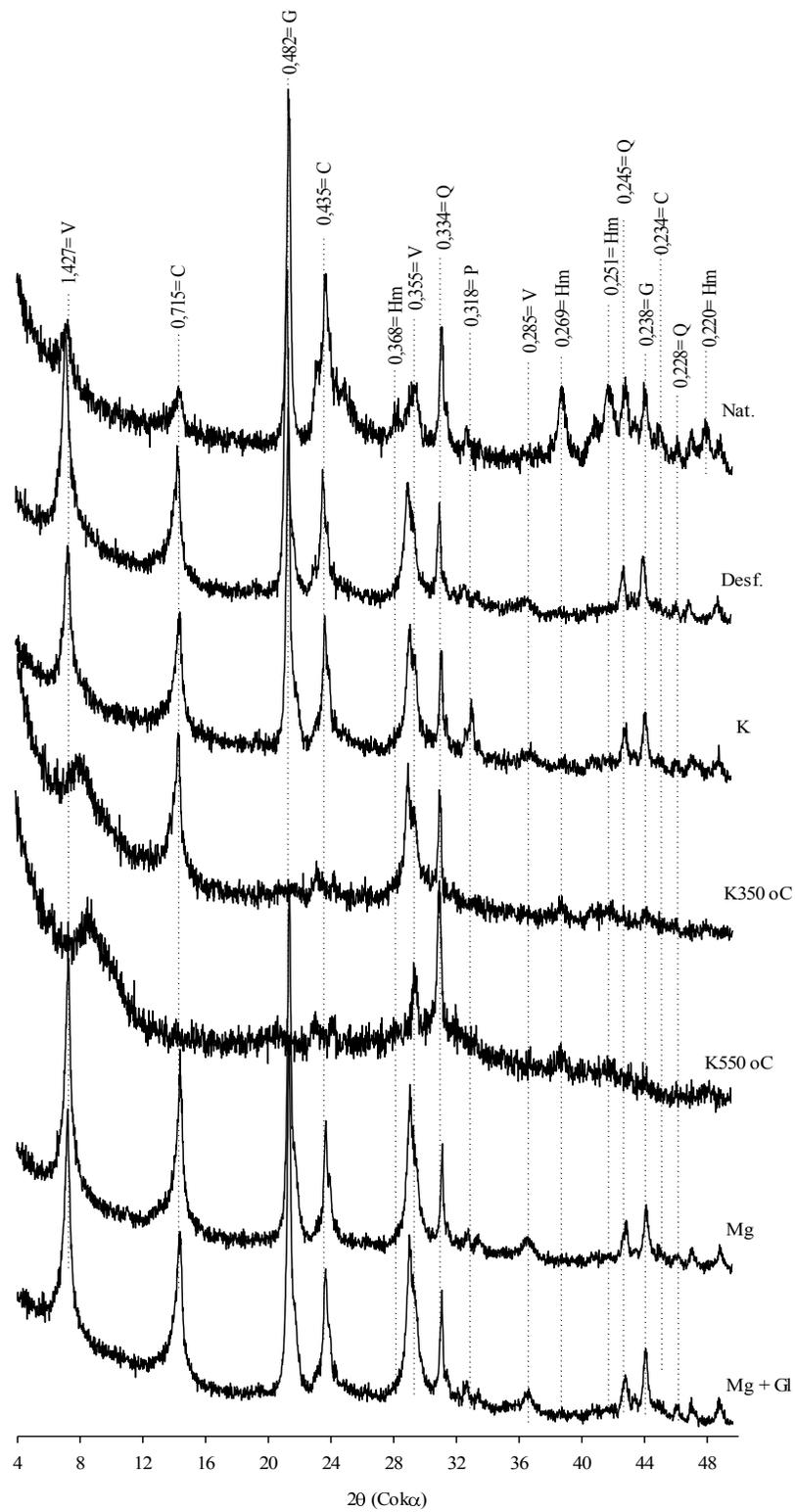


Figura 30. Difratoograma de raios-X da fração argila do perfil P10 (NV- hor. B1). — Símbolos: Q= quartzo; Ct= calcita; V= vermiculita; P= plagioclásio; Hm= hematita; C= caulinita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

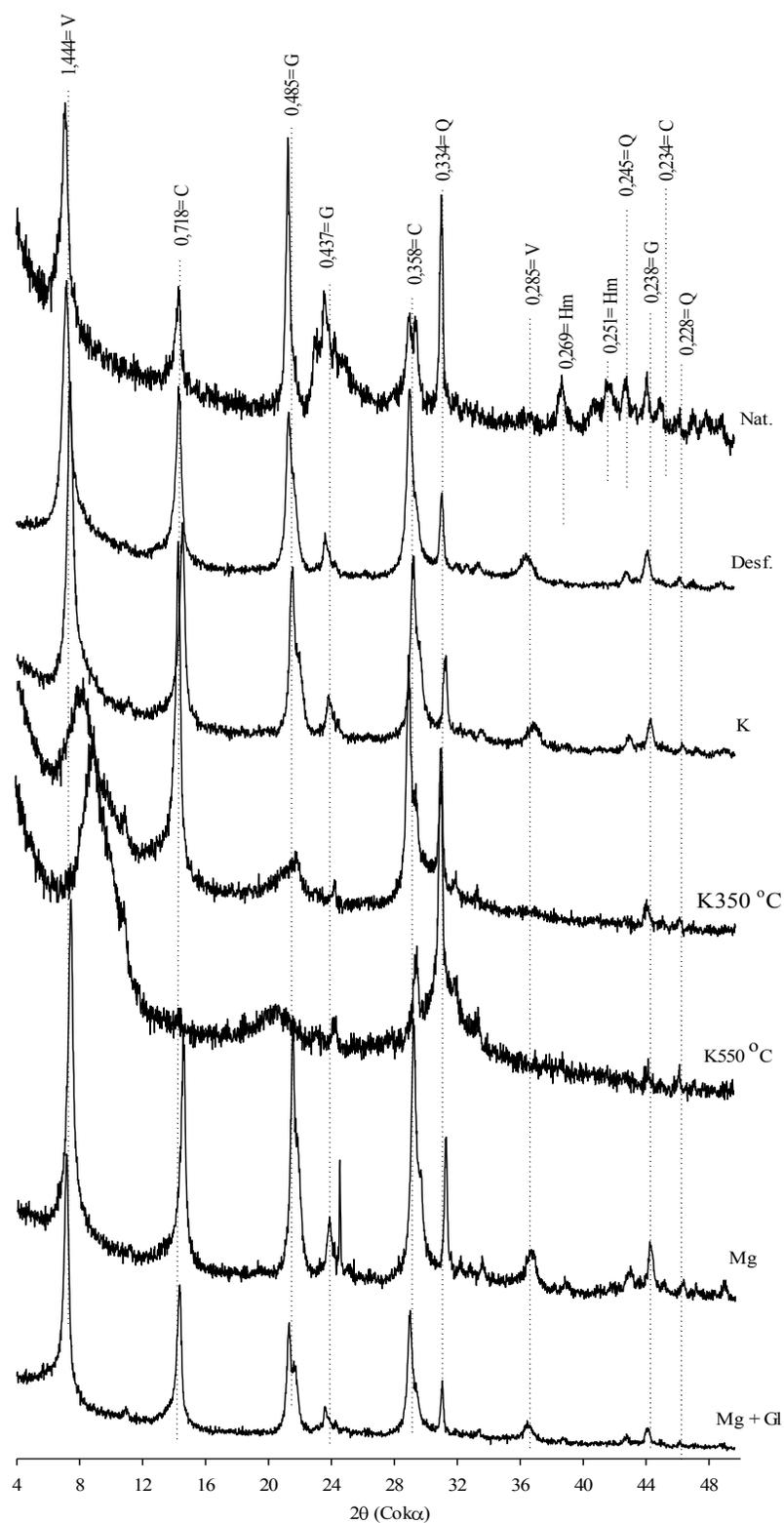


Figura 31. Difratograma de raios-X da fração argila do perfil P10 (NV- hor. B3). — Símbolos: Q= quartzo; Ct= calcita; V= vermiculita; Hm= hematita; C= caulinita. — Os números correspondem à distância interplanar (d) em nanômetros (nm).

Tabela 5. Composição mineralógica dos solos dos solos

Perfil	Solo			Hor.	Mineralogia		
					Areia	Silte	Argila
P1	NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico Fragmentário			Ap	Biotita, pirita, quartzo, calcita, brucita.	Ilita/mica, quartzo, plagioclásio, calcita; ilita.	Caulinita, quartzo, ilita/mica, plagioclásio, feldspato potássico, feldspato, calcita
P2	NEOSSOLO FLÚVICO carbonático	Ta	Eutrófico	Ap	Quartzo, calcita	Quartzo, plagioclásio; calcita, caulinita, esmectita, clorita/vermiculita.	Quartzo, paligorsquita, calcita, esmectita/clorita, clorita, ilita/mica
				C1	Quartzo, calcita	Quartzo, plagioclásio; calcita, caulinita, esmectita, clorita/vermiculita	-
				C2	Quartzo, calcita	Quartzo, plagioclásio; calcita, caulinita, esmectita, clorita/vermiculita	Quartzo, calcita, caulinita, esmectita/clorita, clorita, ilita/mica
				C3	Quartzo, calcita	Quartzo, plagioclásio; calcita, caulinita, esmectita, clorita/vermiculita	-
P3	CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico léptico			Ap	Quartzo, calcita, potássico, brucita, feldspato dolomita,	Quartzo, calcita, clorita/vermiculita.	Quartzo, calcita, esmectita/clorita, clorita; ilita/mica.
				Bi	Quartzo, calcita, potássico, brucita, feldspato dolomita,	Quartzo, calcita, clorita/vermiculita.	Quartzo, calcita, caulinita, esmectita, clorita, ilita/mica.
P4	CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico			Ap	Quartzo, montmorilonita, ilita-plagioclásio, ilita/mica, haloisita,	Quartzo, calcita, esmectita/clorita, plagioclásio, haloisita,	Quartzo, mica, gibbsita, haloisita, calcita, clorita,

Tabela 6. Composição mineralógica dos solos (continuação)

Perfil	Solo	Hor.	Mineralogia					
			Areia		Silte		Argila	
P5	GLEISSOLO HÁPLICO sódico	Ap	Plagioclásio, dolomita, potássico	calcita, feldspato	Quartzo, calcita, clorita/vermiculite.	plagioclásio, esmectita,	Quartzo, esmectita/vermiculita, ilita/mica, plagioclásio.	calcita, clorita,
		Cg	Plagioclásio, feldspato potássico	calcita,	Quartzo, calcita, clorita/vermiculite.	plagioclásio, esmectita,	Quartzo, esmectita/vermiculita, caulinita	calcita, ilita/mica,
P6	GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico	Ap	Caulinita, quartzo, pirita	calcita,	Quartzo; calcita.		Quartzo, esmectita/vermiculita, ilita/mica	caulinita,
P7	CHERNOSSOLO EBÂNICO Ôrtico típico	Ap	Quartzo, calcita, feldspato carbonato- apatita/carbonato- flurorapatita	ilita/mica, potássico,	Quartzo, plagioclásio, hematita	calcita,	Quartzo; esmectita; caulinita.	
		B	Quartzo, calcita, feldspato carbonato- apatita/carbonato- flurorapatita, Mg-calcita, diopsídio	ilita/mica, potássico,	Quartzo, plagioclásio, hematita	calcita,	Quartzo; esmectita; caulinita	
P10	NITOSSOLO VERMELHO Epieutrófico típico	B1	Gibsita, hematita	plagioclásio,	Quartzo		Quartzo; calcita; vermiculita; plagioclásio; hematita; caulinita.	
		B2	Gibsita, hematita	plagioclásio,	Quartzo		-	
		B3	Gibsita, hematita	plagioclásio,	Quartzo		Quartzo; calcita; vermiculita; hematita; caulinita.	

4 CONCLUSÕES

- O levantamento de solos mostrou que a área apresenta grande diversidade quanto à sua cobertura pedológica, em virtude da variabilidade litológica, da presença de microclimas e das características geomorfológicas. Desta forma, as classes de maior frequência observadas foram Neossolos Litólicos, Cambissolos, Chernossolos, Neossolos Flúvicos e Gleissolos;
- Os solos estudados apresentaram-se bem estruturados com predomínio de textura média a muito argilosa. Estes são quimicamente ricos, com saturação por bases acima de 90% e pH alcalino, em geral; o que traduz a forte ligação dos solos com o material de origem, uma vez que os processos intempéricos são pouco avançados;
- Os principais constituintes mineralógicos dos solos estudados são quartzo, calcita e plagioclásio nas frações areia e silte; enquanto a fração argila é composta predominantemente por esmectita, clorita, illita, calcita e quartzo. A presença dos minerais 2:1, sendo decorrente da hidrólise parcial, explica o caráter eutrófico dos solos, podendo ser controlado pelo clima pouco úmido de grande parte da área, pela litologia e pelos processos morfogenéticos atuantes na região.
- A caulinita observada nos solos desenvolvidos em terrenos de baixada pode estar relacionada com o aporte de materiais pre-intemperizados depositados pela erosão hídrica, tendo como origem as áreas húmidas em cotas mais elevadas.
- Apesar da boa fertilidade natural constatada na maioria dos solos, o predomínio de formas denudacionais e de superfícies escarpadas que promoveram solos rasos, constituem as principais limitações ao uso e à intensificação agrícola nos terrenos declivosos.
- Para o melhor entendimento dos processos pedogenéticos, é imprescindível realizar estudos adicionais mais detalhados dos solos da região, inclusive análise de micromorfologia.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOCKHEIM, J. G. Solution and use of chronofunctions in studying soil development. **Geoderma**, v. 24, n. 1, p. 71–85, 1980.
- COLMET-DAAGE, F.; DELAUNE, M.; ROBBART, F.; LOHIER, G.; YOUANCE, J.; GAUTHEYROU, J. et M.; FUSIL, G.; KOUKOU, M. Caractéristiques et nature de la fraction argileuse de quelques sols rouges d’Haïti situés sur calcaires durs. **Cahier O.R.S.T.O.M.**, sér. Pédol., v. 7, n. 3, p. 1-71, 1969.
- FOTH, H. D.; ELLIS, B. G. Soil fertility. Soil fertility. CRC Press, (Ed. 2). 1997. 304 p.
- FURQUIM, S. A. C., GRAHAM, R. C., BARBIÉRO, L., NETO, J. Q., VIDAL-TORRADO, P. Soil mineral genesis and distribution in a saline lake landscape of the Pantanal Wetland, Brazil. **Geoderma**, v. 154, n. 3, p. 518-528, 2010.
- GILLESPIE, R. G.; CLAGUE, D. A. **Encyclopedia of Islands**. University of California Press. 2009. 1111p.
- GLANZ, J. Saving Our Soil: Solutions for Sustaining Earth’s Vital Resource. **Johnson Books**, Boulder, CO, USA, 1995, 182p.
- GLIŃSKI, J.; HORABIK, J.; LIPIEC, J. **Encyclopedia of agrophysics**. Springer Science & Business Media, 2011.
- GOLDBERG, P.; HOLLIDAY, V. T.; FERRING, C. R. **Earth sciences and archaeology**. Springer Science & Business Media, 2013.
- GOLDICH, S. S., BERGQUIST, H. R. **Aluminous lateritic soil of the republic of Haiti, W. I.** Bulletin 954-C, Geologic Investigations in the American Republics, p. 36-112, 1946.
- GUTHRIE, R. L.; SHANNON, D. A. Soil profile descriptions for steeplands research sites in Haiti. United States Agency for International Development Soil Management **Collaborative Research Support Program**. Auburn University, Alabama, 36849-5412 U.S.A. Technical Bulletin No. 2004-01. 24 p.
- HUGGETT, R. J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. **Catena**, v. 32, n. 3, p. 155–172, 1998.
- JENNY, H. Factors of Soil Formation. **McGraw-Hill**, New York. 1941, 281p.
- JONES, D. L. Upper Cretaceous (Campanian and Maestrichtian) ammonites from southern Alaska. No. 432. US Govt. Print. Off., 1963.
- MAHONEY, J. J., SAUNDERS, A. D., STOREY, M., & RANDRIAMANANTENASOA, A. Geochemistry of the Volcan de l’Androy basalt–rhyolite complex, Madagascar Cretaceous igneous province. **Journal of Petrology**, v. 49, n. 6, p. 1069-1096. 2008.

MARENCO, P. J.; CORSETTI, F. A.; HAMMOND, D. E.; KAUFMAN, A. J.; BOTTJER, D. J. Oxidation of pyrite during extraction of carbonate associated sulfate. **Chemical Geology**, v. 247, n. 2, p.124-132, 2008.

MEHRA, O. P., M. L. JACKSON. "Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate." In *National conference on clays and clays minerals*, vol. 7, p. 317-327. 1958.

MENON, K. K. Origin of Diagenetic Pyrite in the Quilon Limestone, Kerala, India. **Nature**, 213, p. 1219-1220, 1967.

MILLER, R.W.; DONAHUE, R. L. **Soils: an introduction to soils and plant growth**. Englewood Cliffs, Printice Hall, 1990. 768p.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Mechanistic soil–landscape modelling as an approach to developing pedogenetic classifications. **Geoderma**, v. 133, n. 1, p. 138-149, 2006.

MINCRYST- **Mineral Crystal Structure Database. Crystallographic and Crystallochemical Database for Minerals and their Structural Analogues**. Disponível em: <<http://database.iem.ac.ru/mincryst/index.php>>. Acesso em: 10 out. 2015.

MUHS, D. R., BUSH, C. A., STEWART, K. C. Geochemical Evidence of Saharan Dust Parent Material for Soils Developed on Quaternary Limestones of Caribbean and Western Atlantic Islands. **Quaternary research**, v 33, p. 157-177, 1990.

PAIVA, A. Q. **Solos carbonático-fostáticos do platô de Irecê, BA: Gênese, mineralogia e geoquímica**. 2010. 200p. Tese (doutorado em solos e nutrição de plantas), Departamento de solos / Universidade Federal de viçosa – UFV, Viçosa.

PHILLIPS, J. D. Progressive and regressive pedogenesis and complex soil evolution. **Quaternary Research**, v 40, n. 2, p. 169 – 176, 1993.

RESENDE, M.; CURI, N.; DE REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F.; KER, J. C. **Pedologia: Base para Distinção de Ambientes**. 6ª Ed. UFLA. 2014. 377p.

RETALLACK, G. J. Soils of the past: an introduction to paleopedology. **John Wiley & Sons**, 2012, 520p.

RUNGE, E. C. A., Soil development sequences and energy models. **Soil Sci.** 115, p. 183–193. 1973.

RYAN, I.; CURTIN, D. & CHEEMA, M.A. Significance of iron oxides and calcium carbonate particle size in phosphate sorption by calcareous soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 49:74-76, 1985.

SIMÓN, M.; MARTÍN, F.; GARCÍA, I.; BOUZA, P.; DORRONSORO, C.; AGUILAR, J. Interaction of limestone grains and acidic solutions from the oxidation of pyrite tailings. **Environmental Pollution**, v. 135, n. 1, p. 65–72, 2005.

SIMONSON, R. W. Outline of a generalized theory of soil genesis. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** 23, 152–156. 1959.

SOMMER, M.; GERKE, H. H.; DEUMLICH, D. Modelling soil landscape genesis — a “time split” approach for hummocky agricultural landscapes. **Geoderma**, v. 145, n. 3, p. 480-493, 2008.

SUK, D.; PEACOR, D. R.; VAN DER VOO, R. Replacement of pyrite framboids by magnetite in limestone and implications for palaeomagnetism. **Nature**, v. 345, n. 6276, p. 611-613, 1990.

TAN, K. H. Principles of soil chemistry. **CRC Press**, 2010. 390p.

TRUFFI, S. A.; CLEMENTE, C. A. Alteração de plagioclásios dos riodacitos da formação serra geral (jksg) da região de piraju – sp. **Scientia Agricola**, v.59, n.2, p.383-388, abr./jun. 2002.

VAN BREEMEN, N.; BUURMAN, P. Soil formation. **Springer Science & Business Media**, 2002, p. 419.

VELDE, P.; BARRÉ, P. Soils, Plants and Clay Minerals. **Springer-Verlag Berlin Heidelberg**, 2010, p. 349.

CAPÍTULO III

DINÂMICA DE USO E COBERTURA DA TERRA NO HAITI OCIDENTAL

RESUMO

A necessidade de monitorar e avaliar os impactos negativos decorrentes de mudanças no uso e cobertura do solo vem sendo cada vez mais uma questão fundamental que vai além da simples descrição dos acontecimentos. O estabelecimento de diretrizes que norteiem a formulação de políticas públicas voltadas para o planejamento e a recuperação ambiental, pode fundar-se no estudo pormenorizado das mudanças no uso do solo realizado no espaço e no tempo. Objetivou-se com o presente trabalho, estudar a mudança no uso e cobertura do solo no Oeste do Haiti por meio de uma abordagem multi-temporal, que abrange os períodos 1986, 2000 e 2014. Pelo uso das técnicas de sensoriamento remoto associadas às de geoprocessamento, foram processadas as respectivas cenas do Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ e Landsat 8 OLI. Após correções atmosférica

e topográfica de cada cena, as oito classes de uso e cobertura do solo foram separadas por meio da técnica de classificação supervisionada empregando cinco (5) classificadores: Máxima verossimilhança (Maxver), Regressão Logística (RLG), Redes Neurais Artificiais (RNA), Random Forest (RF) e Support Vector Machine (SVM). O desempenho dos algoritmos foi avaliado por meio do índice Kappa. As cenas classificadas de 2014 foram validadas por uma amostra de 180 pontos coletados posteriormente no campo. O teste Z foi utilizado na comparação estatística da igualdade dos índices Kappa, sendo que a detecção de mudança foi realizada pela comparação pixel a pixel dos melhores mapas temáticos gerados. Todos classificadores apresentaram índice Kappa com valor igual ou maior a 0,90, podendo ser classificados como excelentes. Os classificadores RF e RLG foram os que mantiveram maior desempenho para as três datas consideradas, com destaque no classificador RF que acusou valores de índice Kappa de 0,95, 0,94 e 0,92 para 1986, 2000 e 2014, respectivamente. O bom desempenho do classificador RF foi revelado pela diferença estatisticamente significativa com quase todos outros classificadores ao nível de confiança de 5%. Contudo, na validação externa do mapa final de 2014, foi verificada diferença estatisticamente significativa entre o RF e os classificadores Maxver, RLG e SVM. Desta forma, mantiveram-se os mapas derivados pelo classificador RF para as três datas. Para o período 1986 a 2000, notaram-se maiores mudanças nas classes de área urbana (146,5%), solo exposto (90,1%), vegetação rasteira ou de savana (-55,6%) e vegetação de alto porte (-22,8%). Quanto ao período 2000 a 2014, foi verificada fortes mudanças nas classes vegetação de alto porte (-110,7%), solo exposto (-80,3%), agricultura (79,1%) e vegetação rasteira (63,1%). Foi ainda observado o crescente aumento das áreas ocupadas pela classe água, passando de 5,1% no primeiro período a 16% no segundo período. As transformações mais rápidas que ocorreram no primeiro período relacionam-se com a classe área urbana (10,5%) e solo exposto (6,4%) por ano; já que no segundo período, essas transformações dizem respeito às classes vegetação de alto porte (-7,9%), solo exposto (-5,7%) e agricultura (5,6%). As transformações detectadas no uso e cobertura do solo durante esses 28 anos têm sido bastante aceleradas, e os fatores políticos e econômicos têm sido apontados como principais determinantes no processo de deterioração ambiental na região.

Palavras-chaves: Sensoriamento Remoto; Classificação automatizada; Classificadores.

LAND USE AND LAND COVER DYNAMIC IN WESTERN HAITI

ABSTRACT

The urgent need to monitor and evaluate the negative impacts resulting from changes in land use and land cover has been increasingly a key issue that goes beyond the simple description of events. The establishment of guidelines to guide public policies for planning and environmental recovery can be based on detailed studies of changes in land use carried out in space and time. The objective of the present work was to study the changes in the use and land cover in the west of Haiti through a multi-temporal approach covering the periods 1986, 2000 and 2014. Through the use of remote sensing techniques associated with geoprocessing, the scenes from the Landsat 5 TM have been processed Landsat 7 ETM + and Landsat 8 OLI. After atmospheric and topographic corrections of each scene, the eight classes of land use and land cover were separated by supervised classification technique using five (5) classifiers: Maximum likelihood (Maxver), Logistic Regression (RLG), Artificial Neural Networks (RNA), Random Forest (RF) and Support Vector Machine (SVM). The performance of the algorithms was evaluated through the error matrix, specifically the Kappa index. The 2014 classified sites were validated by a sample of 180 points collected in the field subsequently. The Z test was used for statistical comparison of equality of Kappa indexes, and change detection was done by comparing pixel by pixel the best thematic maps generated. All classifiers showed Kappa index value equal to or greater than 0.90, and can be qualified as excellent. Classifiers RF and RLG maintained higher performance for the three dates considered, especially the RF classifier that showed Kappa index of 0.95, 0.94 and 0.92 for 1986, 2000 and 2014 respectively. The good performance of the classifier RF was showed by a statistically significant difference with almost all other classifiers at a confidence level of 5%. However, in the external validation of the 2014 final map, it was verified a statistically significant difference among RF and the classifiers Maxver, RLG and SVM. Thus, maps derived by the RF classifier for three dates were retained for analyses. The period 1986-2000, it was noted the most striking changes in urban area (146.5%), bare soil (90.1%), scrub or savanna (-55.6%) and tree vegetation (-22.8). For the period 2000-2014, it was observed strong changes in the tree vegetation classes (-110.7%), bare soil (-80.3%), agriculture (79.1%) and low vegetation (63.1%). It was also noted the increasing number of areas occupied by water class from 5.1% in the first period to 16% in the second period. The most rapid changes that occurred in the first period related to the urban class (10.5%) and bare

soil (6.4%) per year. In the second period, these changes related to the classes; tree vegetation (-7.9%), bare soil (-5.7%) and agriculture (5.6%). The changes detected in the land use and land cover during these 28 years have been greatly accelerated, and political and economic factors have been identified as the main determinants in increasing the environmental deterioration process in the region.

Keywords: Remote Sensing; Automated classification; Classifiers.

1 INTRODUÇÃO

Atividades antrópicas pautadas no uso e na mudança da cobertura do solo têm impactado negativamente o planeta em diversas escalas e regiões. Tais perturbações, que são consequências principalmente das alterações de áreas nativas para diversos fins (THOMAS e TRENBERTH, 2003), têm acelerado processos de degradação nos diferentes componentes do sistema Terra, com implicações ecológicas e ambientais dramáticas. O conhecimento sobre a dinâmica do uso e cobertura do solo é importante para diversas atividades de manejo e de planejamento, e também essencial para modelar e entender os processos que têm ocorrido no planeta como um sistema integrado (LILLISAND e KIEFER, 1999).

Esforços no sentido de superar os problemas ocasionados por essas alterações, na maioria dos casos, procuram unificar uma abordagem holística com tecnologia abrangente, auxiliada por instrumentos eficazes e modernos de monitoramento sistemático. Destaca-se assim o sensoriamento remoto que, integrado ao sistema de informação geográfica (SIG), vem se constituindo como uma ferramenta capaz de favorecer a geração de produtos necessários à análise e ao monitoramento ambiental e com isso alcançar o uso adequado do solo.

Os conceitos uso e cobertura do solo, embora utilizados às vezes erroneamente como sinônimos, se diferem fundamentalmente. Segundo Lillisand e Kiefer (1999) a cobertura do solo se refere aos tipos de feições presentes naturalmente na superfície da terra; enquanto o uso do solo diz respeito a uma série de atividades antrópicas ou funções econômicas associadas a uma determinada porção de terra. Os fatores que desencadeiam mudanças no uso da terra são múltiplos, complexos e interligados, sendo que variam no espaço e no tempo em função das condições humanas e ambientais específicas (LAMBIN et al., 2003).

As possíveis forças humanas induzindo mudanças no uso da terra podem ser agrupadas em cinco categorias: demografia, nível de riqueza, tecnologia, instituições políticas e econômicas, atitudes culturais e valores (MEYER e TURNER, 1992). Segundo Worm et al. (2006) as mudanças operadas nos ecossistemas têm levado a substanciais benefícios em termos de desenvolvimento econômico e segurança alimentar, porém isto se deve a um custo cada vez maior tanto para os ecossistemas quanto para as futuras gerações.

A mudança no uso e na cobertura do solo tem sido objeto de intensos estudos nas últimas décadas (MEYER e TURNER, 1994; TURNER, et al., 1990a), os quais aplicaram principalmente

técnicas de sensoriamento remoto como ferramenta devido a sua eficiência, rapidez e baixo custo. Desta forma, dados de sensoriamento remoto co-registrados e multitemporais permitem ao mesmo tempo detectar as mudanças e descrever a natureza dessas mudanças. Em outras palavras, a premissa básica na utilização de dados de sensoriamento remoto para detectar mudança é que tal processo possa ajudar a identificar mudança que seja atípica de variação normal entre duas ou três datas distintas.

Estudos para a detecção de mudanças na cobertura do solo habitualmente têm usado três níveis de abordagem: a) análises de imagem de sensoriamento remoto ou outras técnicas geoespaciais para caracterizar a taxa de mudança e padrão de mudança na cobertura do solo; b) condução de extensivos estudos de caso para identificar a dinâmica espaço-temporal da cobertura do solo em determinado local e as forças atuantes neste processo; c) desenvolver simulações de mudanças na cobertura da terra para modelar possíveis cenários futuros (VELDKAMP e LAMBIN, 2001; DEFRIES et al., 2004).

O uso do sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento e suporte à gestão ambiental é imprescindível e requer um tratamento diferenciado. Tal tratamento se impõe sobretudo, quando o trabalho envolve comparação de imagens multitemporais na faixa do visível e infravermelho próximo, ou formação de mosaicos de imagens, que são usualmente necessários alguns tipos de correção radiométrica, como a correção da elevação do sol e a correção da distância da terra ao sol. Após esses procedimentos as imagens são normalizadas como se tivessem o sol no zênite nas diferentes datas e em relação às mudanças sazonais de distância entre a terra e o sol (LILLESAND e KIEFER, 1999).

1.1 Uso e cobertura do solo no Haiti

A palavra Haiti significa “terra alta ou terra montanhosa” na linguagem dos Tainos⁴ (BELLEGARDE, 1955 *apud* MORAL, 1961), o que representa adequadamente a fisiografia complexa daquele país, a qual sofre forte influência de movimentos tectônicos. Este condicionante associado à falta de planejamento na ocupação de suas terras, com constantes ações de desmatamento e expansão da fronteira agrícola desde a época colonial (século XVI), têm

⁴Indígenas pré-colombianos que habitavam a ilha.

desencadeado alterações nos ecossistemas locais, além de profundas mudanças na paisagem, devido principalmente à atuação de intenso processo erosivo nas encostas íngremes, ocasionando o assoreamento contínuo dos cursos dos rios.

O Haiti tem sofrido graves problemas de degradação dos seus recursos naturais e significativas mudanças na cobertura da sua terra (DOLISCA et al., 2008). Conforme Stevenson (1989), o país tem testemunhado um dos mais agudos episódios de desmatamento no mundo.

A alta taxa de crescimento demográfico tem contribuído para o aumento da pressão fundiária e conseqüentemente à expansão da fronteira agrícola do país além da redução da capacidade de resiliência das terras. Além disso, boa parte das áreas agrícolas mais nobres tem sido convertida em áreas urbanizadas.

O Departamento Oeste, área de investigação do presente estudo e onde se localiza a capital, é uma das regiões do país com maior impacto ambiental, particularmente no uso do solo. Este fato se deve ao crescimento populacional em consequência do êxodo rural, sendo provocado por falta de oportunidades e de perspectivas dos pequenos agricultores. Assim sendo, com o propósito de detectar a amplitude dessas mudanças, optou-se por empregar as técnicas do sensoriamento remoto que, há décadas, têm se mostrado eficaz em subsidiar informações relevantes para monitorar os ambientes terrestres.

Neste contexto, objetivou-se com o presente estudo mapear o uso e a cobertura da terra no Oeste do Haiti, por meio das técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento com base numa abordagem multi-temporal. Tal abordagem se distingue de outros estudos já conduzidos no país por abarcar vários classificadores de imagem, além de procurar explicar as taxas de mudanças que ocorreram na área num período relativamente longo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção e pré-processamento de imagens de satélite

Neste trabalho utilizou-se imagens do Landsat 5 TM (L5), Landsat 7 ETM+ (L7) e Landsat 8 OLI (L8) de órbita em 1986, 2000 e 2013, respectivamente, todas com qualidade 9 conforme USGS. A Tabela 1 resume as características específicas das seis (6) cenas usadas.

Tabela 1. Características das imagens

ID	Sensor	Data aq.	Órbita/Ponto	ELEV/AZ(°)	Nuvens (%)
1	LT5 TM	06/12/1986	008/047	38,02/141,19	10,0
2	LT5 TM	30/01/1987	009/047	38,26/132,60	0,0
3	LT7 ETM+	03/01/2000	008/047	40,71/146,48	10,0
4	LT7 ETM+	10/01/2000	009/047	40,99/145,07	1,0
5	LT8 OLI	17/11/2014	008/047	47,33/ 151,06	1,5
6	LT8 OLI	24/11/2014	009/047	45,78/150,63	1,2

Data aq.: data de aquisição; **ELEV/AZ:** ângulo de elevação solar / ângulo azimutal.

2.2 Correção atmosférica das imagens

Segundo Liang et al., (2001), para extrair informação quantitativa acurada de imagem Landsat, a realização da correção atmosférica apresenta-se como sendo uma etapa importante. Uma vez adquiridas, as imagens foram pré-processadas de forma diferenciada com o propósito de aperfeiçoar a sua qualidade, sendo necessária para uma melhor identificação dos alvos a serem classificados. As imagens foram registradas no mesmo sistema de coordenadas para serem posteriormente submetidas às correções. Assim sendo, para reduzir a interferência atmosférica nas imagens, o método DOS4 de correção atmosférica absoluta, proposto por Song et al. (2001) foi empregado com as imagens L5 e L7. Os coeficientes de *Ganho* e *Offset* foram extraídos no metadado das respectivas imagens; enquanto que os valores do parâmetro ESUN são encontrados em Chander et al. (2009). Neste processo a banda 1 foi utilizada para gerar os coeficientes SHV

(*Start Haze Value*), necessários na correção das outras bandas. O SHV foi determinado a partir do método DOS.

A fórmula geral de cálculo é apresentada a seguir:

$$\rho_{AS} = \frac{\pi d^2 (L - L_{haze})}{T_v (E_{sun} \cos \theta_z T_z + E_{down})}; \quad (1) \text{ onde,}$$

d: distância Terra-Sol; E_{sun} : constante exo-atmosférica ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$) em função de cada banda;

L: radiância; θ_z : ângulo azimutal ($\theta_z = 90^\circ - \theta_s$) com θ_s : ângulo de elevação solar.

$$L_{haze} = SHV_{rad} - L_{1\%}; \quad (2)$$

$$L_{1\%} = 0,01 \frac{E_{sun} \cos(\theta_z)}{\pi d^2} \quad (3)$$

T_v e T_z podem ser determinados da seguinte forma:

$$T_v = e^{-\tau_r / \cos(\theta_v)}; T_z = e^{-\tau_r / \cos(\theta_z)}; \text{ com } \tau_r = 0.008569 * \lambda (1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4})$$

Determinou-se também os valores corretos para L_{haze} , espalhamento atmosférico ($W.m^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$), T_z transmitância Sol-superfície, T_v transmitância superfície-sensor, E_{down} irradiância difusa ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$) por processo iterativo.

No que diz respeito às imagens do L8, foi realizado apenas a normalização para reflectância corrigida pelo ângulo de elevação solar, utilizando o método proposto em USGS (2013). O pacote *Landsat* desenvolvido por Goslee et al (2011) do aplicativo R CRAN (Comprehensive Comprehensive R Archive Network) foi utilizado para a correção atmosférica.

2.3 Correção topográfica das imagens

Por se tratar de uma área com grande variação altitudinal, foi necessário realizar a correção topográfica das imagens uma vez que o efeito de sombreamento topográfico normalmente dificulta a extração de informações, limitando muitas vezes a análise multitemporal de fenômenos nestes

locais (LIMA e RIBEIRO, 2014). Desta forma, empregou-se o método proposto por Minnaert (Minnaert com declividade). Foi também escolhido o método não lambertiano, o qual assume a dependência da reflectância do ângulo de observação. O modelo proposto por Minnaert é:

$\rho_{MM} = \rho_L \left(\frac{\cos\beta_T}{\cos\beta} \right)^k$; onde ρ_{MM} é a reflectância de uma área horizontal conforme o método

modificado de Minnaert; $\cos\beta$ é o cosseno do ângulo de iluminação solar determinado pela seguinte fórmula:

$IL = \cos\beta = \cos\theta_s \cos\eta_i + \sin\theta_s \sin\eta_i \cos(\phi_a - \phi_o)$, com IL varia de -1 a 1.; θ_s ângulo zenital; η_i , ângulo de declividade; θ_z , ângulo zenital; θ_o , aspecto (face de exposição).

A declividade e o aspecto são derivados por meio do MDE (modelo digital de elevação).

β_T é um limiar que depende de algumas regras empíricas de tal maneira que:

- $\beta_T = \theta_s + 20^\circ$, para 20° acima do ângulo zenital, se $\theta_s < 45^\circ$
- se $45^\circ \leq \theta_s \leq 55^\circ + 20^\circ$, então $\beta_T = \theta_s + 15^\circ$;
- se $\theta_s > 55^\circ$, então $\beta_T = \theta_s + 10^\circ$.

K é a constante de Minnaert. Se K tem valor de 1, o comportamento lambertiano é assumido.

Segundo Hantson e Chuvieco (2011), a constante de Minnaert depende da cobertura do solo. Assim sendo, para agrupar áreas com características espectrais similares, foi empregado o NDVI considerando um limiar de 0,4 conforme proposto pelos autores.

A correção topográfica foi realizada por meio do uso da ferramenta (*Toolbox*) de normalização topográfica desenvolvida por Lima e Ribeiro (2014) e compatível com ArcGIS 10.1. Após as correções, foi necessário realizar o mosaico das diferentes cenas para cobrir a área antes de iniciar a classificação.

2.4 Definição das classes de uso e cobertura do solo

As classes de uso e cobertura/ocupação do solo mais vigentes na área estudada foram:

- Água: envolve principalmente os corpos d'água, ou seja os diferentes lagos presentes na área;
- Solo exposto: compreende as áreas naturalmente descobertas ou solos temporariamente nus em decorrência de preparo para o plantio. Envolve também leito dos rios e canais de drenagem;
- Área urbana: abrange as principais cidades e áreas periurbanas;
- Agricultura: abarca as áreas com práticas agrícolas intensivas sobre tudo nas áreas planas;
- Vegetação rasteira: inclui áreas com vegetação de porte baixo e vegetação herbácea ou de savana. Essas áreas estão às vezes misturadas com práticas agrícolas devido à alta pressão fundiária;
- Vegetação de porte alto: envolve vegetação arbórea com fragmento de florestas predominantemente secundárias, floresta de pinus e áreas com práticas agroflorestais.
- Nuvem: são áreas cobertas por nuvem particularmente na parte montanhosa;
- Sombra: áreas cobertas por sombra pela presença de nuvem ou ainda pelo sombreamento por diferença de iluminação em relevo montanhoso, ainda persistente mesmo com correção topográfica.

2.5 Classificação das imagens

Posteriormente às correções atmosféricas e topográficas, o processo de extração de informação sobre o uso e cobertura do solo foi efetuado por meio da classificação supervisionada das imagens, aplicando os seguintes algoritmos: *Random Forest* (RF), Regressão logística (RLG), Máxima verossimilhança (Maxver), Redes Neurais Artificiais (RNA) e *Support Vector Machine* (SVM). Em cada data, foram amostrados aproximadamente 300 polígonos com uma média de 10 pixels por polígono, perfazendo 3000 pontos de observação. Processaram-se as cenas do L5, L7 e L8, usando seis bandas como variáveis preditoras, são elas: as três bandas do visível, o infravermelho próximo e dois infravermelhos médios, sendo que no caso do L8 a primeira banda (b1) não foi utilizada. Também foi utilizado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

NDVI $\{(NIR - RED)/(NIR+RED)\}$ (Rouse et al., 1973), como variável explicativa. Nesse processo, 50% das amostras foram utilizadas no treinamento dos classificadores, enquanto que a outra metade foi usada na validação.

O processamento foi feito com o uso do aplicativo R CRAN (Development Core Team, 2014), por meio do pacote de classificação supervisionada “*rasclass 0.2.1*” desenvolvido por Wiesmann (2011). A avaliação do desempenho dos classificadores foi realizada pela interpretação visual dos mapas e por meio da matriz do erro ou matriz de confusão conforme especificado em Janssen e van der Wel (1994) e o coeficiente Kappa proposto por Cohen (1960) e derivado da matriz de confusão é o parâmetro de qualidade mais usado.

O índice Kappa é calculado conforme a seguir:

$$K = \frac{\text{Pr}(a) - \text{Pr}(e)}{1 - \text{Pr}(e)}, \text{ em que } \text{Pr}(a): \text{ concordância relativa ou exatidão global; } \text{Pr}(e):$$

probabilidade hipotética de concordância; e K: índice Kappa.

- A concordância relativa é calculada como a seguir:

$$\text{Pr}(a) = \frac{\sum_{i=1}^m n_{ii}}{N}, \text{ onde } n_{ii}: \text{ os valores na diagonal principal; } m: \text{ o número de classes}$$

envolvidas na matriz; e N: o número de observação.

- A probabilidade hipotética de concordância é calculada da seguinte forma:

$$\text{Pr}(e) = \frac{\sum_{i=1}^m n_{i+} + n_{+i}}{N^2}, \text{ } n_{i+}: \text{ proporção marginal da linha; } n_{+i}: \text{ proporção marginal da coluna;}$$

A estatística Kappa foi proposta por Landis e Koch (1977) e categorizada da seguinte forma: 0 – 0,2: ruim; 0,2 – 0,4: razoável; 0,4 – 0,6: boa; 0,6 – 0,8: muito boa; e 0,8 – 1,0: excelente.

Para avaliar a igualdade dos valores do estimador Kappa gerado pelos classificadores, foi realizado o teste Z ao nível de significância de 5%. Esse teste determina se dois ou mais valores independentes de Kappa e conseqüentemente duas ou mais matrizes de confusão são significativamente diferentes. Por isso, é necessário determinar a variância do Kappa:

$$\text{var}(\widehat{\mathbf{k}}) = \frac{1}{n} \left\{ \frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2 - \theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4 - 4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right\}; \text{ em que:}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_{ii}$$

$$\theta_2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}$$

$$\theta_3 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^k n_{ii} (n_{i+} + n_{+i})$$

$$\theta_4 = \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k n_{ij} (n_{j+} + n_{+i})^2$$

2.6 Validação dos resultados da classificação

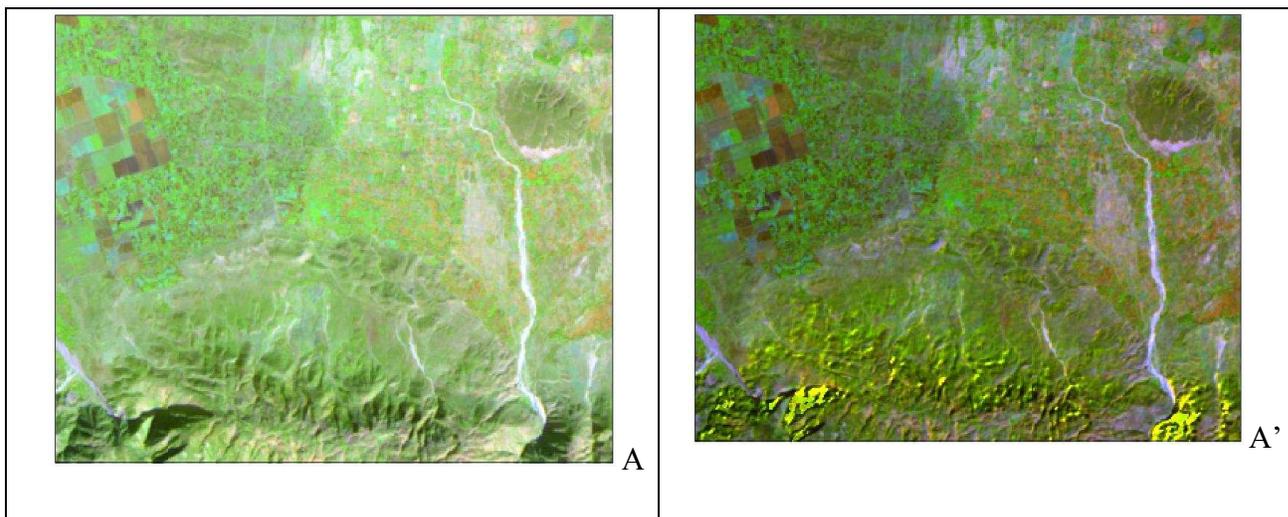
A validação da acurácia da classificação consiste normalmente em comparar a imagem classificada com dados de campo assumidos verdadeiros. Nesse contexto, a validação externa foi realizada por meio de uma amostra independente de 170 pontos coletados na área.

As mudanças que ocorreram durante os períodos considerados foram detectadas por meio da comparação pixel a pixel pós-classificação entre duas datas conforme proposto em Singh (1989).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comparação entre as imagens bruta e corrigida

Observa-se na Figura 1 que uma vez realizada as correções atmosférica e topográfica, as imagens normalmente apresentam certo grau de achatamento e com redução das áreas sombreadas, conforme constatado por Goslee (2011). No entanto, a correção topográfica, embora reduza o efeito causado por diferença na iluminação, gera alguns artefatos e sobrecorreção na imagem. Isso foi também verificado por Richer et al (2009), quando o valor do termo $\cos\beta$ se aproxima de zero, ocorre ao mesmo tempo alto valor de refletância nas áreas íngremes sombreadas e a área correspondente fica sobrecorrigida. Notou-se também que essa sobrecorreção foi mais evidente nas imagens L5 e L7; já que na imagem L8 a presença desses artefatos é menos pronunciada, talvez pela qualidade da imagem L8.



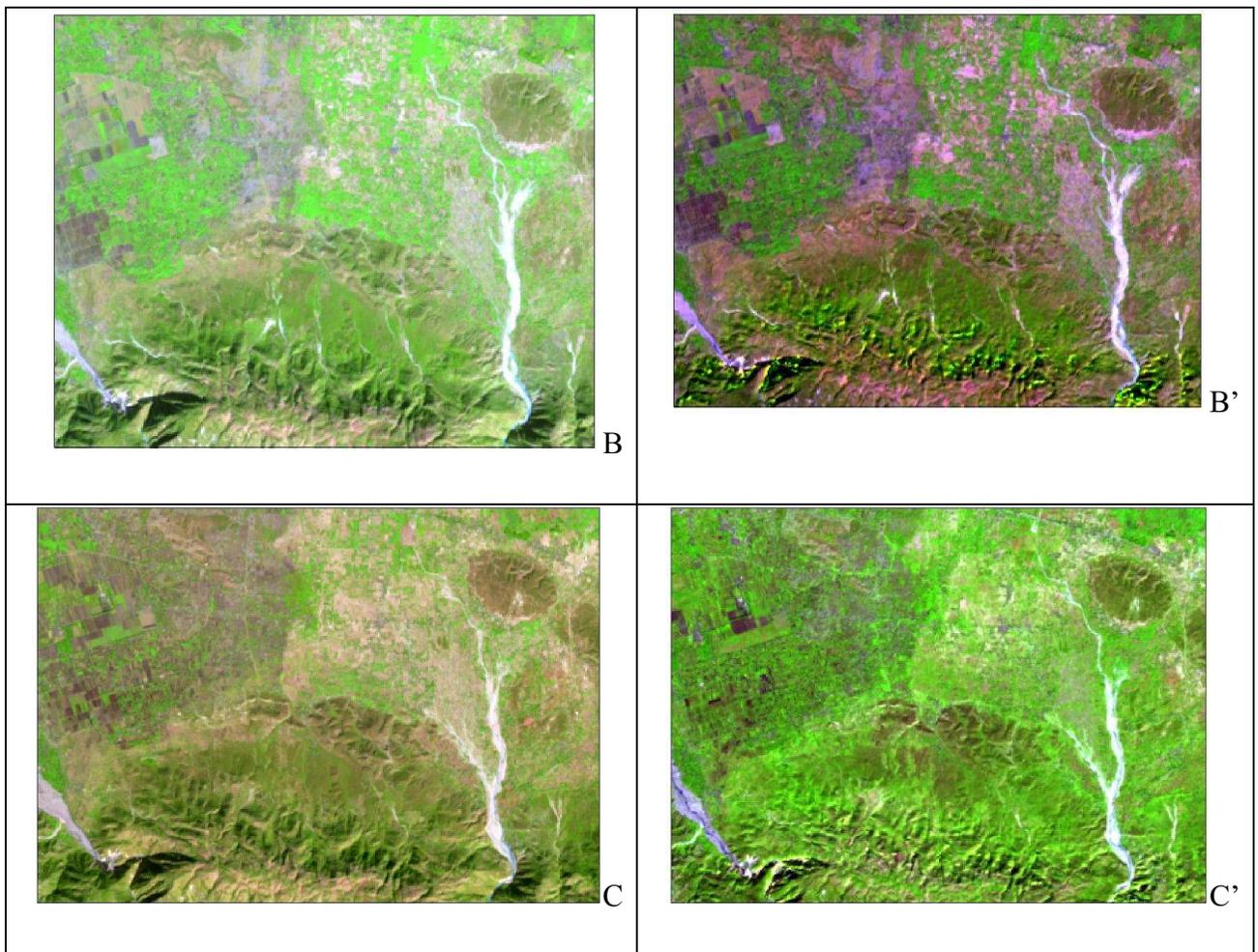


Figura 1. Comparação entre a imagem bruta (esquerda) e imagem corrigida atmosférica e topograficamente (direita).

A, A'=Landsat 5 TM, 1986; B, B' = Landsat 7 ETM+, 2000; C, C'= Landsat 8 OLI, 2014.

Da interpretação visual dos gráficos (Figura 2) a seguir, percebe-se certo grau de suavização nos valores médios das classes de uso e de cobertura do solo, sendo o comportamento espectral parecido para as classes de uso nas bandas do visível. Foi ainda constatado que as três últimas bandas (4 a 6) têm potencial quanto à discriminação (separação) das classes de uso e cobertura do solo, com destaque para a banda do infra-vermelho próximo.

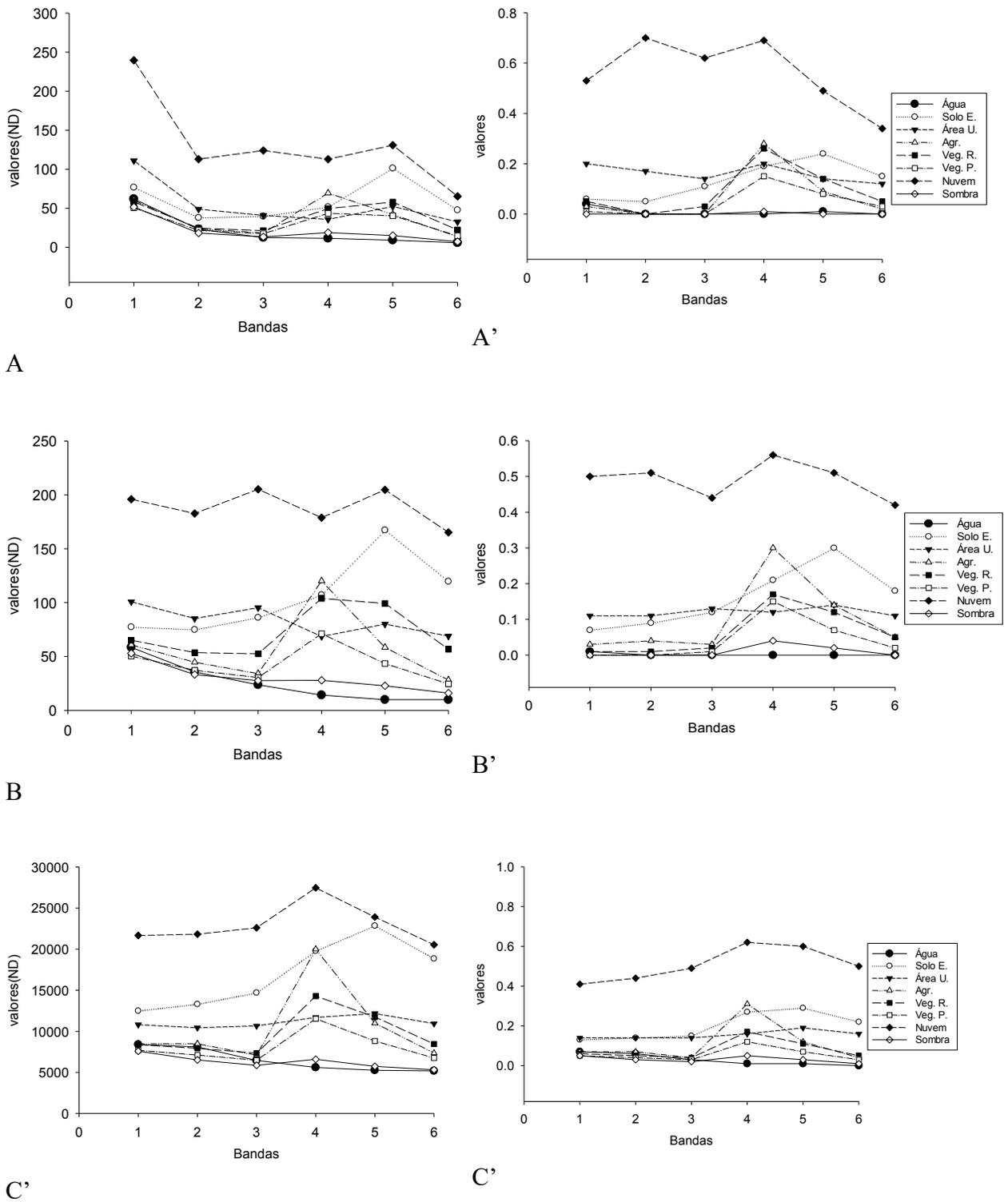


Figura 2. Comparação do comportamento espectral das classes entre a imagem bruta (esquerda) e a imagem corrigida para refletância (direita). — A, A'=Landsat 5 TM, 1986; B, B' = Landsat 7 ETM+, 2000; C, C'= Landsat 8 OLI, 2014.

3.2 Algoritmos de classificação das imagens e acurácia

Conforme mencionado no item 2.2.4, foi verificado a partir da matriz de confusão que o maior confundimento dos algoritmos acontece com as classes Área urbana e solo exposto, sobretudo na primeira data. Houve também confundimento entre as classes agricultura, vegetação rasteira e vegetação de porte alto. Isso se deve pela diversidade de cultivo em diferentes fases fenológicas apresentando assim diferentes padrões de refletância.

Por outro lado, todos os classificadores apresentaram índice Kappa com valor igual ou maior a 0,90, podendo ser qualificados como excelentes segundo a classificação de Landis e Koch (1977). Os classificadores RF e RLG foram os que mantiveram maior desempenho para as três datas consideradas, com destaque no classificador RF que acusou valores de índice Kappa de 0,95, 0,94 e 0,92 para 1986, 2000 e 2014 respectivamente. Embora o RF seja um classificador relativamente recente (Breiman, 2001), o seu melhor desempenho em relação a outros algoritmos convencionais já foi verificado em vários estudos (GISLASON, BENEDIKTSSON, e SVEINSSON, 2006; BENEDIKTSSON, CHAN, PAELINCKX, 2008; SESNIE et al. 2010; ZHU et al. 2012; ROSA e BREIMAN, 2013). Na comparação do classificador Maxver com dois algoritmos de redes neurais artificiais, *Multilayer perceptron* (MLP) e *Learning vector quantization* (LVQ), Erbek et al., (2012) observaram que o MLP apresentou melhor desempenho que os outros, com acurácia global de 93,0.

Na comparação dos valores do índice Kappa apresentada na Tabela 2, observou-se pelo resultado do teste Z que o algoritmo *Random Forest* se destaca por apresentar valores de índice Kappa estatisticamente diferentes dos outros classificadores ao nível de confiança de 5%, excepto para o classificador RLG.

Tabela 2. Valores do Kappa para os (5) cinco classificadores e matriz do teste Z dos Kappas ao nível de significância de 0,95.

		Maxver	RLG	RN	RF	SVM
1986	K₁	0,92	0,94	0,90	0,95	0,91
	V₁	0,068	0,055	0,082	0,046	0,077
2000	K₂	0,92	0,92	0,90	0,94	0,91
	V₂	0,071	0,066	0,088	0,058	0,078
2014	K₃	0,90	0,90	0,90	0,92	0,90
	V₃	0,093	0,090	0,096	0,082	0,096
Maxver	1	0,00	1,80	1,63	2,81*	0,83
	2	0,00	0,00	1,59	1,76	0,82
	3	0,00	0,00	0,00	1,51	0,00
RLG	1		0,00	3,81*	0,95	2,86*
	2		0,00	1,74	1,74	0,87
	3		0,00	0,00	0,00	1,49
RN	1			0,00	3,90*	0,78
	2			0,00	3,01*	0,75*
	3			0,00	1,44	0,00
RF	1				0,00	4,17*
	2				0,00	2,78*
	3				0,00	1,56

K₁, K₂, K₃: Kappa para 1986, 2000, 2014; (V₁, V₂, V₃)=Variância x 1000; 1, 2, 3 = 1986, 2000, 2014.

Maxver: Máxima verossimilhança; RLG: Regressão logística; RN: Redes neurais artificiais;

RF: Random Forest; SVM: Support Vector Machine. *diferença estatisticamente significativa ao nível de 5%.

Com base no índice Kappa e no teste Z, considerou-se o classificador RF no mapeamento do uso e cobertura do solo para as três datas. Assim sendo, as Figuras 3, 4, 5 mostram a distribuição espacial das oito classes de uso mapeadas. Uma mera observação dos mapas permite constatar o aumento excessivo das áreas de solo exposto assim como a forte expansão das áreas urbanas de 1986 a 2014. Também constatou-se a forte diminuição das áreas cobertas por vegetação de alto porte pelo mesmo período, resultante do desmatamento descontrolado para atender a demanda do mercado de carvão, lenha e de madeira, uma vez que o setor madeireiro representa 9% do PIB do país (CEPALC, 2005).

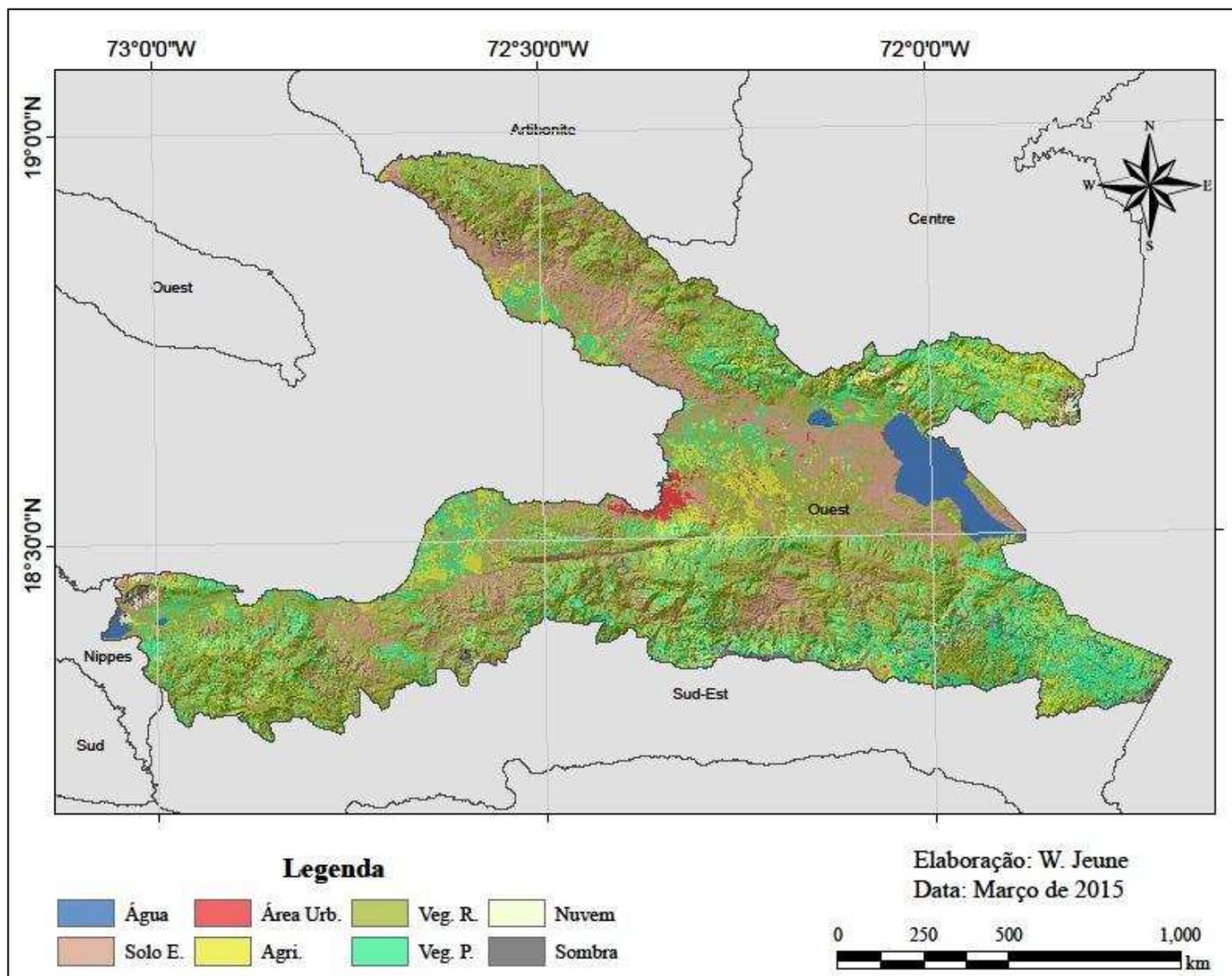


Figura 3. Classes de uso e cobertura do solo para o ano 1986.

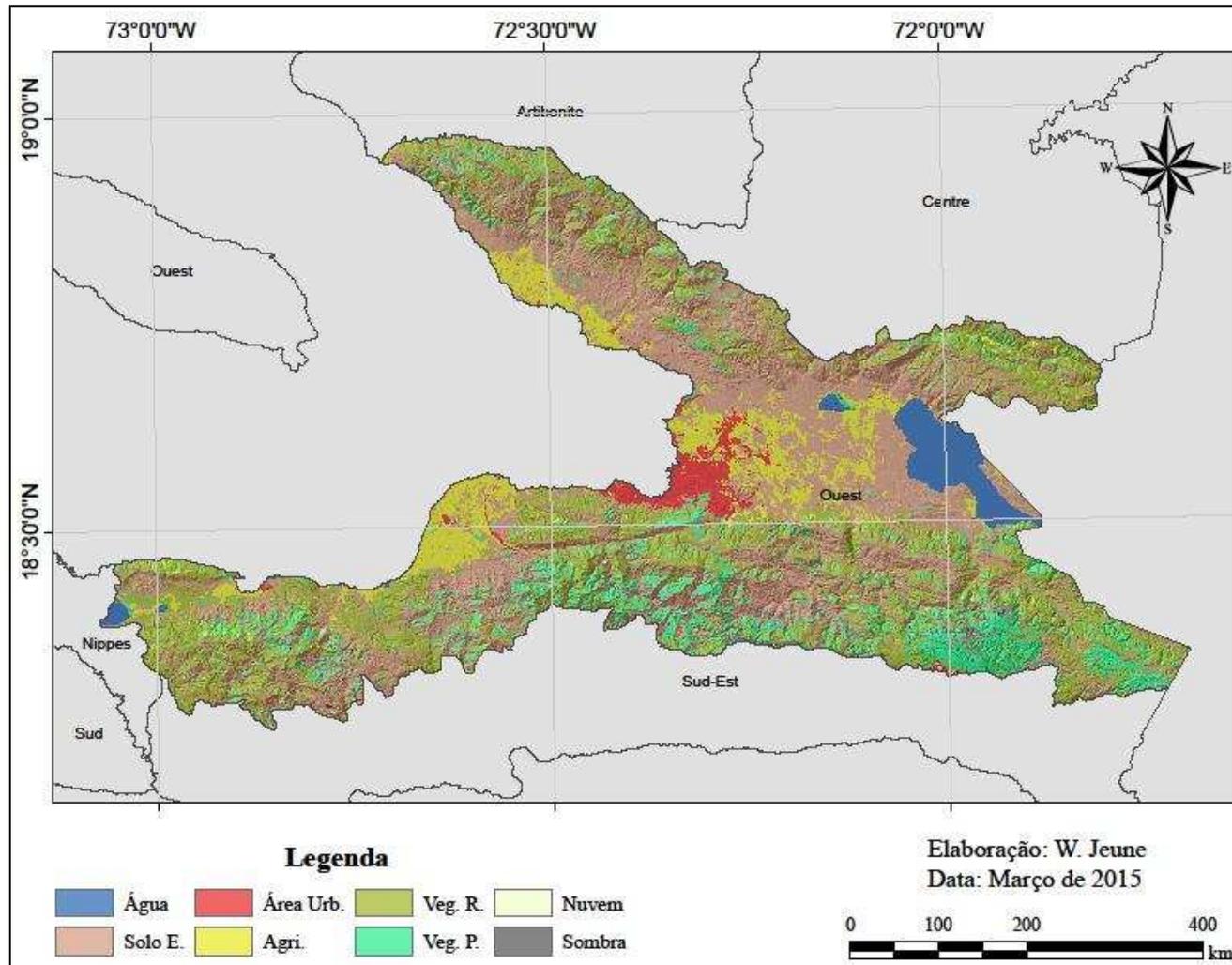


Figura 4. Classes de uso e cobertura do solo para o ano 2000.

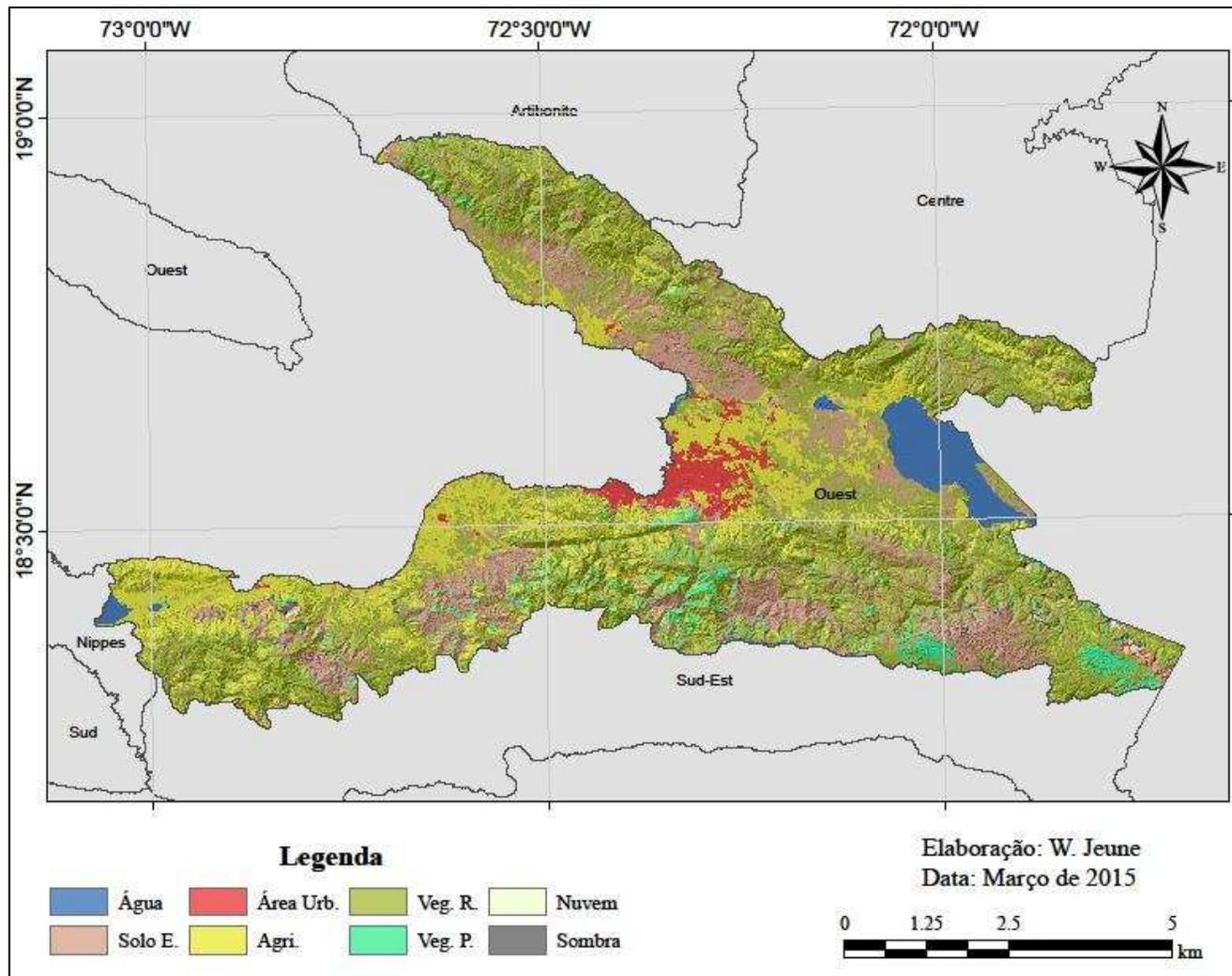


Figura 5. Classes de uso e cobertura do solo para o ano 2014.

3.3 Validação externa dos mapas 2014

Na validação do mapa final de 2014 a partir de uma amostra independente, os classificador RF mostrou melhor desempenho com índice Kappa de 0,75; enquanto que foram verificados valores do índice Kappa variando de 0,56 para SVM a 0,67 para o RN. Quanto aos classificadores Maxver e RLG o índice Kappa encontrado foi de 0,63

A estatística Z evidenciou diferença estatisticamente significativa ao nível de significância de 0,95 entre os índices Kappa dos classificadores Maxver/RF, RLG/RF e RF/SVM. (Tabela 3).

Tabela 3. Comparação dos índices Kappa pelo teste Z (imagem classificada 2014)

	Maxver	RLG	RN	RF	SVM
Exatidão global	0,70	0,70	0,73	0,79	0,64
Kappa	0,63	0,63	0,67	0,75	0,56
Variância	1,86	1,81	1,66	1,42	1,90
Matriz Z					
Maxver	0,00	0,00	0,69	2,25*	1,13
RLG		0,00	0,69	2,25*	1,14
RN			0,00	1,50	1,78
RF				0,00	3,08*

*Valor Z calculado significativo a 95%. – variância: valor da variância x 1000.

3.4 Dinâmica das mudanças no uso e cobertura do solo

As mudanças ocorridas na área durante os 28 anos são bastante marcantes. Na Tabela 4 e na Figura 6, nas quais está apresentada a dinâmica de uso e cobertura do solo para as três datas, é possível verificar que as classes de maior extensão em 1986 são as de vegetação rasteira/savana, vegetação de alto porte e solo exposto, que ocupam 39,3%, 20,6% e 20,2% respectivamente naquele ano. A situação ficou quase invertida para o ano 2000 com taxa de ocupação de 38,4% para solo exposto, 25,3% para vegetação rasteira, 16,8% para vegetação de alto porte.

Por outro lado, no ano 2014 depreende-se com uma realidade similar ou até pior que as duas precedentes datas. Assistiu-se a uma taxa de ocupação de 41,2% para a classe vegetação rasteira; a classe agricultura passou a ocupar 21,5% e a de solo exposto acusou um percentual de 21,3%. Durante este ano, foi verificada uma redução da classe de vegetação de alto porte a 8%. Por outro lado, houve aumento gradativo da classe água (áreas ocupadas pelos lagos) passando de 3% em 1986, 3,1% em 2000 e 3,6% em 2014.

Durante estas três datas ocorreu crescimento das áreas urbanas com percentagem de ocupação de 1%, 2,5% e 2,7%. Constatação semelhante foi feita por Vital (2008) que diagnosticou entre 1987 e 2004 na região de Pic Macaya⁵ o crescimento contínuo das áreas urbanas/periurbanas e das ocupadas por vegetação herbácea, e ao mesmo tempo a redução das áreas florestadas por pinheiros.

Ao analisar a dinâmica no uso e cobertura do solo, destacaram-se as classes solo exposto/preparo de plantio, área urbana e água, com percentagem respectiva de 146,5%, 90,1% e 5,1% entre 1986 e 2000. Observou-se uma taxa de diminuição para as classes vegetação rasteira/savana (-55,6%), vegetação de alto porte (-22,8%) e agricultura (-0,9%) no mesmo período.

No que tange ao período 2000 a 2014, taxa de mudança positiva foi registrada para as classes agricultura (79,1%), vegetação rasteira (63,1%), água (16,0%) e área urbana (9,4).

A extensão das áreas ocupadas pela classe água (lagos) está relacionada com diversas situações climáticas adversas tais como as furações e as enxurradas que atingiram a região durante os últimos 20 anos, destacando-se as três furações Ike, Gustav e Hanna que se abateram sobre a região em menos de duas semanas no ano de 2008. Também o assoreamento progressivo dos lagos devido à intensa erosão das encostas desnudadas que os rodeiam pode contribuir para o desbordo

⁵ Região localizada no sudoeste do país.

dos mesmos. É essencial assinalar que no século XVIII, foi construído o canal *Boucambrou* que drenava as águas dos lagos *Azuei* e *Trou Caiman* até o Golfo *de la Gonâve*, reduzindo assim as frequências de inundação das terras agrícolas na planície *Cul-de-Sac*, pelo rio *Blanche* (*Rivière Blanche*) e alguns canais ativos que desaguam no lago *Azuei* (CAUNA, 2003). Hoje, o completo assoreamento deste canal constitui um agravante para o transbordo dos lagos.

Por outro lado, foi verificada redução na taxa de mudança para as classes vegetação de alto porte (-110,7%) e solo exposto (-80,3%).

Por consequência a essas mudanças, despreendeu-se que as taxas anuais de mudança mais expressivas no primeiro período (1986-2000) correspondem às classes: área urbana (10,5%), solo exposto (6,4%), e vegetação rasteira (-4,0%). Já que no segundo período (2000-2014), a maior taxa anual de mudança diz respeito à vegetação de alto porte (-7,9%), solo exposto (-5,7%), agricultura (5,6%) e vegetação rasteira (4,5%).

Dados reportados pela FAO (2010) mostram o crescimento das áreas florestadas com uma taxa de 1% ao ano entre 1990 e 2000 e de 3,13% entre 2005 – 2010. Esses resultados contradizem os encontrados no presente estudo, em que foi registrada uma diminuição gradual das áreas florestadas entre 1986 e 2014. No entanto, os resultados encontrados no presente estudo coincidem com os achados por Álvarez-Berrios et al. (2013) que observaram redução das áreas ocupadas por vegetação de alto porte para a região oeste do país entre 2001 e 2010. Convém ressaltar que em estudos realizados em todo o território haitiano por Churches et al. (2014) verificaram uma cobertura florestal de 32,3% entre 2010 e 2011; resultado que difere plenamente com o que vem relatado na literatura a respeito da cobertura florestal no país.

Tabela 4. Dinâmica das classes de uso e cobertura do solo (UCS).

UCS	1986		2000		2014		Mudança (1986 - 2000) (%)	^{1/} Taxa/ ano	Mudança (2000 - 2014) (%)	^{2/} Taxa/ ano
	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)				
Água	12784,3	3,0	13439,5	3,1	15595,0	3,6	5,1	0,4	16,0	1,1
Solo E.	86725,1	20,2	164899,3	38,4	91455,8	21,3	90,1	6,4	-80,3	-5,7
Área U.	4323,1	1,0	10656,4	2,5	11654,6	2,7	146,5	10,5	9,4	0,7
Agr.	52091,9	12,1	51649,3	12	92512,5	21,5	-0,9	-0,1	79,1	5,6
Veg. R.	168992	39,3	108573,2	25,3	177087,2	41,2	-55,6	-4,0	63,1	4,5
Veg. P.	88720,7	20,6	72235,1	16,8	34291,1	8,0	-22,8	-1,6	-110,7	-7,9
Nuvem	1985,4	0,5	407,0	0,1	712,1	0,2	-387,8	-27,7	75,0	5,4
Sombra	14348,3	3,3	8110,5	1,9	6661,9	1,5	-76,9	-5,5	-21,7	-1,6
	429970	100	429970	100	429970	100	-	-	-	-

^{1/}mudança de 1986 a 2000 (14 anos); ^{2/}mudança de 2000 a 2014 (14 anos).

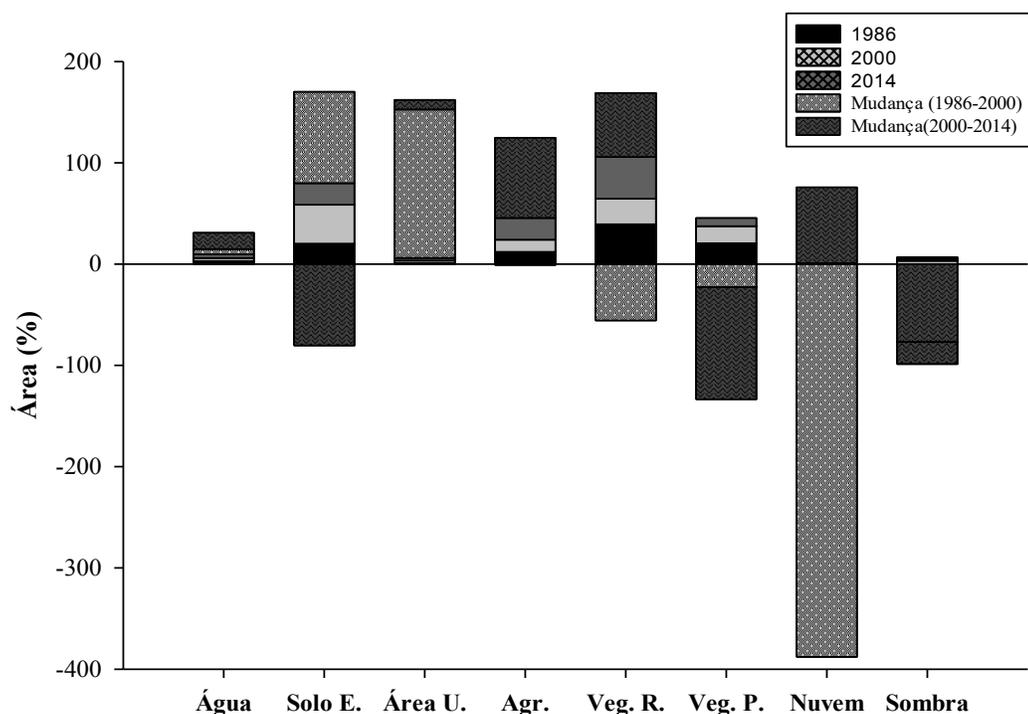


Figura 6. Taxa de mudança no uso e cobertura do solo.

3.5 Identificação da natureza das mudanças

Durante o período de 1986 a 2000, a classe de uso que sofreram menos mudanças foi a de água com proporção de 92,6%. Por outro lado, percebeu-se que as maiores transformações que ocorreram nesta época dizem respeito à conversão da vegetação rasteira ou de savana para vegetação de alto porte com percentual de 45, 2% e para solo exposto com percentual de ocupação de 43,3%. Foi verificado que 33,7% dos locais ocupados pela classe área urbana no ano de 2000 eram cobertas pela vegetação rasteira. Do total da área ocupada pela agricultura no ano de 2000, 33,3% era coberta pela vegetação rasteira e 26,1% pela vegetação de porte alto em 1986. Da mesma forma, da área ocupada por solo exposto em 2000, 43,3% era coberta por vegetação rasteira 14 anos depois.

A vegetação florestada foi transformada em área agrícola com 26,1%; e a transformação das áreas de solo exposto em área urbana e/ou periurbana correspondendo a 36,3% (Tabela 5).

Tabela 5. Matriz de mudança no uso e cobertura do solo de 1986 a 2000 em hectares e em porcentagem.

1986	2000								Total 1986
	Água	Solo E.	Área U.	Agr.	Veg. R.	Veg. P.	Nuvem	Sombra	
Água	12443,4	60,4	110,4	26,6	12,8	43,0	0,6	87,0	12784,3
%	92,6	0,0	1,0	0,1	0,0	0,1	0,2	1,1	-
Solo E.	179,6	66728,0	3872,5	5892,0	5252,0	4348,4	181,5	271,2	86725,1
%	1,3	40,5	36,3	11,4	4,8	6,0	44,6	3,3	-
Área U.	247,2	957,0	2326,3	491,9	174,6	96,9	12,2	17,0	4323,1
%	1,8	0,6	21,8	1,0	0,2	0,1	3,0	0,2	-
Agr.	15,6	10005,7	752,9	14061,0	21248,0	5812,7	69,7	126,5	52091,9
%	0,1	6,1	7,1	27,2	19,6	8,0	17,1	1,6	-
Veg. R.	75,8	71386,5	2758,5	17211,2	43381,7	32655,3	93,1	1429,4	168991,5
%	0,6	43,3	25,9	33,3	40,0	45,2	22,9	17,6	-
Veg. P.	29,2	14234,9	798,0	13488,3	36585,5	22939,1	38,3	607,3	88720,7
%	0,2	8,6	7,5	26,1	33,7	31,8	9,4	7,5	-
Nuvem	61,6	663,3	5,0	203,4	712,5	291,6	6,5	41,5	1985,4
%	0,5	0,4	0,0	0,4	0,7	0,4	1,6	0,5	-
Sombra	387,3	863,6	32,6	274,9	1206,1	6048,1	5,1	5530,7	14348,3
%	2,9	0,5	0,3	0,5	1,1	8,4	1,3	68,2	-
Total 2000	13439,5	164899,3	10656,4	51649,3	108573,2	72235,1	407,0	8110,5	429970
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Conforme apresentado na Tabela 6, as classes que sofreram alterações relativamente menores no período de 2000 a 2014 foram as de água (83,2%), solo exposto (67,8%) e da vegetação de alto porte (63,6%). Notou-se ainda que 30,9% da área urbana em 2014 eram ocupadas por solo exposto; e a maior proporção das áreas agrícolas era ocupada por vegetação rasteira, solo exposto, e vegetação florestada, com percentuais respectivos de 38,8, 17,7 e 16,0%. O último cenário pode ser explicado pela pressão demográfica que vem acarretando a derrubada da vegetação arbórea e a conversão para áreas agricultáveis, pois a oportunidade de emprego é escassa, sobretudo no meio rural.

Tabela 6. Matriz de mudança no uso e cobertura do solo de 2000 a 2014 em hectares e em porcentagem.

2000	2014								Total 2000
	Água	Solo E.	Área U.	Agr.	Veg. R.	Veg. P.	Nuvem	Sombra	
Água	12978,9	83,2	16,1	67,0	14,9	50,9	0,1	228,6	13439,5
	83,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	3,4	-
Solo E.	1244,2	62025,0	3606,0	16050,2	78441,6	2450,3	116,7	965,3	164899,3
	8,0	67,8	30,9	17,3	44,3	7,1	16,4	14,5	-
Área U.	491,7	1952,0	5864,1	1143,3	831,0	64,1	2,3	308,0	10656,4
	3,2	2,1	50,3	1,2	0,5	0,2	0,3	4,6	-
Agr.	433,7	5367,5	1341,3	24307,5	18913,9	909,5	69,5	306,5	51649,3
	2,8	5,9	11,5	26,3	10,7	2,7	9,8	4,6	-
Veg. R.	93,8	10307,2	437,9	35858,1	55375,2	5740,0	288,4	472,8	108573,2
	0,6	11,3	3,8	38,8	31,3	16,7	40,5	7,1	-
Veg. P.	182,8	10723,7	317,2	14819,3	22695,1	21817,4	212,8	1466,9	72235,1
	1,2	11,7	2,7	16,0	12,8	63,6	29,9	22,0	-
Nuvem	0,7	198,1	33,2	17,2	144,7	10,3	2,2	0,6	407,0
	0,0	0,2	0,3	0,0	0,1	0,0	0,3	0,0	-
Sombra	169,3	799,2	38,8	250,1	671,0	3248,7	20,3	2913,2	8110,5
	1,1	0,9	0,3	0,3	0,4	9,5	2,8	43,7	-
Total 2014	15595,0	91455,8	11654,6	92512,5	177087,2	34291,1	712,1	6661,9	429970
	100	100	100	100	100	100	100	100	

As transformações detectadas no uso e cobertura do solo entre 1986 e 2000 foram mais aceleradas do que as registradas no período de 2000 a 2014, sendo as causas interdependentes e complexas. Vale salientar que a redução drástica da vegetação registrada neste período com consequente aumento da classe solo exposto pode ser enquadrada de efeito colateral devido ao que Bayart (1985) qualifica de processo de descompressão autoritária. Esse período de transição pós-ditadura caracterizou-se por fortes conturbações políticas, sociais e econômicas, ocasionando o enfraquecimento das instituições governamentais fiscalizadoras e de controle, com flagrante descumprimento das leis. A influência dos fatores políticos e econômicos tem sido apontada como

determinante no entendimento das causas de deterioração ambientais no Haiti (BOWEN, 2006; BAYARD, 2007).

Além disso, o crescimento demográfico e a falta de atividades geradoras de renda, particularmente no meio rural, têm ocasionado forte pressão sobre os recursos naturais em geral, intensificando as atividades de desflorestamento para suprir o mercado local de produtos florestais. Neste sentido, a forte expansão dos solos expostos, o acelerado processo de ocupação urbana e o aumento das áreas ocupadas pelos corpos d'água (lagos), particularmente após os quatro furacões que atingiram o país em 2008, têm sido consequências do cenário acima descrito.

4 CONCLUSÕES

Os cinco algoritmos de classificação utilizados mostraram o potencial dessas ferramentas para separar as classes de uso satisfatoriamente e detectar as mudanças de forma semi-automatizada, otimizando o tempo e minimizando ainda os custos. No entanto, o classificador *Random Forest* apresentou melhor desempenho tanto na qualificação quanto na validação dos mapas finais, revelado pela estatística *Z*.

A abordagem permitiu notar que as alterações mais evidentes dizem respeito às classes de área urbana (146,5%), solo exposto (90,1%) e vegetação rasteira (-55,6%) no primeiro período; enquanto essas alterações tangem mais às classes solo exposto (-83,3%), vegetação de alto porte (-110,7%), vegetação rasteira (-80,3%), e agricultura (75%). Tais alterações são resultantes de ações antrópicas numa paisagem naturalmente vulnerável.

A análise do uso e cobertura do solo no contexto da região investigada é uma questão abrangente e complexa, uma vez que a área concentra boa parte da população do país, em decorrência da centralização das atividades socioeconômicas mais importantes na capital.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. SHALABY; R. TATEISHI. Image enhancement and visual interpretation. **Applied Geography**. V. 27, 28–41. 2007.
- BELLEGARDE, D. Histoire du peuple haïtien (1492-1952). Collection du Tricinquantaire de l'Indépendance d'Haïti. Lausanne, Imp. Held et Port-au-Prince, 1952, 365p. *Apud* MORAL, P. Le paysan haïtien (Étude sur la vie rural en Haïti. **Paris, G. P Maisonneuve et Larose**. Port-au-Prince. 376p. 1961.
- BREIMAN, L. “Random Forests.” *Machine Learning*, v. 45, n. 1, p. 5–32. 2001.
- CAUNA, J. **Au temps des isles à sucre**: histoire d'une plantation de Saint-Domingue au XVIIIe siècle. KARTHALA, 2003. 285 p.
- CHAN, J. C.-W.; D. PAELINCKX. “Evaluation of Random Forest and Adaboost Tree-Based Ensemble Classification and Spectral Band Selection for Ecotope Mapping Using Airborne Hyperspectral Imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n. 6, p. 2999–3011. 2008.
- CHANDER, G.; BRIAN, L. M.; DENNIS L. H. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 5, p.893–903, 2009.
- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. New-York: **Lewis Publishers**, 1999. 136 p.
- DeFRIES, R. S.; ASNER, G. P., HOUGHTON, R. A. Ecosystems and Land Use Change. **American Geophysical Union**, Washington, DC. editors. 2004
- DOLISCA, F.; JOLLY, C., M. Technical Efficiency of Traditional and Non-Traditional Crop Production: A Case Study from Haiti. **World J. Agric. Sci.**, v. 4, n. 4, p: 416-426, 2008.
- ELLIS, E. Land-use and land-cover change. <<http://www.eoearth.org/view/article/154143>>. Acessado em 2013.
- EMERSON, C. W.; LAM, N. S-N, L.; QUATTROCHI, D. A. A comparison of local variance, fractal dimension, and Moran's *I* as aids to multispectral image classification. **International Journal of Remote Sensing**. Vol., 26, n. 8, p. 1575-1588, 2005.
- ERBEK, F. S.; OZKAN, C., TABERNER, M. Comparison of Maximum Likelihood Classification Method with Supervised Artificial Neural Network Algorithms for Land Use Activities. **International Journal of Remote Sensing**. V. 25, n. 9, p. 1733–1748. 2004.
- GISLASON, P. O.; BENEDIKTSSON, J. A.; SVEINSSON, J. R. Random Forests for Land Cover Classification. **Pattern Recognition Letters**. V.27, n. 4, p. 294–300. 2006.
- GOSLEE, S. C. Analyzing Remote Sensing Data in R: The landsat Package. **Journal of Statistical Software**. 2011, Volume 43, Issue 4.

INSTITUT HAÏTIEN DE STATISTIQUE ET D'INFORMATIQUE (IHSI). Résultats préliminaires : 4ème recensement général de la population et de l'habitat. **Institut Haïtien de Statistique et d'Informatique (IHSI)**, Port-au-Prince. 2003.

JANSSEN, L. L. F., & VAN DER WEL, F. J. M. Accuracy assessment of satellite derived land-cover data: a review. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, 419– 426. **Journal of Remote Sensing**, 6, p. 989 - 1003. 1994.

KASPERSON JX, KASPERSON RE, TURNER BL, eds. *Regions at Risk: Comparisons of Threatened Environments*. Tokyo: **UN Univ. Press**. 588 pp. 1995.

KOOHAFKAN, A.P., LILIN, C.. Arbres et arbustes de Haiti: utilisation des especes ligneuses en conservation des sols et en aménagement des bassins versants. **Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural**, Port-au-Prince (Haiti), 133 p. 1989

LAMBIN, E. F., H. J. GEIST, AND E. LEPERS. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 28, n. 1, p. 205–241, 2003.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p.159-174, 1977.

LIANG, S., FANG, H., MINGZHEN, C. Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery Part I: Methods. *Geoscience and remote sensing*. v. 39, n. 11. 2001.

LILLESAND, T, M.; KIEFER, R. W. *Remote sensing and image interpretation*, 4th. ed. **John Wiley & Sons**, 1999.

LIMA, R. N. S.; RIBEIRO, C. B. M. Comparação de métodos de correção topográfica em imagens Landsat sob diferentes condições de iluminação. **Revista Brasileira de Cartografia - RBC**. No Prelo, 2014.

MEYER, W. B., TURNER, B. L. *Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective*. **Cambridge University Press**, Cambridge England; New York, NY, USA. 1994.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. (2014). <URL <http://www.R-project.org/>>. Acessado em 12 abr. 2014.

RICHTER, R., KELLENBERGER, T, KAUFMANN, H., Comparison of Topographic Correction Methods. **Remote Sensing**. V.1, p.184-196. 2009.

ROSA, D. L., WIESMANN, D. Land cover and impervious surface extraction using parametric and non-parametric algorithms from the open-source software R: an application to sustainable urban planning in Sicily. **GIScience & Remote Sensing**. V.50, p.231-250. 2013.

SESNIE, S.E.; FINEGAN, B.; GESSLER, P. E.; THESSLER, S.; BENDANA, Z. R.; A. M. S. SMITH. “The Multispectral Separability of Costa Rican Rainforest Types with Support Vector

Machines and Random Forest Decision Trees.” **International Journal of Remote Sensing**. V. 31, p.2885–2909. 2010.

SINGH, A. Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International journal of remote sensing**. v. 10, n. 6, p. 989-1003, 1989.

SONG, C., C. E. WOODCOCK, K. C. SETO, M.P. LENNEY, AND S.A. MACOMBER. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? **Remote Sensing of Environment**. V.75, p.230–244. 2001.

KARL, Thomas R.; TRENBERTH, Kevin E. Modern global climate change. **Science**, v. 302, n. 5651, p. 1719-1723, 2003.

TURNER II, B.L., W. C. CLARK, R. W. KATES, J. F. RICHARDS, J. T. MATHEWS, AND W. B. MEYER. The Earth as Transformed by Human Action: Global and Regional Changes in the Biosphere Over the Past 300 Years. **Cambridge University Press with Clark University, Cambridge**; New York. 1990.

U.S Geological Survey. Using the USGS Landsat 8 Product. Disponível em http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php. Acesso em novembro de 2014.

VELDKAMP, A., LAMBIN, E. F.. Editorial: Predicting land use change. **Agriculture, ecosystems and Environment**, v. 85, n. 1-3, p. 1-6. 2001.

VITAL, J. A. Land use/cover change using Remote Sensing and Geographic Information Systems: Pic Macaya National Park, Haiti, Master's Thesis. Michigan Technological University, 2008. Disponível: <<http://digitalcommons.mtu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1137&context=etds>>. Acesso em 15 de novembro de 2014.

WOODRING, W. P.; BROWN, J. S.; BURBANK, W. S. Geology of the Republic of Haiti. Port-au-Prince, Haiti. **Lord Baltimore Press**, n. 630.25/W893, p. 631, 1924.

WORM, B.; BARBIER, E. B.; BEAUMONT, N.; DUFFY, J. E.; FOLKE, C.; HALPERN, B. S.; JACKSON, J. B.; LOTZE, H. K.; MICHELI, F.; PALUMBI, S. R.; SALA, E.; SELKOE, K. A.; STACHOWICZ, J. J.; WATSON, R. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. **Science**, v. 314, n. 5800, p. 787-790, 2006.

ZHU, Z.; WOODCOCK, C. E.; ROGAN, J.; KELLNDORFER, J. Assessment of Spectral, Polarimetric, Temporal, and Spatial Dimensions for Urban and Peri-Urban Land Cover Classification Using Landsat and SAR Data. **Remote Sensing of Environment**. 117: 72–82. 2012.

Commission Economique pour l’Amérique Latine et les Caraïbes (CEPALC). Analyse de la substitution entre combustibles dans le secteur résidentiel en Haïti. 2005. 49p. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11362/25750>>. Acesso em 20 de março de 2015.

BOWEN, G. A. The challenges of poverty and social welfare in the Caribbean. **Int J Soc Welfare**. p 150–158. 2007.

ORGANIZATION FOR THE REHABILITATION OF THE ENVIRONMENT (ORE). The environment and the farming system. < <http://www.oreworld.org/background.htm>> .Acesso em 31 de março de 2015.

BAYART, J. F. L'état clientéliste transcendé.. In : *L'État au Cameroun*, Paris, Presses de Sciences Po (P.F.N.S.P.), «Références », 1985. 348 p. URL: www.cairn.info/l-etat-au-cameroun--9782724605105-page-139.htm.

MINISTÈRE DE LA JUSTICE. Le Code Rural de François Duvalier. Port-au-Prince, Haïti : **Impr. de l'État**. 2. éd. 64p. 1963.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Global Forest Resources Assessment** - Main report. FAO, Rome. 2010. P 378.

STEVENSON, G. G. The Production, Distribution, and Consumption of Fuelwood in Haiti. **The Journal of Developing Areas**. pp. 59-76. 1989.

BAYARD, B., JOLLY, C. M., SHANNON, D. A. The economics of adoption and management of alley cropping in Haiti. **Journal of Environmental Management**. P 62–70. 2007.

CHURCHES, C. E., WAMPLER, P. J., SUN, W., SMITH, A. J. Evaluation of forest cover estimates for Haiti using supervisedclassification of Landsat data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 30, p. 203-216, 2014.

CAPÍTULO IV

COMPARAÇÃO DOS CLASSIFICADORES REGRESSÃO LOGÍSTICA MULTINOMIAL E RANDOM FOREST NO MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS NO HAITI OCIDENTAL

RESUMO

Devido à falta de informações pedológicas no Haiti, o mapeamento digital de solo (MDS) se torna uma alternativa para produzir dados de maneira rápida e acurada, visando auxiliar os responsáveis no planejamento agrícola e programas do meio ambiente. Objetivou-se com este estudo mapear os solos no oeste do Haiti, comparando os algoritmos Regressão Logística Multinomial (RLM) e Random Forest (RF). No presente estudo, foram testadas técnicas de MDS para delimitar classes de solos no oeste do Haiti (~4300 km²). O levantamento pedológico foi realizado por meio da estratégia de amostragem mista. As amostras coletadas foram analisadas fisicamente e quimicamente, e os solos classificados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Por meio de 140 pontos de observação, os algoritmos de Regressão Logística (RLG) e Random Forest (RF) foram aplicados neste processo de mapeamento, baseando-se na relação solo-ambiente que envolve o clima, a litologia e os atributos do terreno como covariáveis preditoras. O desempenho dos classificadores foi avaliado por meio do índice Kappa derivado da matriz de confusão e a validação realizada por meio de uma amostra independente de 118 pontos. A comparação entre os classificadores foi efetuada por meio do teste Z. O índice Kappa gerado foi de 0,47 (RLG) e 0,33 (RF). O valor Z de 1,98 denota diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% entre os índices Kappa dos classificadores. A qualidade da classificação pode ser caracterizada de boa para o RLG e de razoável para o RF. O valor do índice Kappa na validação do mapa foi de 0,49; e utilizando a exatidão global, foi de 0,59. As unidades de mapeamento de maior ocorrência foram: Neossolo Litólico (32,4%), afloramento de rocha (22,1%) e Chernossolo (13,2%). A abordagem se revelou promissora e poderá ser utilizada para mapear os solos nas demais regiões do país.

Palavras-chave: Levantamento de solo. Pedometria. Covariáveis ambientais. Mineração de dados.

COMPARISON OF MULTINOMIAL LOGISTIC REGRESSION AND RANDOM FOREST CLASSIFIERS IN DIGITAL MAPPING OF SOIL IN WESTERN HAITI

ABSTRACT

Because of the lack of soil maps in Haiti, digital soil mapping is suitable to provide quick and accurate information to support decision makers in programs of agricultural and environmental planning. This study aimed to map soils in western Haiti as to compare Multinomial Logistic Regression (MLR) and Random Forest (RF) classifiers. In this study, digital soil mapping (DSM) technics were evaluated to delimit soil classes in western Haiti (~4300 km²). A soil survey was carried out through a mixed sampling strategy. The collected samples were analyzed physically and chemically, while the Brazilian Soil Classification System (SiBCS) was used in soil classification. From a set of 140 sample points, the algorithms MLR and RF were applied in the classification process based on soil-landscape relationship, involving climate, lithology and landscape attributes as predictor variables. Classifiers performance was assessed through Kappa index derived from confusion matrix and map validation was effected through an independent sample of 118 points. Comparison between the classifiers was carried out through Z statistic. Kappa index determined in this process was 0.47 for MLR and 0.33 for RF. A statistically significant difference between Kappa values was encountered with a Z statistic of 1.98 at 5% significant level. Classification performance can be characterized good for MLR and moderate for RF. Kappa index in validation of final map was 0,49; while the overall accuracy value was 0.59. Map units with the largest percentage in the study area were: Entisols (32,4%), rock outcrops (22,1%) and Mollisols (13,2%). The approach proved to be promising as a method to map soils of other parts of the country.

Key-words: Soil survey. Pedometrics. Environments covariables. Data mining.

1 INTRODUÇÃO

O solo é um sistema dinâmico bastante complexo, o que é reflexo dos próprios processos pedogenéticos envolvidos, tendo já sido desenvolvidos vários conceitos, modelos e abordagens metodológicas com a intenção de capturar a não linearidade na formação e evolução do solo, tendo como exemplo o de Jenny (1941); Simonson (1959); Runge, 1973; Bockheim, (1980); e mais recentemente Sommer et al., (2008).

Embora o desenvolvimento do solo não aconteça de forma unidimensional, assume-se a existência de uma relação estreita entre a sua posição na paisagem e o seu grau de desenvolvimento, formando padrões pedológicos (WILSON e GALLANT, 2000). A homogeneidade destes padrões pode ser evidenciada pelo levantamento de solos, os quais são normalmente estabelecidos com base nas características morfológicas observáveis bem como nas propriedades e nos atributos intrínsecos ao solo.

Há mais de um século que levantamentos pedológicos sistemáticos que envolvem desde as etapas de caracterização morfológica de campo, a análises laboratoriais, a classificação e o mapeamento, têm proporcionado informações essenciais para subsidiar o manejo e o planejamento do uso da terra (DECKERS et al., 2002). Segundo Bouma (1989), o uso de tecnologia de informação para atender demandas específicas representa uma importante etapa no levantamento de solos. Desta maneira, o mapeamento de solos, que comumente sintetiza as informações procedentes de levantamentos de campo, tem passado nas últimas décadas a ser cada vez mais automatizado por meio de ferramentas computacionais.

Em função dos grandes avanços na tecnologia computacional, no desenvolvimento das técnicas do sistema de informação geográfica (SIG) e na disponibilidade de dados geográficos mais sofisticados, têm surgido nas últimas décadas, um extraordinários progressos na produção de informação originada de levantamento digital de solo (HEMPEL et al., 2008). Segundo Pennock e Veldkamp (2006), a falta de uma abordagem quantitativa na pedologia era limitada pelas técnicas estatísticas disponíveis para os cientistas do solo durante o século 20.

O mapeamento automatizado de solos ou mapeamento digital de solos (MDS) ou ainda modelo preditivo de mapeamento de solo, é o sistema de informação espacial criado a partir de modelos numéricos que explicam as variações temporal e espacial de classes e propriedades de solos com

base em variáveis ambientais correlacionadas (McBratney et al., 2003, Scull et al., 2003; Lagacherie e McBratney, 2007).

Ao recorrer às técnicas e metodologia modernas de SIG, de modelo digital de elevação (MDE) e de sensoriamento remoto (Moonjun et al., 2010; Bacon et al., 2010), o MDS vem sendo considerado o novo paradigma para o levantamento pedológico, por acarretar informações quantitativas, rápidas e crescentemente acuradas. O MDS tem como base teórico o modelo determinístico do Jenny (1941), traduzindo a relação solo-ambiente expressa o solo (*S*) como função dos fatores clima (*cl*), organismos vivos (*o*), material parental (*p*), relevo (*r*) atuando ao longo do tempo (*t*). Esses fatores definem o solo e o sistema ambiental em termos de controle dos processos pedogenéticos e da distribuição do solo (WILDING, 1994). Como apontado por White (2006), a procura de estabelecer uma relação quantitativa entre as propriedades do solo e as variáveis de estado tem sido objeto de debates entre os pedólogos desde 1941.

Assim sendo, da aplicação de métodos matemáticos, estatísticos, geoestatísticos e de mineração de dados, junto com as técnicas acima apontadas no mapeamento de solos, surgiu o novo campo da Ciência do Solo conhecido como Pedometria (McBratney et al., 2003), que além de permitir o estudo quantitativo da variação espacial do solo na paisagem, permite alcançar um melhor entendimento da gênese do solo por fundamentar-se nos cinco fatores de formação do solo.

Neste contexto, McBratney *et al.* (2003) formularam uma equação similar à do Jenny (1941), com objetivo de estabelecer quantitativamente as relações empíricas entre o solo e os outros fatores ambientais, sendo usados como funções espaciais de predição. Sete fatores são contemplados nesse modelo denominado S.C.O.R.P.A.N. onde: S= solo; C= clima; O= organismos; R= topografia; P= material originário; A= idade; N= localização espacial.

Atualmente, métodos de predição ou de mapeamento de classes e propriedades do solo estão sendo bastante difundidos, os quais podem variar desde o uso de uma regressão linear simples (Moore et al., 1995) até métodos mais avançados como os de regressão não-linear, árvores de regressão (Mckenzie & Ryan, 1999), métodos geoestatísticos como a co-krigagem (Odeh et al., 1995), métodos híbridos como Regression-kriging (McBratney et al., 2000) e krigagem (Goovaerts, 1998 apud Bishop e McBratney, 2001).

O mapeamento digital de solos objetiva agilizar a execução de levantamento de solos em método convencional, além de possibilitar a quantificação dos erros que são normalmente associados a todo processo de mapeamento. No Brasil e em diversos países do mundo, o

desenvolvimento e o uso de modelos preditivos de mapeamento digital de solos têm-se revelado em constante evolução, buscando informações cada vez mais precisas. Contudo, não existe ainda um consenso a respeito de qual algoritmo seja universalmente aplicável para todo tipo de ambiente.

O uso de metodologias que permitam minimizar tempo e aumentem a acurácia na obtenção de informações no mapeamento de solos, é importante para a tomada de decisão referente ao uso e manejo do solo para dar suporte à sustentabilidade agrícola e as demandas ambientais de uma região ou país. Isto é, o MDS apresenta-se como uma alternativa viável capaz de preencher a falta de informação pedológica no contexto do Haiti.

Diante disso, tem-se como principal objetivo deste trabalho, realizar o mapeamento de solos no oeste do Haiti por meio do uso e da comparação dos algoritmos regressão logística multinomial (RLM) e Random Forest (RF).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização da área

A área estudada possui uma extensão de aproximadamente 4.300 km² e localiza-se entre 18°15'30"N e 18°58'25" de latitude e 71°42'39"W e 73°4'22"W de longitudes, na região oeste do Haiti. É caracterizada pelo relevo bastante acidentado, com forte amplitude topográfica, sendo bem representativa das características geomorfológicas gerais encontradas nas demais regiões do país. Conforme apresentado no primeiro capítulo, o clima da região é dominado pelo tropical "Aw" nas planícies e colinas que têm baixa variação de temperatura durante ano; enquanto nas regiões mais altas encontra-se o tipo "Cwb", ou seja, clima tropical de altitude com inverno seco e verão quente.

2.2 Variável resposta, covariáveis e estabelecimento do plano de informação

Neste processo de mapeamento digital de solos, a variável resposta é representada pelas classes de solos. As covariáveis escolhidas na discriminação dos solos ou variáveis explicativas, têm como base a relação solo-ambiente conceitualizada por McBratney et al. (2003) e batizada de fatores SCORPAN. Desta forma, diferentes covariáveis ambientais, inclusive atributos do terreno,

litologia, índices derivados de imagens de sensoriamento remoto e mapas climáticos no formato matricial foram utilizados como variáveis preditoras no mapeamento dos solos.

Assim sendo, a partir do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) de 30 m, originado do SRTM, derivaram-se os atributos primários e secundários do terreno necessários para explicar a formação dos solos.

Além dos atributos do terreno, incorporaram-se a pluviometria média e a litologia como variáveis representando os fatores clima e material parental, respectivamente.

Com o uso de imagens de sensoriamento remoto, mais especificamente, as imagens do sensor OLI do Landsat 8, foi possível derivar as covariáveis de vegetação pelo uso do Índice de vegetação da diferença normalizada (*NDVI*), calculado pela relação seguinte:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Onde, NIR, a banda do infravermelho próximo (0,85 – 0,88 μm); e R a banda do vermelho (0,64 – 0,67 μm). Os valores do NDVI variam de -1 a 1.

Também foram integrados ao plano de informação o seguinte índice, descrito e disponível em Grove et al. (1992):

$$\text{- Índice de mineral argila} = \left(\frac{SWIR1}{SWIR2} \right) \quad (2)$$

As covariáveis foram todas registradas no mesmo sistema de coordenadas, na mesma resolução espacial e na mesma extensão. Os atributos do terreno assim como as outras covariáveis preditoras estão apresentados na tabela 1 a seguir.

Devido ao tamanho amostral ser relativamente pequeno, agregações foram feitas com as classes de solos de menor representatividade junto com outras classes que ocorrem em associação com estes.

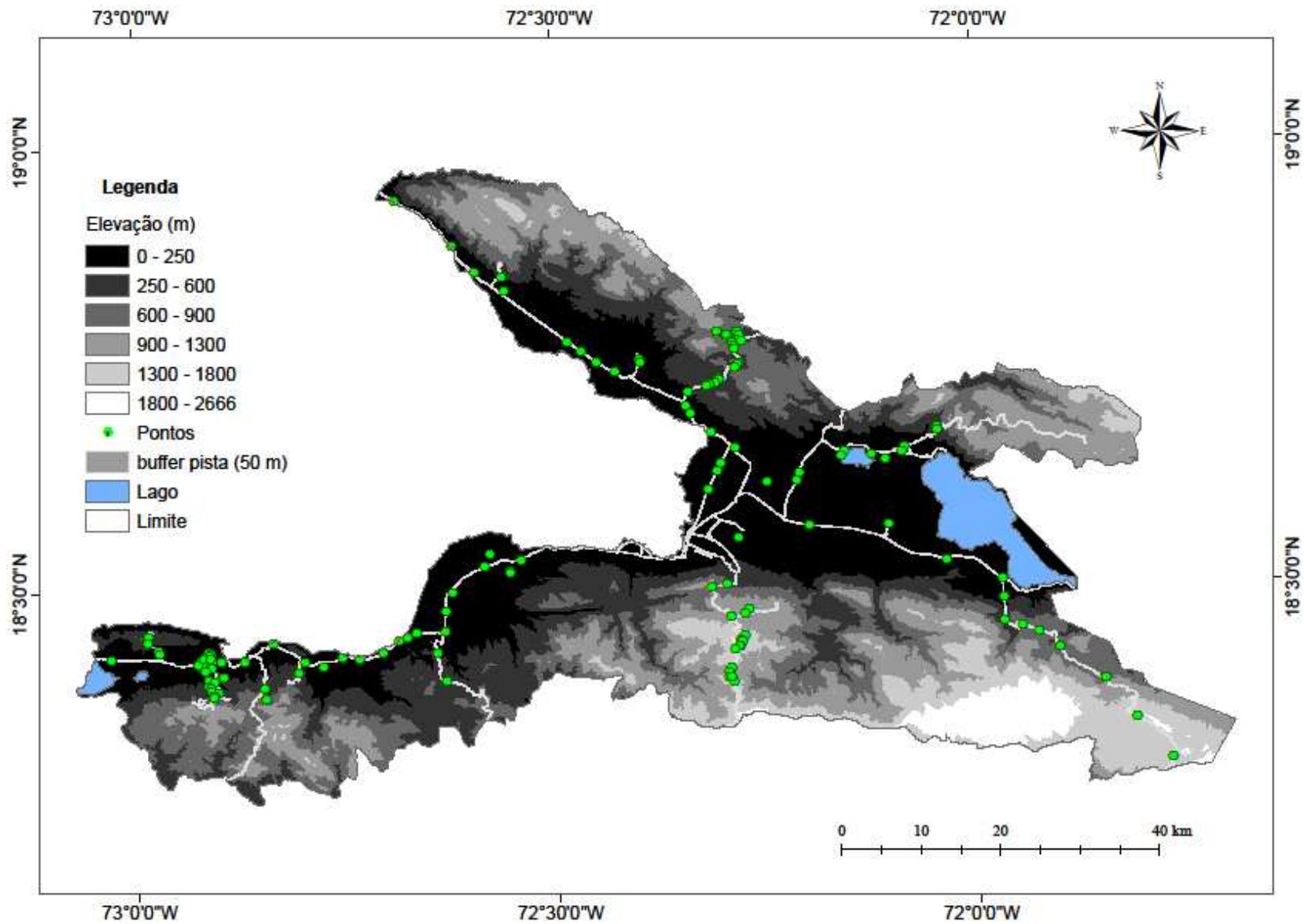


Figura 1. Pontos levantados na área de estudo.

Tabela 1. Covariáveis preditoras na classificação dos solos

Covariáveis	Fator de formação*	Autores
Modelo digital de elevação (MDE)	R	Burrough, (1986)
Declividade	R	Burrough, (1986)
Índice de umidade topográfica	R	Beven e Kirkby (1979).
Direção do fluxo	R	Jenson e Domingue
Curvatura	R	Moore, I. D., R. B.
<i>Channel Network Base Level</i>	R	O. Conrad (2002)
<i>Terrain surface texture</i>	R	Iwahashi & Pike (2007)
<i>Vertical Distance to Channel Network</i>	R	O. Conrad (2002)
<i>Relative Slope Position</i>	R	O. Conrad (2002)
<i>Aspecto</i>	R	Burrough, & Mcdonell
Geologia	P	BME (2005)
<i>Clay minerals index</i>	P	Boettinger et al. (2008)
NDVI	O	Rouse (1973)
Precipitação	Cl	Hijmans et al. (2005)

R- relevo; P- material parental; O- organismo; Cl- clima. – *Variável relacionada com a equação CLORPT de Jenny.

2.3 Classificadores utilizados no mapeamento digital de solos

Para estabelecer a relação entre o solo e as covariáveis no mapeamento digital dos solos, foi realizada análise exploratória dos dados por meio da correlação e análise de *clusters* utilizando o pacote “Hmisc” do R CRAN. Este tipo de análise permite reduzir o número de variáveis pela eliminação daquelas que são redundantes. Da mesma forma para classificar os solos, empregaram-se os algoritmos ou classificadores: *Random Forest* (RF) e Regressão Logística Multinomial (RLM).

a) **Random Forest**

Este algoritmo foi desenvolvido por Breiman (2001) e consiste na construção de um conjunto de árvores classificadoras aleatórias durante o processo de treinamento, sendo que a agregação das mesmas leva a uma única predição. No que diz respeito à classificação, a resposta é

a moda das classes; enquanto para a regressão, o resultado é a média das árvores individuais. O uso de um conjunto de árvores simples pode levar à melhora significativa na acurácia da predição. Extensa revisão sobre o método é encontrada em Breiman (2001) e Grimm et al. (2008).

Foi necessário determinar as variáveis mais importantes no desenvolvimento do modelo pelo índice de Gini (MeanDecreaseGini). Quanto maior o valor do índice para uma determinada variável, maior contribuição aporta na variabilidade das classes de solo. Da mesma forma, foi selecionado o número de variáveis ótimas por árvore (*mtry*) a partir de uma validação cruzada feita na etapa do pre-processamento; e o melhor modelo foi escolhido baseando-se no critério de estimação de erro OOB (*out-of-bag*) e no índice Kappa, após várias tentativas. Quanto menor o valor OOB, melhor é o modelo.

Foram usados os pacotes “caret” e “random forest” do programa R CRAN (Comprehensive R Archive Network) neste processo.

b) Regressão Logística Multinomial

A Regressão Logística Multinomial (RLG) faz parte da família dos modelos lineares generalizados e é utilizado quando a variável resposta é categórica. Este permite prever as probabilidades de ocorrência de solo na paisagem. A RLG é uma transformação não-linear da regressão-linear que permite calcular a probabilidade de ocorrência de qualquer número de classes de uma variável dependente (neste caso, unidades pedológicas) com base em variáveis explicativas. Pelo comportamento sigmóide da sua curva, a RLG se difere dos modelos de regreção linear.

O modelo *logit* se apresenta da seguinte forma:

$$\log \frac{\pi_j(x)}{\pi_j(x)} = \alpha_j + \beta_j' x, j=1, \dots, J-1; \text{ onde } x, \text{ variável preditiva; e } J \text{ categoria que depende de uma}$$

variável resposta Y , tal como $\pi_j(x) = P(Y = j | x)$.

A equação que expressa modelos logísticos multinomiais em termos de probabilidades de respostas é:

$$\pi_j(x) = \frac{\exp(\alpha_j + \beta_j' x)}{1 + \sum_{h=1}^{J-1} \exp(\alpha_h + \beta_h' x)}$$

Contrariamente ao modelo de regressão linear que utiliza o mínimo quadrado como estimador, a regressão logística multinomial usa o estimador de máxima verossimilhança. Uma descrição mais ampla se encontra na literatura, notadamente em Hosmer & Lemeshow (1989) e Agresti (2002).

Com este classificador, a importância de cada covariável foi avaliada por meio do p-valor derivado do teste z de Wald. Foram assim selecionadas as covariáveis de maior significância para o modelo.

Há de ressaltar que o algoritmo de regressão logística tem sido aplicado em diversos trabalhos relacionados ao mapeamento digital de solos. No Brasil, os estudos feitos por FIGUEIREDO et al. (2008) e GIASSON et al. (2006) são exemplos de aplicação do algoritmo no campo de conhecimento da ciência do solo.

No presente estudo, foi usado o pacote “nnet” do programa R CRAN.

2.4 Avaliação do desempenho dos classificadores

A classificação deve ser vista como um processo estatístico e probabilístico que tenta ao máximo aproximar o mapa digital à realidade.

A acurácia é normalmente expressa em termos de índices calculados a partir de matrizes de erros que estabelecem a concordância entre a imagem classificada e o conjunto de amostras de referência. A matriz de erros compara, classe por classe, a relação entre os dados terrestres (dados de referência) verdadeiros e os correspondentes resultados da classificação.

Assim sendo, a acurácia dos mapas produzidos por meio dos algoritmos supracitados foi avaliada pela matriz de erro, ou de confusão, e pelo índice Kappa. O índice Kappa é um método estatístico utilizado na avaliação da concordância entre pontos de referência da área mapeada e os resultados encontrados no mapa temático obtido a partir da interpretação da imagem de satélite (CONGALTON & GREEN, 1999; FOODY, 2004).

A qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa foi proposta por Landis e Koch (1977) e qualificada da seguinte forma: 0 – 0,2 = ruim; 0,2 – 0,4 = razoável; 0,4 – 0,6 = boa; 0,6 – 0,8 = muito boa; e 0,8 – 1,0 = excelente.

A comparação dos mapas de solo produzidos com o uso dos algoritmos supracitados foi feita pelo teste Z a 5% de probabilidade. E o mapa final produzido foi validado com uma amostra independente de 118 pontos, coletados em posterior revisita da área.

As covariáveis ambientais, as imagens orbitais e os atributos do solo foram processados nos aplicativos ArcGIS v. 10.1, R 3.1.2, SAGA 2.1.0.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise exploratória

A Tabela 2 mostra a distribuição das unidades de mapeamento em relação às variáveis MDE (elevação), declive e a litologia.

Tabela 2. Unidade de mapeamento na paisagem

Unid.	N	MDE			Declive			Litologia
		Min	Max	Med	Min	Max	Med	Unid
AR	10	257	1614	905	21	87	55	Qc; Qa; Ca; Cb
CX_RY	13	22	661	241	4	27	11	Qc; Qa; O; Ms
GX	21	5	37	18	0	13	3	Qa, Cf
MX	14	120	721	469	0	31	16	Ep; Qc; O; Ca; Cb
NV_RL	8	1284	1711	1539	6	23	49	Qc; Cb
RL	33	10	1762	601	0	68	19	Ep; Qa; Qc; Ep; O; Ca; Ms; Cb
RY	31	6	442	47	0	18	5	Ep; Qa; O; Cf; Cb
TC_MX	4	57	342	200	11	27	19	Ep; Qa; Cb
VE_MX	6	21	630	520	1	24	11	Qc; Qa

Unid. M (unidade de mapeamento); N (número de observação); Min (mínimo); Max (máximo); Med (média); AR: Afloramento rochoso; CX_RY: Cambissolo + Neossolo Flúvico; GX: Gleissolo; MX: Chernossolo; NV_RL: Nitossolo + Neossolo Litólico; RL: Neossolo Litólico; RY: Neossolo Flúvico; VE: Vertissolo; TC_MX: Luvisso + Chernossolo; VE_MX: Vertissolo + Chernossolo. – Qa: aluviões e material detrítico; Bm: basalto; Qc: calcário duro; O: margo-calcário; Cf: flysch, grés e calcário; Ep: marga e margo-calcário; Ms: marga e areia; Cb: rocha vulcano-sedimentar.

Na exploração dos dados pela análise de agrupamento hierarquizado das variáveis, observou-se alta correlação entre mde e cnw (0,97); ndvi e id-clay (0,89) e rsp e vdcn (0,89), conforme apresentado na Tabela 3 e na Figura 2.

Tabela 3. Matriz de correlação entre as covariáveis.

	mde	geol	precip.	cnw	id_clay	rsp	slope	texture	vdcn	flow	wti	ndvi	curv
mde	1												
geol	0,08	1											
precip.	0,83	0,15	1										
cnw	0,97	0,04	0,8	1									
id_clay	-0,22	0,13	-0,06	-0,29	1								
rsp	0,5	0,29	0,53	0,41	0,1	1							
slope	0,54	0,23	0,45	0,52	-0,02	0,57	1						
texture	-0,57	-0,25	-0,57	-0,58	-0,08	-0,46	-0,58	1					
vdcn	0,61	0,35	0,59	0,48	0,07	0,89	0,59	-0,49	1				
flow	0,04	0,11	0,09	0,01	0,16	0,11	-0,02	-0,08	0,11	1			
Wti	-0,36	-0,23	-0,23	-0,31	0,05	-0,51	-0,73	0,31	-0,53	-0,01	1		
ndvi	-0,1	0,16	0,05	-0,18	0,89	0,19	0,01	-0,08	0,19	0,16	-0,04	1	
curv	0,09	0,27	0,08	0,04	0,06	0,19	-0,03	-0,05	0,21	0	-0,4	0,12	1
asp	0,0	-0,03	-0,02	0,03	0	-0,12	-0,2	0,05	-0,14	0,31	0,1	-0,01	0,03

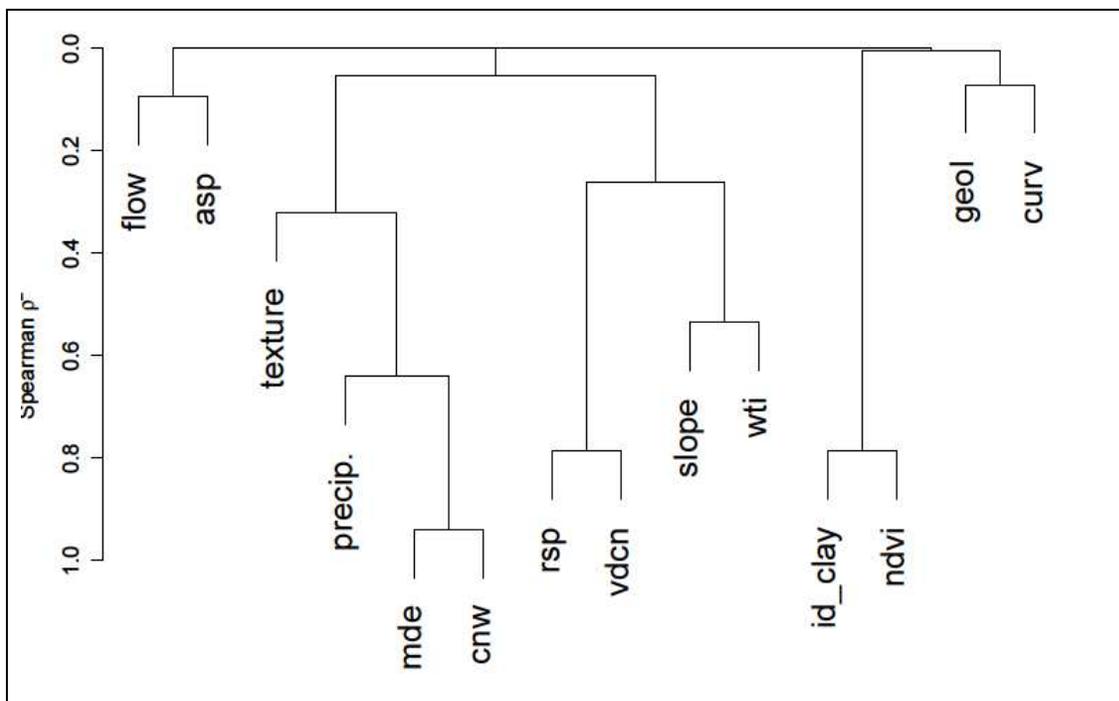


Figura 2. Dendrograma de correlação entre as covariáveis.

3.2 Processo de classificação pela RLG

O teste de *Walds* aplicado ao conjunto de variáveis (14), mostrou que os coeficientes de geologia, chuva, *rsp*, *flow*, *wti*, *curv* e *asp* não foram significativos, revelados pelos p-valores (Tabela 4). Nesta primeira tentativa, os valores dos parâmetros *Residual Deviance* e AIC foram de 233.0 e 473.0, respectivamente. Após a remoção das variáveis com coeficientes não significativos, foi obtido um modelo com apenas 6 variáveis preditoras, sendo menos significativa a covariável “*vdcn*”. Assim, os parâmetros *Residual Deviance* e AIC foram 291,1 e 403,1. Neste sentido, foi escolhido o modelo reduzido (6 variáveis) por ser mais simples, além de ter os coeficientes significativos na maioria dos casos (Tabela 5).

Tabela 4. Resumo dos p-valores dos coeficientes pelo teste de Walds (Z test) e parâmetros do modelo

	Intercepto	mde	geol	precip.	cnw	id_clay	rsp	slope	texture	vdcn	flow	wti	ndvi	curv	asp
CX_RY	0,000	0,000	0,807	0,179	0,000	0,000	0,983	0,017	0,000	0,000	0,394	0,694	0,000	0,146	0,830
GX	0,000	0,000	0,133	0,229	0,000	0,000	0,031	0,285	0,000	0,000	0,174	0,293	0,000	0,044	0,526
MX	0,000	0,000	0,831	0,000	0,000	0,000	1,000	0,100	0,000	0,000	0,200	0,575	0,000	0,949	0,960
NV_RL	0,000	0,000	0,451	0,143	0,000	0,000	0,951	0,000	0,000	0,000	0,752	0,203	0,000	0,320	0,000
RL	0,000	0,000	0,395	0,675	0,000	0,000	0,969	0,004	0,000	0,000	0,359	0,695	0,000	0,132	0,906
RY	0,358	0,001	0,499	0,022	0,001	0,000	0,961	0,003	0,002	0,001	0,218	0,181	0,000	0,558	0,297
TC_MX	0,000	0,000	0,865	0,262	0,000	0,000	0,987	0,495	0,000	0,000	0,036	0,015	0,000	0,004	0,175
VE_MX	0,000	0,122	0,746	0,000	0,203	0,000	0,940	0,044	0,000	0,141	0,225	0,173	0,000	0,265	0,067
AIC							473,0								
<i>Residual Deviance</i>							233,0								

Tabela 5. Resumo dos p-valores dos coeficientes de Walds (Z test) e parâmetros do modelo reduzido

	Intercepto	mde	precip.	Texture	vdcn	wti	ndvi
CX_RY	0,000	0,024	0,942	0,000	0,078	0,033	0,000
GX	0,000	0,000	0,158	0,000	0,229	0,005	0,000
MX	0,000	0,000	0,000	0,000	0,517	0,025	0,000
NV_RL	0,000	0,491	0,000	0,000	0,160	0,113	0,000
RL	0,000	0,201	0,373	0,000	0,044	0,020	0,000
RY	0,000	0,000	0,176	0,000	0,718	0,003	0,000
TC_MX	0,000	0,089	0,141	0,000	0,052	0,004	0,000
VE_MX	0,000	0,172	0,042	0,000	0,604	0,019	0,000
AIC				403,1			
<i>Residual Deviance</i>				291,1			

3.3 Importância das Covariáveis e parâmetros do classificador RF

Na seleção das covariáveis pelo índice de Gini, foi verificado que as variáveis Rede de canais (cnw), MDE, chuva, índice de argila e posição relativa do declive (*Relative Slope Position*), foram as mais relevantes para predizer as classes de solos (**Figura 3**). Este resultado parece consistente com o que normalmente vem sendo reportado na literatura, em que a altitude é a variável mais comumente usada no mapeamento digital de solos (McBratney et al., 2003).

Por outro lado, observou-se que a curvatura, a direção do fluxo, o aspecto e a geologia são pouco importantes na explicação da variabilidade espacial das unidades pedológicas.

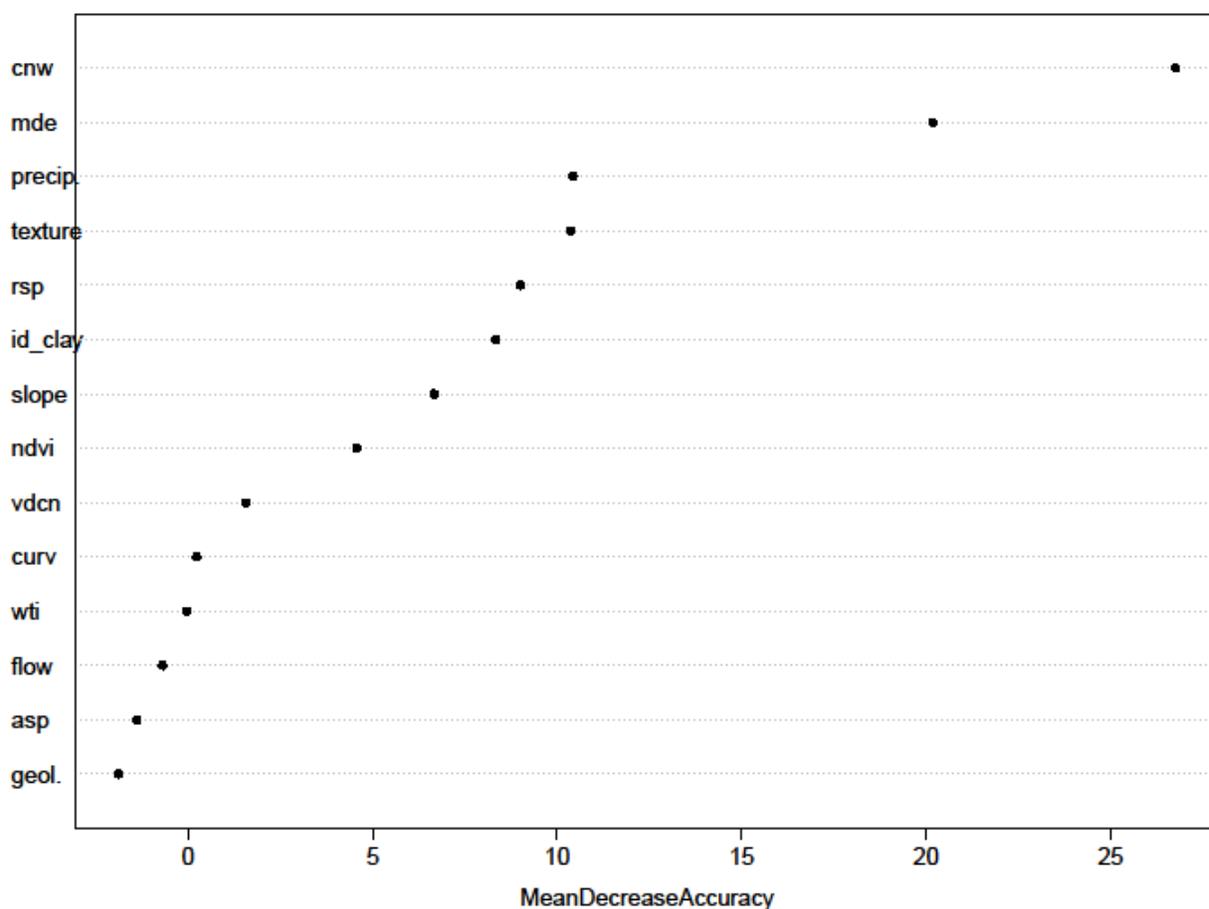


Figura 3. Ordem de importância das covariáveis.

Legenda- cnw: rede de canais; tst: *Terrain surface texture*; mde: modelo digital de elevação; precip.: precipitação; vdcn: *vertical distance to channel network*; rsp: *relative slope position*; slope: declive; id_clay: índice de argila; asp: aspecto; ndvi: índice da diferença normalizada; wti: índice de umidade topográfica; curv: curvatura; flow: direção do fluxo; geol: geologia.

Determinaram-se os parâmetros do classificador *Random Forest* com base na acurácia e na minimização dos erros. Neste pré-processamento, retiramos as três últimas variáveis que supostamente não contribuem ao desempenho do classificador. Assim sendo, por meio da técnica de pré-processamento, verificou-se que o melhor modelo foi o com nove variáveis preditoras ou $mtry=9$ conforme apresentado na Tabela 6; e erro de OOB (*out-of-bag*) após o processamento foi de 56.43%.

Tabela 6. Parâmetros do algoritmo *Random Forest* por validação cruzada CV 10-fold)

Mtry	Accuracy	Kappa	Accuracy SD	Kappa SD
2	0,4469643	0,3303921	0,1118421	0,131975
3	0,4460714	0,3287472	0,1135153	0,132711
4	0,4387225	0,3221033	0,1228697	0,143136
5	0,4391987	0,3235778	0,1476302	0,176313
7	0,4402244	0,3254899	0,135353	0,158617
8	0,4330815	0,3169339	0,1249569	0,147257
9	0,4479167	0,3342708	0,1480079	0,177431
11	0,4407738	0,3269113	0,129199	0,151623

3.4 Comparação dos classificadores

As matrizes de confusão (Tabelas 7 e 8) refletem o desempenho dos classificadores RLG e RF. Verificou-se que a Regressão Logística apresentou melhor desempenho, com índice de exatidão global de 0,56 e índice Kappa de 0,47. Para *Random Forest*, foram encontrados valores de exatidão global e índice Kappa de 0,44 e 0,33, respectivamente.

Devido à baixa representatividade da unidade UM8 (TC_MX: Luvissole + Chernossolo), o classificador RF não conseguiu classificá-la. Este fato deve-se ao processo de separação aleatória das observações, em que o número de amostras no treinamento e na validação interna às vezes não envolve o uso das classes de menor representatividade em ambos os processos.

A qualidade da classificação, segundo Landis e Koch (1977), pode ser caracterizada como boa para o classificador Regressão Logística, e como razoável para o algoritmo *Random Forest*. Vale ressaltar que os valores de Kappa se aproximam com os encontrados por Hengl e Rossiter (2007) que verificaram índice kappa de 0,58 para locais montanhosos e de 0,39 para áreas planas.

Tabela 7. Matriz de confusão obtida para o classificador RLG.

	UM1	UM2	UM3	UM4	UM5	UM6	UM7	UM8	UM9	Ac. Prod.(%)
UM1	5	0	0	1	2	3	0	0	0	50
UM2	0	3	0	1	0	1	0	0	0	24
UM3	0	0	15	0	0	0	4	0	0	72
UM4	0	1	0	6	0	3	0	0	0	43
UM5	1	0	0	0	5	2	0	0	0	63
UM6	4	5	0	4	1	18	2	1	3	55
UM7	0	3	6	1	0	5	24	2	1	78
UM8	0	0	0	0	0	1	0	1	0	25
UM9	0	1	0	1	0	0	1	0	2	34
Ac. usuário (%)	46	60	79	60	63	48	58	50	40	
Exatidão global	0,56									
Kappa	0,47									

Ac. usuário: acurácia do usuário; Ac. usuário: acurácia do produtor; UM1: afloramento de rocha; UM2: Cambissolo+Neossolo Flúvico; UM3: Gleissolo; UM4: Chernossolo; UM5: Nitossolo+Neossolo Litólico; UM6: Neossolo Litólico; UM7: Neossolo Flúvico; UM8: Luvisolo+Chernossolo; UM9: Vertissolo+Chernossolo.

Tabela 8. Matriz de confusão obtida para o classificador RF.

	UM1	UM2	UM3	UM4	UM5	UM6	UM7	UM8	UM9	Ac. Prod.(%)
UM1	5	0	0	0	0	4	0	0	0	40
UM2	0	3	0	3	0	4	3	0	3	31
UM3	0	0	13	0	0	1	8	0	0	67
UM4	0	1	0	4	0	3	0	1	0	29
UM5	2	0	0	0	5	3	0	0	0	63
UM6	3	4	0	6	3	13	2	2	1	37
UM7	0	4	8	0	0	4	17	1	1	59
UM8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
UM9	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
Ac. usuário (%)	45	24	64	45	50	36	53	0	0	
Exatidão global	0,44									
Kappa	0,33									

Ac. usuário: acurácia do usuário; Ac. usuário: acurácia do produtor; UM1: afloramento de rocha; UM2: Cambissolo+Neossolo Flúvico; UM3: Gleissolo; UM4: Chernossolo; UM5: Nitossolo+Neossolo Litólico; UM6: Neossolo Litólico; UM7: Neossolo Flúvico; UM8: Luvisolo+Chernossolo; UM9: Vertissolo+Chernossolo.

Ao analisar a matriz de erro, é possível verificar que o maior confundimento está relacionado com às unidades de mapeamento UM2 e UM6 devido à posição comum ocupada por essas unidades. Observação parecida foi feita por ten Caten et al. (2011).

O teste estatístico *Z* aplicado na comparação dos classificadores revelou diferença estatisticamente significativa entre os índices Kappa, com valor *Z* de 1,98 ao nível de confiança de 95% (Tabela 9). Diante disso, o mapa de solos (Figura 4) foi produzido pelo classificador RLG, o qual apresentou melhor desempenho.

Tabela 9. Comparação da estatística da matriz de confusão para os dois classificadores

Algoritmo	Exatidão global	Kappa	Variância Kappa
Random Forest	0,44	0,33	0,002477
Regressão Logística	0,56	0,47	0,002492
Teste Z do índice Kappa			
	Random Forest		Regressão Logística
Random Forest	0,00		1,98*
Regressão Logística			0,00

*valor *Z* calculado significativo a 95%.

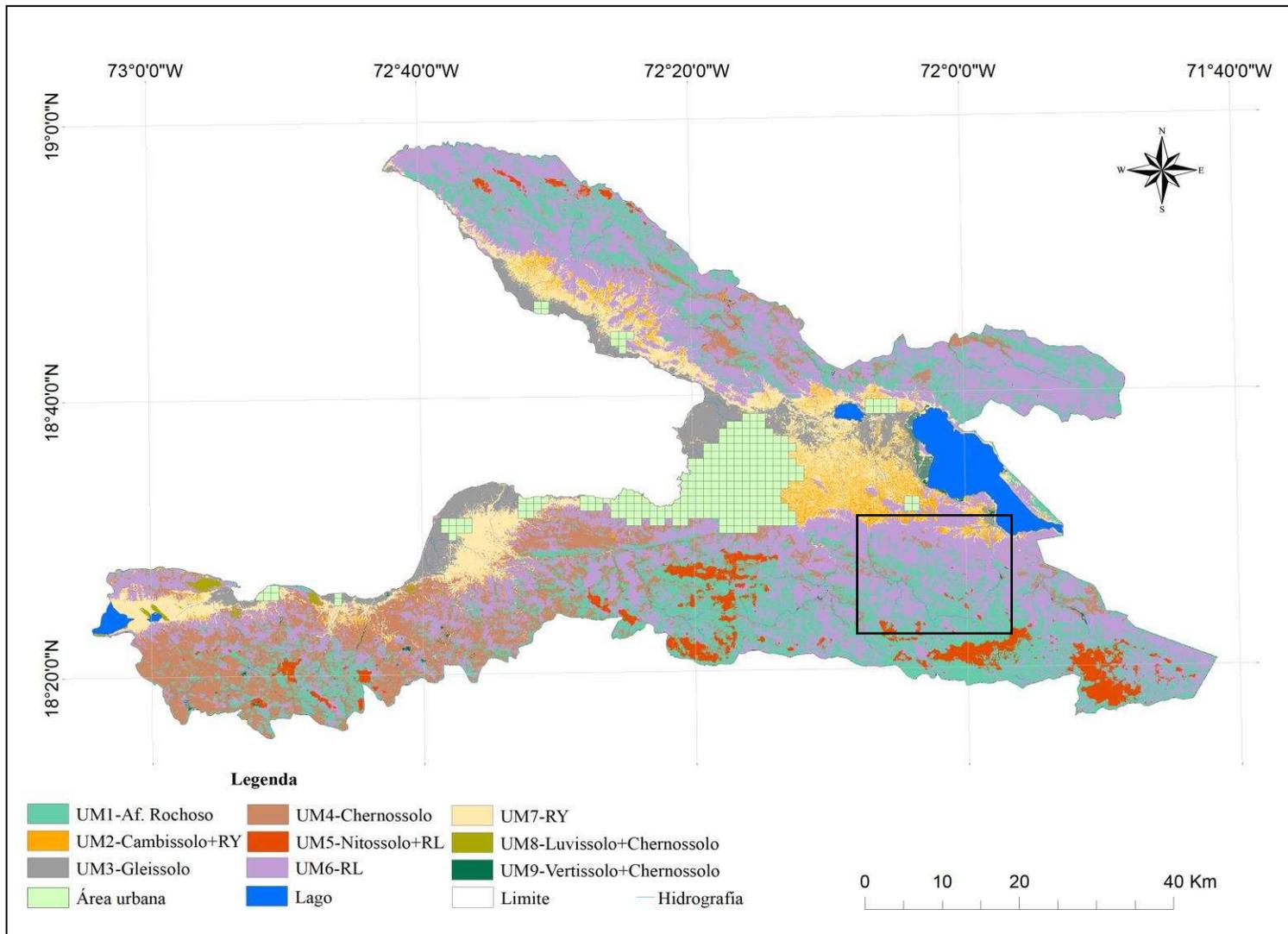


Figura 4. Mapa obtido pela Regressão Logística

Legenda traduzida pelo Soil Taxonomy: UM1= Rock outcrop; UM2= Inceptisols+Fluents; UM3= Aqualfs; UM4= Mollisols; UM5= Oxisols+Entisols; UM6= Entisols; UM7= Fluents; UM8= Alfisols +Mollisols; UM9= Vertisols+Mollisols.

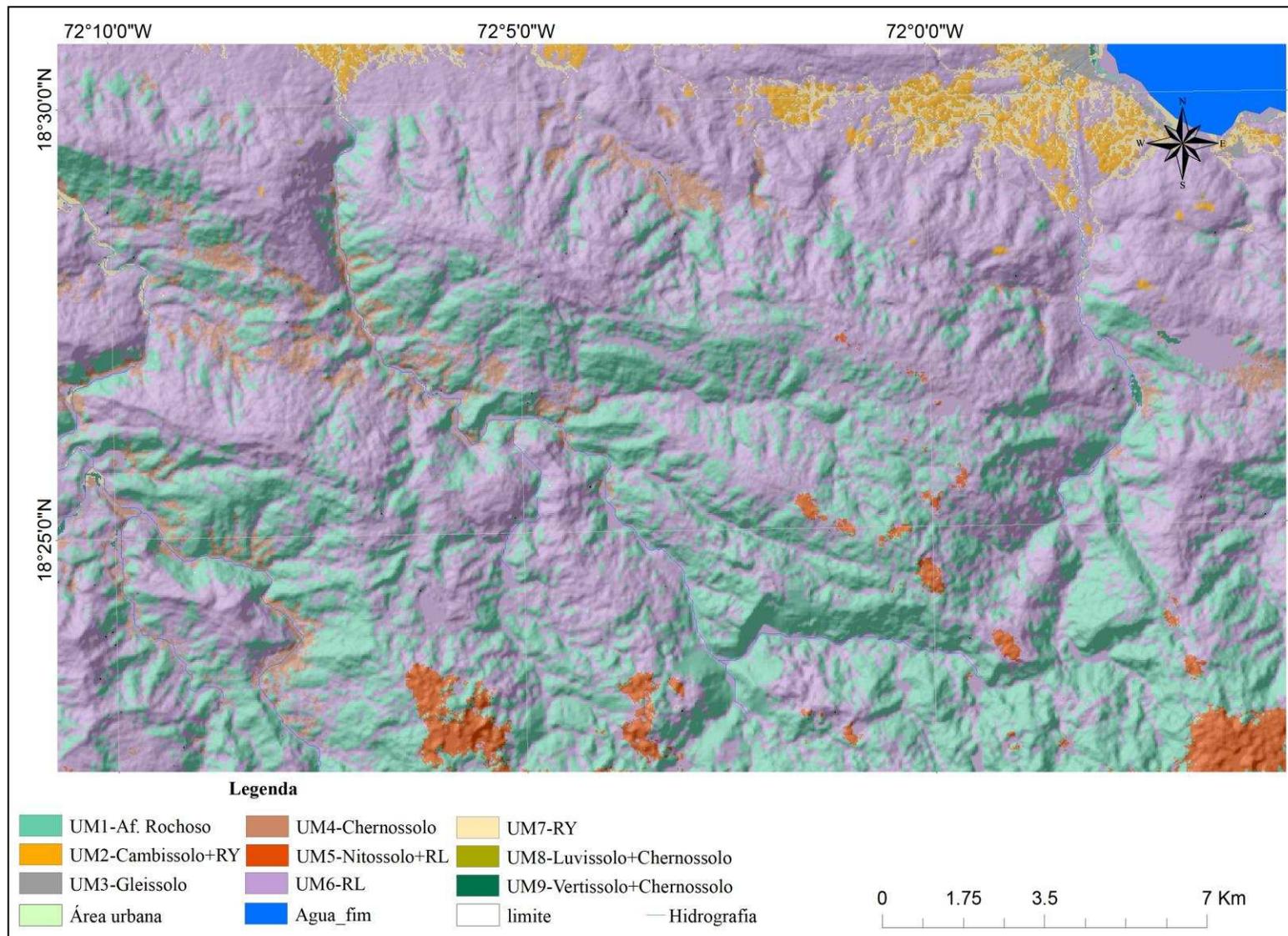


Figura 5. Detalhe do mapa obtido pela Regressão Logística conforme área demarcada na Figura 4.

3.5 Validação do mapa

O mapa de solos gerados a partir do algoritmo Regressão logística foi validado com uma amostra de 118 pontos independentes, conforme descrito no item 2.4. As características dos pontos são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10. Características da amostra de validação na paisagem

Unid.	N	MDE			Declive			Litologia
		Min	Max	Med	Min	Max	Med	Unid
AR	5	216	1661	851	6	46	24	Cb, Ca, Qc, Ep
CX_RY	14	28	631	108	0	40	9	Qa, Ms, Cb
GX	12	5	47	20	0	14	4	Qa, Cf
MX	5	19	723	411	2	29	18	Qc, Qa
NV_RL	10	1486	1739	1580	1	43	24	Cb, Qc
RL	28	26	1604	521	0	46	22	Cb, Qc, O, Ms
RY	36	6	176	44	0	17	5	Qa, Ms, Cf
TC_MX	2	47	60	54	0	18	9	Qa
VE_MX	6	47	666	542	0	15	8	Qa, Qc, Bm

Neste processo de validação, foram verificados índice Kappa de 0,49 e exatidão global de 0,59 (Tabela 11). Com base no valor do índice Kappa encontrado, a qualidade da classificação é qualificada de boa segundo Landis e Koch (1977). Percebe -se pela acurácia do produtor que 100% das unidades UM1 e UM5 foram classificadas corretamente no mapa como tal; e contrariamente, a unidade UM9 não aparece no processo de validação. Observou-se ainda pela acurácia do usuário que os pixels classificados como UM1, UM2 e UM4 representam apenas 40% da verdade de campo. Apenas as classes UM5 e UM6 foram acertadas respectivamente com 80% e 79% dos valores verdadeiros, denotando menor confundimento em relação às outras classes.

Tabela 11. Matriz de confusão na validação do mapa

	UM1	UM2	UM3	UM4	UM5	UM6	UM7	UM8	UM9	Ac. Prod
UM1	2	0	0	0	0	0	0	1	2	58
UM2	0	6	2	0	0	1	4	1	0	45
UM3	0	0	7	0	0	0	5	0	0	39
UM4	0	0	1	2	0	2	0	0	0	67
UM5	0	0	0	0	8	2	0	0	0	86
UM6	0	0	0	3	0	22	0	2	1	73
UM7	0	0	12	0	0	2	21	1	0	59
UM8	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
UM9	0	1	1	1	0	3	0	0	0	34
Ac. usuário	45	31	59	40	67	93	59	0	17	
Exatidão global	0,58									
Kappa	0,49									

UM1= Af. Rochoso; UM2= Cambissolo+Neossolo Flúvico; UM3= Gleissolo; UM4= Chernossolo; UM5= Nitossolo+Neossolo Litólico; UM6= Neossolo Litólico; UM7= Neossolo Flúvico; UM8= Luvisolo+Chernossolo; UM9= Vertissolo+Chernossolo.

A **Tabela 12** a seguir mostra que as unidades UM6 e UM1 correspondendo respectivamente a Neossolo Litólico e Afloramento rochoso representam 54,5% da superfície total da região de estudo. Isto confirma uma vez mais que os solos da região são jovens, manifestando pouca influência dos processos pedogenéticos devido à preponderância da morfogênese. A unidade de mapeamento UM9, sendo associação entre Vertissolo e Chernossolo, é pouco expressiva com percentual de 0,3%.

Tabela 12. Área ocupada por cada unidade de mapeamento

Unidade de	Área (km ²)	Área (%)
UM1	950,8	22,1
UM2	105	2,4
UM3	260	6,0
UM4	572	13,2
UM5	149	3,5
UM6	1395	32,4
UM7	547	12,7
UM8	17	0,4
UM9	14,5	0,3
Total	4010,3	93,2
Área Urb.	158,2	3,7
Lago	131,2	3,0

UM1= Af. Rochoso; UM2= Cambissolo+Neossolo Flúvico; UM3= Gleissolo; UM4= Chernossolo; UM5= Nitossolo+Neossolo Litólico; UM6= Neossolo Litólico; UM7= Neossolo Flúvico; UM8= Luvisso+Chernossolo; UM9= Vertisol+Chernossolo.

4 CONCLUSÕES

- Dentre as covariáveis preditoras utilizadas, a altitude apresentou melhor poder discriminatório dos solos e conseqüentemente confirmam a importância do fator relevo na distribuição espacial dos solos na região. Por outro lado, a baixa importância da litologia neste processo de mapeamento pode decorrer da sua baixa variabilidade, pois o calcário ocupa mais de 65% da litologia da região.
- Os dois classificadores utilizados apresentaram potencial para discriminar e mapear os solos da região de forma satisfatória; sendo melhor o desempenho da Regressão Logística.
- A forte relação solo-relevo explica a separação das unidades de mapeamento de forma satisfatória mesmo com tamanho amostral reduzido.
- A ausência de mapa de solos no Haiti pode ser preenchida pelo uso das técnicas do MDS, pois este se mostrou promissora considerando as características ambientais da região.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRESTI, A. (2002). Front matter, in *Categorical Data Analysis*, Second Edition, **John Wiley & Sons**, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/0471249688.fmatter
- BACON, S.N., MCDONALD, E.V., DALLDORF, G.K., BAKER, S.E., SABOL, D.E., MINOR, T.B., BASSETT, S.D., MACCABE, S.R., BULLARD, T.F. Predictive Soil Maps Based on Geomorphic Mapping, Remote Sensing, and Soil Databases in the Desert Southwest. **In: Digital Soil Mapping**. 2010. p 411-421.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, n. 24, p. 43-69, 1979.
- BOCKHEIM, J. G. Solution and use of chronofunctions in studying soil development. **Geoderma**, v. 24, n., p. 71–85, 1980.
- BOUMA, J. Using Soil Survey Data for Quantitative Land Evaluation. In: Stewart, B. A. *Advances in Soil Science*. Vol. A. New York: **Springer**, 1989. p 177 – 211.
- BREIMAN, L. Random Forest. *Machine Learning*, 45, 5–32, 2001.
- BURROUGH, P. A. Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment. **Clarendon Press**, Oxford. 193p. 1986. ISBN 019854 564 0.
- BURROUGH, P. A., MCDONELL, R. A. Principles of Geographical Information Systems. **Oxford University Press**, New York, 190 pp. 1998.
- CARVALHO JUNIOR , W. De; CHAGAS, C. S. DA; FILHO, E. I. F.; VIEIRA, C. A.; SCHAEFER; C. E. G.; BHERING, S. B.; FRANCELINO, M. R. Digital soilscape mapping of tropical hillslope areas by neural networks. **Scientia Agricola**. v.68, n.6, p.615-707, 2011.
- CHAVES, A. D., ROCHA, M. F., PEREIRA, M. G. **Solos e aptidão agrícola das terras nas seções comunais do Mapou, Collines dès chênes e Pichon**. 2010. 101p. Dissertação (Mestrado em ciência do solo), Instituto de Agronomia / Curso de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo - UFRRJ, Seropédica.
- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. New-York: **Lewis Publishers**, 1999. 136 p.
- DECKERS, J.; SPAARGAREN, O.; DONDEYNE, S. **Soil survey as a basis for land evaluation**. 2002. <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C19/E1-05-02-01.pdf>.
- DIAFAS, I.; PANAGOS, P.; MONTANARELLA, L. Willingness to Pay for Soil Information Derived by Digital Maps: A Choice Experiment Approach *Vadose Zone J.* 2013. 12:–. doi:10.2136/vzj2012.0198.
- DOBOS, E., CARRÉ, F., HENGL, T., REUTER, H.I., TÓTH, G. Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps. EUR 22123 EN, 68 pp. 2006. **Office for Official Publications of the European Communities**, Luxemburg.

FIGUEIREDO, S. R., GIASSON, E.; TORNQUIST, C. G.; NACIMENTO, P., C. Multiple logistic regression applied to soil survey in Rio Grande do Sul State, Brazil. **RBCS**, 32: 2779-2785. 2008.

FOODY, G. M. Thematic map comparison: evaluating the statistical significance of differences. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 70: 627–633. 2004.

GRIMM, R., BEHRENS, T., MÄRKER, M., & ELSENBEER, H. (2008). Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—digital soil mapping using Random Forests analysis. **Geoderma**, 146(1), 102-113.

GROVE, C. I., HOOK, S. J., PAYLOR, E. D. III. Laboratory reflectance spectra of 160 minerals, 0.4 to 2.5 micrometers. **Pasadena**, CA: Jet Propulsion Laboratory. 1992.

HEMPEL, J.W., HAMMER, R.D., MOORE, A.C.; BELL, J.C.; HOMPSON, J.A. T.; GOLDEN, M.L. Challenges to Digital Soil Mapping. In: Alfred E. Hartemink Alex McBratney Maria de Lourdes Mendonça-Santos. Digital Soil Mapping with Limited Data. **Springer**, Dordrecht. 2008. pp81-90.

HENGL, T.; ROSSITER, D. G. Supervised landform classification to enhance and replace photo-interpretation in semi-detailed soil survey. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 6, p. 1810-1822, 2003.

HIJMANS, R.J., S.E. CAMERON, J.L. PARRA, P.G. JONES AND A. JARVIS. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 25, p. 1965-1978, 2005.

HOSMER, D.W.; LEMESHOW, S. Applied logistic regression. New York: **John Wiley & Sons**, 1989. 307p.

IWAHASHI, J. & PIKE, R.J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. **Geomorphology**, Vol. 86, p. 409–440. 2007.

JENNY, H. Factors of Soil Formation. **McGraw-Hill**, New York. 1941, 281p.

JENSON, S. K., DOMINGUE, J. O. Extrating topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.

LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A.B., 2007. Chapter 1. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for Digital Soil Mapping. In: P. LAGACHERIE, A.B. MCBRATNEY AND M. VOLTZ (Editors), Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective. **Developments in Soil Science**, v. 31. Elsevier, Amsterdam, p. 3–24.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, vol. 33, n. 1, p.159-174, 1977.

LEMOS, R. C. de; SANTOS, R. D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 4. ed. Viçosa: **SBCS**, 2002. 83 p.

- MCBRATNEY, B.A.; MENDONÇA-SANTOS, L.M. & MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v.117, p.3-52, 2003.
- MOONJUN, R.; FARSHAD, A.; SHRESTHA, D.P.; VAIPHASA, C. Artificial Neural Network and decision trees in predictive soil mapping of Hoi Num Rin sub-watershed Thailand. In: JANIS L. BOETTINGER, DAVID W. HOWELL, AMANDA C. MOORE, ALFRED E. HARTEMINK, SUZANN KIENAST-BROWN. Digital Soil Mapping: Bridging Research, Environmental Application, and Operation. **Progress in Soil Science**, p 151-164, 2010.
- MOORE I.D.; GRAYSON R.B.; LADSON A.R. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Process**, p.3–30, 1991.
- MORAL, P. Le paysan Haïtien : Étude sur la vie rurale en Haïti. **G. P. Maisonneuve & Larose**. 1961. 375p.
- O. CONRAD. SAGA GIS System for Automated Geoscientific Analyses. 2002. <http://www.saga-gis.org>.
- PENNOCK, D.J.; VELDKAMP, A. Advances in landscape - scale soil research. In: **Geoderma**, 133, 2006. 1-2 pp. 1-5
- ROUSE, J.W., JR., R.H. HAAS, J.A. SCHELL, AND D.W. Deering. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep. RSC 1978-1, **Remote Sensing Center**, Texas A&M Univ., College Station. . 1973, 93p. (NTIS No. E73-106393).
- RUNGE, E. C. A., Soil development sequences and energy models. **Soil Sci.** 115, p. 183–193. 1973.
- S.J. BAXTER AND D.M. CRAWFORD. Incorporating Legacy Soil pH Databases into Digital Soil Maps. In: Alfred E. Hartemink, Alex McBratney, Maria de Lourdes Mendonça-Santos. Digital Soil Mapping with Limited Data. **Springer**, Netherlands., p. 311-318, 2008.
- SCULL, P.; FRANKLIN, J. & CHADWICK, O.A. The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape. **Ecol. Model.**, 181:1-15, 2005.
- SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O. A. & MCARTHUR, D. Predictive soil mapping: A review. **Prog. Phys. Geogr.**, v. 27, p. 171-197, 2003.
- SIMONSON, R. W. Outline of a generalized theory of soil genesis. **Soil Sci. Soc. Am**, v. 23, p. 152–156, 1959.
- SOMMER, M.; GERKE, H. H.; DEUMLICH, D. Modelling soil landscape genesis — a “time split” approach for hummocky agricultural landscapes. **Geoderma**, v. 145, n. 3, p. 480-493, 2008.
- STRAHLER, A. Geografia Física. Barcelona: **Omega**. 1974, 550 p.
- TAN, K. H. Principles of soil chemistry. **CRC Press**, 2010. 390p.

ten CATEN, A; DALMOLIN, R. S.; PEDRON, F. A.; MENDOÇA-SANTOS, M. DE L. Regressões logísticas múltiplas: fatores que influenciam sua aplicação na predição de classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência d solo**. V.35, p.53-62, 2011.

WHITE, R. E. Principles and practice of soil science: The soil as a natural resource. 4th ed. **Wiley-Blackwell**. 384p. ISBN: 978-0-632-06455-7.

WILSON, J. P., GALLANT, J. C. Terrain analysis : Principles and Applications. **Jonh Wily & Sons**. 2000.

WOODRING, W.P., J.S. BROWN, AND W.S. BURBANK. Geology of the Republic of Haiti. Department of Public Works, Baltimore, Maryland: **Lord Baltimore Press**. 1924. 631p.

ANEXO

Perfil 1

DESCRIÇÃO GERAL

Data: 19/06/2014

Classificação: P1- NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico Fragmentário, textura argilosa, floresta xerófila, relevo suave ondulado.

Localização, município e coordenadas: Arcahaie (Carriès), Oeste, 18Q743440_2095890

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: Coletado em mini trincheira em terço inferior, com declive suave ondulado, sob agricultura.

Altitude: 26 m

Litologia, formação geológica e cronologia: Calcário Eoceno

Material originário: Sedimentos quaternários.

Pedregosidade: pedregoso

Rochosidade: ligeiramente rochoso

Relevo local: suave ondulado

Relevo regional: forte ondulado a montanhoso

Erosão: moderada

Drenagem: bem drenado

Vegetação primária: Floresta xerófila

Uso atual: Agricultura com bananeira, milho, feijão

Descrito e coletado por: Wesly e Márcio.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap 0-50 cm; bruno-amarelado (10YR 5/4); argila; fraca, pequena, blocos subangulares; dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana e clara.

R 50 – 80+

Observações: pedras distribuídas ao longo do perfil.



Perfil 2

DESCRIÇÃO GERAL

Data: 19/06/2014

Classificação: NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico carbonático, textura média, floresta xerófila, relevo plano.

Localização, município e coordenadas: Boucassin, Cabaret, Oeste, 18Q771212_2074454.

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: Coletado em baixada, com declive plano, sob bananeira.

Altitude: 36 m

Litologia, formação geológica e cronologia: Sedimentos Quaternários

Material originário: Sedimentos provenientes de calcários.

Pedregosidade: não pedregoso

Rochosidade: não rochoso

Relevo local: plano

Relevo regional: Suave ondulado a ondulado

Erosão: laminar ligeira

Drenagem: moderadamente drenado

Vegetação primária: Floresta xerófila

Uso atual: Agricultura com bananeira

Descrito e coletado por: Wesly e Márcio.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap 0-10 cm; cinzento-brunado-claro (2,5Y 6/2); Franco-argilo-siltosa; fraca, pequena, blocos subangulares; macia, friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
- C1 10-22 cm; cinzento-brunado-claro (2,5Y 6/2); Franco-argilo-siltosa; fraca pequena blocos subangulares que se desfazem em grão simples, macia, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição plana e difusa.
- C2 22-34 cm; bruno-amarelado-claro (2,5Y 6/4); Franco-argilo-siltosa; fraca pequena blocos subangulares que se desfazem em grão simples, macia, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição plana e difusa.
- C3 34-45+ cm; bruno-amarelado-claro (2,5Y 6/4); Franco-argilo-siltosa; fraca pequena blocos subangulares que se desfazem em grão simples, macia, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.



Perfil 3

DESCRIÇÃO GERAL

Data: 19/06/2014

Classificação: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico léptico, textura argilosa, floresta xerófila, relevo Suave ondulado.

Localização, município e coordenadas: 2^{ème} Des Vases, Arcahaie, Oeste, 18Q757257_2084538

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: Coletado em terço inferior perto de canal de drenagem com declive suave ondulado, sob pastagem.

Altitude: 65 m

Litologia, formação geológica e cronologia: Calcário

Material originário: Sedimentos quaternários.

Pedregosidade: pedregoso

Rochosidade: não rochoso

Relevo local: Suave ondulado

Relevo regional: Suave ondulado a ondulado

Erosão: laminar ligeira

Drenagem: moderadamente drenado

Vegetação primária: Floresta xerófila

Uso atual: Pastagem

Descrito e coletado por: Wesly e Márcio.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- | | |
|----|--|
| Ap | 0-18 cm; cinzento-brunado-claro (2,5Y 6/2); franco-argilosa; fraca, pequena, granular; ligeiramente dura, ligeiramente friável, não plástica e não pegajosa; transição ondulada e clara. |
| Bi | 18-40 cm; cinzento-brunado-claro (2,5Y 6/2); argila; fraca, pequenos blocos subangulares; macia, friável, não plástica e não pegajosa, transição ondulada e clara. |
| C | 40-80+ cm; cinzento-brunado-claro (2,5Y 6/3); N/A ⁶ ; fraca, pequenos blocos subangulares; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa. |



⁶ Não foi analisado

Perfil 4

DESCRIÇÃO GERAL

Data: 19/06/2014

Classificação: CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico, textura mádia/argilosa, Floresta de Pinus, relevo ondulado.

Localização, município e coordenadas: Kenscoff, Oeste, 18Q786954_2040227

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: Coletado em corte de estrada em terço médio, com declive ondulado, sob pinheiro

Altitude: 1671 m

Litologia, formação geológica e cronologia: Calcário, formação Dumisseau

Material originário: Calcário.

Pedregosidade: não pedregoso

Rochosidade: ligeiramente rochoso

Relevo local: ondulado

Relevo regional: forte ondulado a montanhoso

Erosão: moderada

Drenagem: moderadamente drenado

Vegetação primária: Floresta de Pinus

Uso atual: Pousio com prévio cultivo de hortaliças

Descrito e coletado por: Wesley e Márcio.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap	0-20 cm; bruno-escuro (7,5YR 4/3); franco-argilosa; moderada, pequena, blocos angulares; ligeiramente dura, firme, plástica e pegajosa; transição ondulada e gradual.
Bi	20-50 cm; bruno (7,5YR 5/2); franco-argilosa; moderada, pequena, blocos angulares; dura, firme, plástica e pegajosa.

Perfil 5

DESCRIÇÃO GERAL

Perfil n° 369 ou P1B

Data: 24/06/2014

Classificação: P5- GLEISSOLO HÁPLICO Sódico, textura média, floresta xerófila, relevo plano

Localização, município e coordenadas: Plaine du Cul-de-Sac, (Rte Duvivier), Oeste, 18Q784544_2063047.

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: Coletado em baixada, com relevo plano, lavoura de milho e banana).

Altitude: 10 m

Litologia, formação geológica e cronologia: Sedimentos fluvio-aluviais Quaternários

Material originário: Sedimentos.

Pedregosidade: não pedregoso

Rochosidade: não rochoso

Relevo local: plano

Relevo regional: plano a suave ondulado

Erosão: não aparente

Drenagem: muito mal drenado

Vegetação primária: Floresta xerófila

Uso atual: Banana e pastoreio

Descrito e coletado por: Wesly e Márcio.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap** 0-38 cm; cinzento-escuro (10YR 4/1); franco-argilo-siltosa; maça, dura, firme, plástica e pegajosa; transição ondulada e clara.
- Cg** 38-60 cm; bruno-acinzentado (2,5Y 5/2); franco-argilo-siltosa; fraca, maça, maça; dura, firme, plástica e pegajosa.



Perfil 6

DESCRIÇÃO GERAL

Data: 23/06/2014

Classificação: P6- GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típicos, textura argilosa, floresta mesófila, relevo plano

Localização, município e coordenadas: Perto da RN2, 1^{ère} Dessources, Léogâne, Oeste, 18Q750052_2044361.

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: Coletado por tradagem em baixada, com declive plano, sob canavial.

Altitude: 22 m

Litologia, formação geológica e cronologia: materiais detríticos, formação Rivière Gauche

Material originário: Sedimentos.

Pedregosidade: não pedregoso

Rochosidade: não rochoso

Relevo local: plano

Relevo regional: Suave ondulado a ondulado

Erosão: laminar ligeira

Drenagem: moderadamente drenado

Vegetação primária: Floresta mesófila

Uso atual: Agricultura com bananeira e cana de açúcar

Descrito e coletado por: Wesly.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap	0-30 cm; bruno-escuro (10YR 3/3); argila; forte, pequena, granular; dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
Cg	30-55+ cm; cinzento muito escuro (10YR 3/1); N/A; maça; muito dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa.

Perfil 7

DESCRIÇÃO GERAL

Data: 01/02/2014

Classificação: CHERNOSSOLO RENDZICO Lítico típico (MDI), textura argilosa/muito argilosa, floresta mesófila, relevo ondulado

Localização, município e coordenadas: Petit-Goâve, 7^{ème} Des Platons, 18Q720822_2033721.

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: Coletado em corte de estrada em terço superior, com declive ondulado, lavoura de milho.

Altitude: 546 m

Litologia, formação geológica e cronologia: Calcário com intrusão de materiais de origem vulcânica

Material originário: Calcário duro.

Pedregosidade: não pedregoso

Rochosidade: ligeiramente rochoso

Relevo local: ondulado

Relevo regional: ondulado a forte ondulado

Erosão: moderada

Drenagem: bem drenado

Vegetação primária: Floresta mesófila

Uso atual: Agricultura com bananeira

Descrito e coletado por: Wesly

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap** 0-15 cm; bruno-escuro (7,5YR 3/1); argila; forte, pequena, granular; dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
- B** 15-23 cm; bruno (7,5YR 3/1); Muito argila; forte, média, blocos subangulares; dura, firme, plástica e pegajosa.



Perfil 8

DESCRIÇÃO GERAL

Data: 07/02/2014

Classificação: LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico, textura arenosa/muito argilosa, Floresta mesófila relevo ondulado

Localização, município e coordenadas: 7ème Platon, Petit-Goâve, Oeste, 18Q720292_2035722

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: Coletado em trincheira terço inferior, com declive plano, sob bananeira.

Altitude: 232 m

Litologia, formação geológica e cronologia: Calcário Formação Dumisseau, Cretáceo

Material originário: Sedimentos de calcário e materiais vulcânicos.

Pedregosidade: não pedregoso

Rochosidade: não rochoso

Relevo local: ondulado

Relevo regional: forte ondulado a montanhoso

Erosão: laminar ligeira

Drenagem: moderadamente drenado

Vegetação primária: Floresta mesófila

Uso atual: Agricultura com bananeira

Descrito e coletado por: Wesly.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap	0-20 cm; bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4); franco-arenosa; moderada, pequena, blocos subangulares; ligeiramente dura, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição Gradual ondulada.
Bt	20-45 cm; bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2); muito argilosa; forte, média, blocos angulares; muito dura, muito firme, plástica e pegajosa; transição plana e gradual.

Perfil 9

DESCRIÇÃO GERAL

Data: 19/06/2014

Classificação: NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico, textura muito argilosa, floresta de Pinus, relevo ondulado

Localização, município e coordenadas: Kenscoff, Oeste, 18Q787360_2040729.

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: Coletado em corte de estrada, com declive ondulado, sob pinheiro.

Altitude: 1711 m

Litologia, formação geológica e cronologia: Roches vulcano-sedimentares, formação Dumisseau do Cretáceo

Material originário: calcário

Pedregosidade: não pedregoso

Rochosidade: não rochoso

Relevo local: ondulado

Relevo regional: forte ondulado a montanhoso

Erosão: moderada

Drenagem: bem drenado

Vegetação primária: Floresta de Pinus

Uso atual: Agricultura com hortaliças

Descrito e coletado por: Wesly e Márcio.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- | | |
|----|--|
| Ap | 0-22 cm; bruno-avermelhado (2,5YR 4/4); muito argilosa; moderada, média, blocos angulares; cerosidade pouco e fraca, dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana e difusa. |
| B1 | 22-50 cm; bruno-avermelhado (2,5YR 4/4); muito argilosa; forte, média, blocos angulares; muito dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana e difusa. |
| B2 | 50-110 cm; vermelho-escuro (2,5YR 3/6); muito argilosa; moderada, média, blocos subangulares, cerosidade pouca e fraca; muito dura, muito firme, plástica e pegajosa |
| B3 | 100-135+ cm; |



Perfil 10

DESCRIÇÃO GERAL

Data: 19/06/2014

Classificação: - NITOSSOLO VERMELHO Epieutrófico típico, textura muito argilosa, floresta de Pinus, relevo ondulado

Localização, município e coordenadas: Soucaille, Kenscoff, Oeste, 18Q787162_2040936.

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: Coletado perto da pista principal em corte de estrada, com declive ondulado, sob pinheiro.

Altitude: 1641 m

Litologia, formação geológica e cronologia: Roches vulcano-sedimentares, formação Dumisseau do Cretáceo

Material originário: calcário

Pedregosidade: não pedregoso

Rochosidade: não rochoso

Relevo local: ondulado

Relevo regional: forte ondulado a montanhoso

Erosão: forte

Drenagem: bem drenado

Vegetação primária: Floresta de Pinus

Uso atual: Agricultura com hortaliças

Descrito e coletado por: Wesly e Márcio.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- B1 0-40 cm; vermelho-escuro (2,5YR 3/6); muito argilosa; moderada, média, blocos angulares; cerosidade pouco e fraca, dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana e difusa.
- B2 40-90 cm; bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 2,5/4); muito argilosa; forte, média, blocos angulares; muito dura, muito firme, plástica e pegajosa; transição plana e difusa.
- B3 90-135+ cm; vermelho (2,5YR 4/6); muito argilosa; forte, média, blocos subangulares, cerosidade pouca e fraca; muito dura, muito firme, plástica e pegajosa

Raízes: finas e poucas médias no horizonte B1.

Observações: O horizonte A já foi truncado devido à erosão; presença de fendas



Perfil 11

DESCRIÇÃO GERAL

Data: 19/06/2014

Classificação: P11- VERTISSOLO HÁPLICO Órtico gleissólico, textura argilosa/média, floresta xerófila, relevo plano.

Localização, município e coordenadas: Micheaux, Croix-des-Bouquets, Oeste, 18Q786781_2079054.

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: Coletado perto da pista em mini trincheira em baixada, com declive plano, sob lavoura de milho.

Altitude: 620 m

Litologia, formação geológica e cronologia: Calcário com intrusão de basalto nefelínico

Material originário: Sedimentos quaternários.

Pedregosidade: não pedregoso

Rochosidade: não rochoso

Relevo local: plano

Relevo regional: ondulado a forte ondulado

Erosão: laminar ligeira

Drenagem: Imperfeitamente drenado

Vegetação primária: Floresta xerófila

Uso atual: Agricultura com milho

Descrito e coletado por: Wesly

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap 0-40 cm; bruno-escuro (7,5YR 3/1); argila; forte, grande, blocos angulares; muito dura, muito firme, plástica e muito pegajosa; transição irregular e gradual.
- Cvg 40-65+ cm; bruno-forte (7,5YR 6/3); franco-argilo-arenosa; grande, blocos angulares; muito dura, muito firme, plástica e muito pegajosa.



Classe	Hor,	Cor	prof, cm	A	S	Arg	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB	H ⁺ + Al ³⁺	CTC	V %	MO dag/dm ³	P mg/dm ³
				dag/kg				cmolc/dm ³			mg/dm ³						
CHERNOSSOLO EBÂNICO Carbonático típico	Ap	2,5YR3/1	0-15	27	13	60	8,5	69,8	9,6	351	230	81,3	0,0	81,3	100	2,2	12
	Bk	2,5YR2/2	15-34+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CAMBISSOLOS HÁPLICOS Ta Eutróficos típico	Ap	7,5YR4/4	0 – 20	36	33	31	8,3	107,5?	5,8	156	115	114,2	0,0	114,2	100	3,5	4
	B1	7,5YR4/3	20 – 38	20	25	55	8,6	47,3	1	117	230	49,6	0,0	49,7	100	1,1	2,5
	B2	7,5YR4/3	38-80+	28	25	47	7,8	53,5	16,7	156	92	71,0	0,0	70,9	100	3,4	17,2
	BC		80-110+							0	0	0,0		78,3			
CHERNOSSOLO EBÂNICO Órtico típico	Ap	5YR3/2	0-18	28	21	51	7,5	30,6	4,9	390	69	36,8	0,0	36,8	100	4,5	7
	B	5YR4/2	18-45+	25	18	57	7,4	47,9	5,7	273	92	54,7	0,0	54,7	100	0,9	1,5
CAMBISSOLO HÁPLICO TA Eutrófico carbonatico	Ap	7,5YR4/4	0-26	43	35	22	8,1	46,3	4,7	156	115	51,9	0,0	51,9	100	2,2	5,6
	Bk		26-41+							0	0	0,0					
CHERNOSSOLO RÊNDZICO Lítico típico	Ap	2,5YR3/2	0-25	23	27	50	7,3	36,4	5,3	195	115	42,7	0,0	42,8	100	4,9	19,1
	Ck	2,5YR3/3	25-42	35	29	36	7,5	29,8	7,1	156	115	37,8	0,0	37,8	100	4,5	7
	R		42-55+														
NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico	Ap	10YR6/3	0-16	61	29	10	8,1	44,7	3,5	78	92	48,8	0,0	48,8	100	2,2	7,9
	C		16-30							0	0	0,0					
NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico	Ap	2,5YR3/2	0-10	37	17	46	7,4	31,8	2	273	69	34,8	0,0	34,8	100	3,8	30,8
	B1	2,5YR3/2	10-30	19	25	56	7,6	35	1,5	351	161	38,1	0,0	38,1	100	3,4	41,5
	B2	2,5YR3/2	30-51+	33	19	48	7,6	39,5	1,3	234	92	41,8	0,0	41,9	100	3,6	31,1
NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico	Ap	2,5YR3/2	0-22	15	21	64	6	12,9	0,4	156	69	14,0	0,0	14,0	100	4,2	5,8
	B1	2,5YR3/2	22-50	9	17	74	5,6	5,2	0,2	117	368	7,3	0,8	8,1	90	1,8	1,6
	B2	2,5YR3/2	50-110+	5	13	82	4,6	3,2	0,2	117	69	4,0	1,3	5,3	75	1,1	3,6
	BC	2,5YR3/2	110+							0	0						
NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico Típico	Ap	5YR3/2	0-18	11,2	71,3	17,5	7,3	59,8	2,5	234	138	63,5	0,0	63,6	100	7,1	4
	C		18-38+							0	0	0,0					
VERTISSOLO HÁPLICO Carbonático típico	Ap	7,5YR3/1	0-40	23	35	42	7,4	39,1	25,3	156	92	65,2	0,0	65,2	100	3,3	13,3
	Cv1	7,5YR6/3	40-65	59	15	26	7,7	30	26,2	117	92	56,9	0,0	57,0	100	0,4	23
	Cv2	7,5YR7/3	65-77+							0	0	0,0					
CHERNOSSOLO EBÂNICO Órtico típico	Ap	10YR4/2	0-20	54	4	42	7,5	43	5,4	273	92	49,5	0,0	49,5	100	5,6	7
	AB	7,5YR4/3	20-45	22	36	42	8,2	105,5?	13	195	69	119,3	0,0	119,3	100	1,7	2,4
	B		45+	22	70	8	8,3	111?	13,8	234	92	125,8	0,0	125,8	100	1,6	2,8
CHERNOSSOLO EBÂNICO Órtico típico	Ap	7,5YR3/2	0-15	18	42	40	7,3	43,8	22,9	156	92	67,5	0,0	67,5	100	3,3	3,3
	Bt	7,5YR4/3	15-40	23	15	62	7,5	85,3?	6,9	234	69	93,1	0,0	93,1	100	3,6	1
	BC	7,5YR3/6	40-60+							0	0						
CHERNOSSOLO HÁPLICO Carbonáico Léptico	Apk	7,5YR4/2	0-20	29	25	46	7,6	78,1?	10,8	1209	69	92,3	0,0	92,3	100	4,3	24,2
	C		20-35+							0	0	0,0					
VERTISSOLO EBÂNICO Carbonático típico	Apk	10YR4/2	0-15	53	17	30	6,9	17,4	6,9	117	115	25,1	0,0	25,2	100	2,7	2,1
	Cvk1	10YR2/1	15-50	57	17	26	7	12,4	5,2	117	69	18,2	0,0	18,3	99	1,9	2,5
	Cvk2	10YR2/1	50+	28	8	64	6,3	17,6	11,9	117	92	30,2	0,0	30,2	100	1,7	1,3

Classe	Hor,	Cor	prof, cm	A	S dag/kg	Arg	pH	Ca ²⁺ cmolc/dm ³	Mg ²⁺ mg/dm ³	K ⁺ mg/dm ³	Na ⁺ mg/dm ³	SB	H ⁺ + Al ³⁺ cmolc/dm ³	CTC	V %	MO dag/dm ³	P mg/dm ³
CAMBISSOLO HÁPLICO TA Eutrófico carbonatico	Ap	7,5YR2,5/1	0-30	20	31	49	6,8	25,2	12,4	156	92	38,4	0,0	38,3	100	8,1	8,6
	Bi		30-55+							0	0	0,0					
NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico Típico	Ap	7,5YR5/4	0-16	34	21	45	7,8	26,4	13,8	195	115	41,2	0,0	41,2	100	3,1	11,7
	C		16-34+							0	0	0,0					
NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico Típico	Ap	10YR5/2	0-20	36	21	43	9,7	9,7	2,9	81,9	90,62	54,1	0,0	54,1	100	2,2	43,9
	C1	10YR7/2	20-46	25	41	35	7,5	4,6	0,6	62,4	80,73	41,9	0,0	42,0	100	1,1	15,6
CAMBISSOLO HÁPLICO TA Eutrófico carbonatico	Ap	10YR4/2	0-15	27	37	36	7,7	79,8	8,4	234	138	89,4	0,0	89,4	100	2,2	3,1
	B1	10YR3/2	15-30	32	42	26	7,8	84,9	8,4	195	230	94,8	0,0	94,8	100	1,4	8,7
CHERNOSSOLO EBÂNICO Órtico típico	Ap	7,5YR3/1	0-18	18	21	61	7,8	80,1	5,4	195	115	86,5	0,0	86,5	100	3,3	1,2
	B	7,5YR3/3	18-38+	34	11	55	7,7	74	1,3	195	92	76,2	0,0	76,3	100	1,5	0,7
CHERNOSSOLO EBÂNICO Órtico típico	Ap	N2/	0-20	27	15	59	7,8	78,7	0,4	117	92	79,8	0,0	79,8	100	3,5	1,2
	B	7,5YR4/1	20-35	33	29	39	8	69,5	0,3	156	115	70,7	0,0	70,7	100	2,5	0,7
CHERNOSSOLO EBÂNICO Órtico típico	Ap	N2,5/	0-30	20	18	62	7,7	54,8	1,9	195	92	57,6	0,0	57,6	100	5,5	5,3
	B		30-50+							0	0	0,0					
NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico Típico	Ap	7,5YR3/1	0-18+	22	17	61	8	41,6	1,6	156	92	44,0	0,0	43,9	100	6,5	1
NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico Típico	Ap	10YR4/2	0-20	50	31	19	8,2	41,3	6,4	156	161	48,8	0,0	48,7	100	2,2	7,7
	C	10YR4/3	20-38+	36	35	29	8,1	47,7	6,9	117	184	55,7	0,0	55,7	100	1,8	2,1
LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico	Ap	10YR4/4	0-20	60	23	17	7,9	47	5,5	117	92	53,2	0,0	53,3	100	1	2,8
	Bt	10YR4/2	20-45+	15	16	69	7,9	63,9	7,7	156	115	72,5	0,0	72,5	100	2	1,9
CAMBISSOLO HÁPLICO TB CARBONÁTICO	Ap	10YR5/5	0-25	25	41	34	7,8	54,4	5,6	195	69	60,8	0,0	60,8	100	4,3	5,9
	Bi	10YR4/8	25-70+	33	21	46	7,5	16,8	3,1	117	207	21,1	0,0	21,1	100	1,1	0,7
CHERNOSSOLO EBÂNICO Órtico típico	Ap	2,5YR3/1	0-22	31	3	67	8,1	85,2	2,9	78	138	88,9	0,0	88,9	100	5,5	0,9
	B	2,5YR3/2	22-38							0	0	0,0					
CHERNOSSOLO EBÂNICO Órtico típico	Ap	7,5YR2/2	0-18	20	29	52	7,9	65,8	2,8	156	92	69,4	0,0	69,4	100	4,6	1,5
	AC	7,5YR3/2	18-30	21	34	46	7,5	42,2	1,5	117	69	44,3	0,0	44,2	100	1,9	4,4
CHERNOSSOLO EBÂNICO Órtico típico	Ap	7,5YR3/3	0-21	21	28	52	6,8	19,5	9,2	156	69	29,4	0,0	29,4	100	2,8	3,1
	B	7,5YR3/2	21-36							0	0	0,0					
CAMBISSOLO HÁPLICO TA Eutrófico carbonatico	Ap	7,5YR4/3	0-20	16	28	56	7,9	50	3,1	195	69	53,9	0,0	53,8	100	5,9	1,3
	AB	7,5YR4/4	20-40	25	20	56	8,2	96,4?	4,1	117	69	101,1	0,0	101,2	100	2,5	1,6
	Bik	7,5YR5/6	40+	25	20	56	8,2	81,8	3,2	117	69	85,6	0,0	85,6	100	1,8	4
NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico Típico	Ap	2,5YR4/2	0-25	15	18	68	7,4	70,8	11,8	195	92	83,5	0,0	83,5	100	6,5	2,1
	C	2,5YR6/5	25-41+							0	0	0,0					
NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico carbonático	Ap	2,5YR 5/4	0-22	10	29	61	7,85	37,79	10,62	234	108,79	48,8	3,1	91,9	94	5,07	59,10
	C	2,5YR 6/6	22-34+														
GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típicos	Ap	10YR 3/3	0-30	42	3	56	8,3	64,3	1,8	156	184	67,3	0,0	67,2	100	3,6	0,7
	Cg	10YR 2/2	30-55+							0	0	0,0					
GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típicos	Ap	10YR3/2	0-15	17	18	66	8,2	94,8	9,2	195	115	105,0	0,0	104,9	100	3,6	1
	Cg	10YR2/2	15-32+							0	0	0,0					

Classe	Hor,	Cor	prof, cm	A	S dag/kg	Arg	pH	Ca ²⁺ cmolc/dm ³	Mg ²⁺ mg/dm ³	K ⁺ mg/dm ³	Na ⁺	SB	H ⁺ + Al ³⁺ cmolc/dm ³	CTC	V %	MO dag/dm ³	P mg/dm ³	
NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico Típico	Ap	2,5YR6/4	0-20	16	41	43	8,2	46,5	2,8	156	92	50,1	0,0	50,1	100	3,5	5	
		2,5YR5/3	20-38+							0	0	0,0						
NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico Típico	Ap	7,5YR4/5	0-17	16	29	55	8,3	57,5	3,4	624	92	62,9	0,0	63,0	100	4,9	0,7	
		C	7,5YR4/4	17+						0	0	0,0						
VERTISSOLO EBÂNICO Carbonático típico	Ap	7,5YR3/1	0-15	34	19	47	7,9	49,1	2	195	115	52,1	0,0	52,1	100	6,7	2,2	
		Cv	7,5YR3/3	15-35+	22	19	59	8,5	81	31,2	273	253	114,0	0,0	114,1	100	4,3	9,2
CAMBISSOLO HÁPLICO TA Eutrófico carbonatico	Ap	10YR4/3	0-30	20	29	51	7,4	21,6	8,4	195	92	30,9	0,0	30,9	100	5,9	12,6	
		E	10YR6/6	30-55	42	9	49	8,6	37,5	8,8	156	138	47,3	0,0	47,4	100	1,1	25,5
		Bt	10YR3/4	55+	42	5	53	8,8	45,2	22,4	156	138	68,6	0,0	68,6	100	0,4	15
NEOSSOLOS FLÚVICOS Carbonáticos típicos	Ap	10YR3/3	0-20	42,0	3,0	55,0	8,3	64,3	1,8	156	184	67,3	0,0	67,2	100	3,6	0,7	
		C1	10YR6/7	30-36	10,5	40,0	49,5	8,3	22	3,9	156	92,0	26,7	0,0	26,7	100	2,4	0,7
		C2	10YR7/7	36-63+	38,4	21,4	40,2	8,5	21,1	4,2	156	92,0	25,7	26,1	51,8	49,6	10	
NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico carbonático	Ap	5YR7/2	0-18	21	43	36	8,2	43,1	7,4	1326	506	56,1	0,0	56,1	100	3,6	27,4	
		C	5YR7/5	18-42+	37	37	26	9,5	20,2	8,1	351	19,7	37,8	0,0	37,8	100	0,5	1
CAMBISSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico	Ap	2,5Y7/2	0-26	19	31	50	8,0	46,9	13,6	234	21,6	70,5	0,0	70,4	100	2,9	18,8	
		Bi	2,5Y7/4	26-50	45	21	34	8,9	17,9	7,8	156	22,3	35,8	0,0	35,7	100	0,7	1,5
		C	2,5Y7/4	50-81+							0	0	0,0					
NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos Típico	Ap	7,5YR5/2	0-14	23	27	50	8,3	23,9	3,4	78	184	28,3	0,0	28,4	100	3,4	1	
		C	7,5YR5/5	14-35+							0	0	0,0					
CAMBISSOLO HÁPLICO TA Eutrófico carbonatico	Ap	10YR4/3	0-18	33	17	50	8,4	32,9	2,6	195	69	36,3	0,0	36,4	100	5,8	3,7	
		Bi	10YR5/5	18-46	19	39	42	8,5	32,7	2,9	78	69	36,1	0,0	36,1	100	2,6	1,6
CHERNOSSOLO RÊNDZICO Litico típico	Ap	N/2	0-18	55	9	36	8,2	50,2	3,4	546	69	55,3	0,0	55,4	100	7,2	8	
		Bi	7,5YR3/1	18-26	49	7	44	8,3	54,2	2,3	117	69	57,1	0,0	57,1	100	6,1	1,8
		R		26-40+														
NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos Típico	Ap	10YR6/3	0-16	19	35	46	8,3	36,5	1,4	117	69	38,5	0,0	38,5	100	5,3	4,9	
		AC	10YR7/3	16-40	31	23	46	8,1	32,9	1,4	117	69	34,9	0,0	34,8	100	4,2	4,1
		C	10YR8/4	40-53+	19	25	56	8,4	22,3	0,7	39	69	23,4	0,0	23,5	100	0,5	1,2
CHERNOSSOLO EBÂNICO Ôrtico típico	Ap	7,5YR3/2	0-28	23	21	56	8	65,8	4,7	390	92	71,9	0,0	71,9	100	7,1	23	
		B	7,5YR3/3	28-46+	19	21	60	8,4	45,4	3,1	156	115	49,4	0,0	49,4	100	6,3	8,6
CHERNOSSOLO EBÂNICO Ôrtico típico	Ap	7,5YR3/1	0-22	17	23	60	8,4	36,6	3,2	234	69	40,7	0,0	40,7	100	6,5	15,1	
		B	7,5YR2,5/2	22-45	21	18	61	8,2	33,5	5,1	78	69	39,1	0,0	39,0	100	4,1	10,4
CHERNOSSOLO RENDZICO Litico típico	Ap	7,5YR3/2	0-15	11	35	54	7,98	34,05	9,08	23,4	108	43,5	0,2	43,7	100	5,70	33,2	
		B	7,5YR3/3	15-23	10	29	61	7,85	37,79	10,62	54,6	113	48,8	3,1	91,9	94	5,07	59,1
CHERNOSSOLO EBÂNICO Ôrtico típico	Ap	2,5YR2/2	0-18	18	45	38	8,3	20,5	9,5	39	69	30,4	0,0	30,5	100	2,8	6,1	
		B	2,5YR3/3	18-32							0	0	0,0					

			cm		dag/kg		cmolc/dm ³		mg/dm ³		cmolc/dm ³	%	dag/dm ³	mg/dm ³			
VERTISSOLO EBÁNICO Carbonático típico	Ap	7,5YR2/2	0-16	30	23	48	8,4	54,2	9,4	39	92	64,1	0,0	64,1	100	2,9	3,6
	Cvk	7,5YR2/1	16-40+	26	27	48	7,3	19,5	8,8	39	69	28,7	0,0	28,7	100	3,1	1,6
CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico carbonático	Ap	2,5Y4/4	0-15	22	24	54	7,5	19,9	8,3	78	69	28,7	0,0	28,7	100	4,3	9,6
	BiK	2,5Y3/4	15-36	25	17	58	7,2	12,7	4	39	69	17,1	0,0	17,1	100	3,6	4,6
	Btk	2,5Y5/4	36-50+	28	15	58	7,3	11,1	4,1	39	92	15,7	0,0	15,7	100	1,1	1,3
CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico carbonático	Ap	10YR4/4	0-20	30	17	54	6,5	17,2	5	39	69	22,6	0,0	22,7	100	3,8	1
	Bik	10YR7/4	20-38	32	7	62	6,4	17,9	6,3	78	92	24,8	0,0	24,8	100	2,4	1,3
	BC	10YR8/5	38-54+							0	0						
NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos Típico	Ap	5YR5/4	0-26	29	17	54	7,2	11,4	3,6	78	69	15,5	0,0	15,5	100	2,8	15,4
	C	5YR6/6	26-40+							0	0	0,0					
NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos Típico	Ap	5YR4/3	0-16	39	21	40	7,7	46,6	2,5	273	46	50,0	0,0	50,0	100	7,8	7
	C	5YR6/4	16-35+							0	0	0,0					
VERTISSOLO EBÁNICO Carbonático típico	Ap	7,5YR3/2	0-30	39	17	44	8,2	23,6	7,8	78	69	31,9	0,0	31,9	100	4,7	2,8
	Cvk	7,5YR2/1	30-55	27	15	58	7,1	16,6	13	39	69	30,0	0,0	30,0	100	2	0,9
GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típicos	Ap	10YR3/2	0-18	31	21	48	8,2	22,7	0,6	117	184	24,4	0,0	24,4	100	3,8	1,9
	Cg	10YR23/3	18-42	43	17	40	8,1	27,7	0,7	78	207	29,5	0,0	29,5	100	4,2	0,9
NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico carbonático	A	7,5YR5/2	0-15	25	29	46	7,7	18,7	1,2	273	69	20,9	0,0	20,9	100	4,6	1,8
	C1	7,5YR7/4	15-40	17	25	58	7,9	15	1,9	156	69	17,6	0,0	17,7	99	1,3	1,9
	C2	7,5YR7/4	40-56+							0	0	0,0					
CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico léptico	Ap	7,5YR4/1	0-15	35	15	50	8,3	25,7	0,9	78	69	27,1	0,0	27,1	100	6,9	0,7
	AC	7,5YR3/1	15-24	57	1	42	8,3	21,7	0,5	39	69	22,6	0,0	22,7	100	5,5	1
NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos típico	Ap	10YR5/4	0-20	37	23	40	8	48,4	3,3	156	46	52,3	0,0	52,3	100	2	1,8
	AC	10YR6/4	20-35	45	27	28	8,2	53,8	3,4	39	115	57,8	0,0	57,8	100	1,4	1,2
	C	10YR6/6	35+	26	33	41	8,3	31,3	3	78	69	34,8	0,0	34,9	100	0,4	1,3
CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico léptico	Ap	7,5YR7/4	0-20	19	23	58	7,8	20,8	1,8	78	69	23,1	0,0	23,2	100	2,4	2,5
	Bi	7,5YR5/4	20-48	17	23	60	8,4	28,2	2,7	78	92	31,5	0,0	31,5	100	0,7	1,6
	C	7,5YR5/4	48-65+	16	13	71	8,5	42,9	5,1	117	92	48,7	0,0	48,7	100	0,7	0,7
CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico léptico	Ap	10YR5/3	0-35	48	19	33	8,1	21	1,5	312	69	23,6	0,0	23,6	100	4,9	3
	Bi	10YR5/4	35-45	44	19	37	8,1	20	1,3	156	69	22,0	0,0	22,0	100	3,3	1,6
NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico carbonático	A	7,5YR7/1	0-15	22	33	45	8,2	11,2	1,2	390	69	13,7	0,0	13,8	99	3,7	8,3
	C1	7,5YR6/3	15-22	34	35	31	8,4	14,5	0,9	78	69	15,9	0,0	15,9	100	2,4	0,9
	C2	7,5YR6/5	22-34+							0	0						
NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico carbonático	C1	10YR 5/5	0-15	36	35	29	8,4	1,3	0,4	89,7	78	37,9	0,0	37,9	100	1,1	40,6
	C2	10YR 5/6	15-28	46	23	31	8,6	1,8	0,6	50,7	62	30,9	0,0	30,9	100	0,7	22,4
CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico típico	AP	7,5YR4/4	0-15	28	21	51	7,7	17,9	7,8	78	69	26,2	0,0	26,3	100	4,2	1,5
	Bi	7,5YR6/4	15-36	30	15	55	7,8	12,7	3,6	78	92	16,9	0,0	16,9	100	3,6	0,6
	C		36-53+							0	0						

Classe	Hor,	Cor	prof, cm	A	S dag/kg	Arg	pH	Ca ²⁺ cmole/dm ³	Mg ²⁺ cmole/dm ³	K ⁺ mg/dm ³	Na ⁺ mg/dm ³	SB	H ⁺ + Al ³⁺ cmole/dm ³	CTC	V %	MO dag/dm ³	P mg/dm ³
NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico carbonático	C1	10YR6/3	0-20	70	19	11	8,4	36,7	8,5	39	92	45,7	0,0	45,8	100	0,5	0,9
	C2	10YR7/4	20-34+						0	0							
NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico carbonático	Ap	2,5Y 6/2	0 - 10	15	54	31	8,0	20,3	1,8	169,00	26,40	22,6	0,3	22,9	99	2,91	10,90
	C1	2,5Y 6/2	10 - 22	13	59	28	7,7	25,0	2,1	64,00	29,40	27,3	0,2	27,5	99	2,53	10,50
	C2	2,5Y 6/4	22 - 40	12	56	32	8,0	22,2	2,1	53,00	32,40	24,5	0,3	24,8	99	2,22	10,70
	C3	2,5Y 6/4	40 - 60+	10	58	32	7,6	24,5	2,0	19,00	39,30	26,6	1,2	27,8	96	1,27	15,40
CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico léptico	Ap	2,5Y 6/2	0 - 18	23	40	37	7,7	18,6	0,9	36,00	10,50	19,6	0,2	19,8	99	7,29	7,20
	Bi	2,5Y 6/2	18 - 40	28	30	42	8,0	16,2	1,1	6,00	11,50	17,3	0,2	17,5	99	4,44	6,60
	BC	2,5Y 6/3	40 - 80+							0							
NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico fragmentário	Ap	10YR 5/4	0-50	26	28	46	7,9	18,6	1,0	173,00	21,40	20,2	0,2	20,4	99	6,02	4,20
	R	-	50-80+							0							
GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico Sódico	Ap	10YR 4/1	0 - 38	6	60	34	8,27	32,7	9,9	21,00	435,40	44,6	0,3	44,9	99	4,75	12,70
	Cg1	2,5Y 5/2	38 - 60	15	45	40	8,60	16,2	11,0	3,00	1318,20	33,0	0,2	33,2	99	0,95	1,50
CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico Típico	Ap	7,5YR 4/3	0- 20	36	34	30	6,30	37,7	12,8	163	4025	51,0	3,0	54,0	94	2,53	11,60
	Bi	7,5YR 2,5/2	20 - 50+	30	32	38	7,40	38,1	13,0	99	5382	51,5	4,1	55,6	93	4,44	8,50
NITOSSOLO VERMELHO Episeutrófico típico	Ap		Ausente							0							
	B1	2,5YR 3/6	0 - 40	30	28	70	6,88	11,8	0,3	166	2,6	12,5	4,6	17,1	73	4,82	8,8
	B2	2,5YR 2,5/4	40 - 90	1	22	77	5,25	2,0	0,1	93	0,6	2,3	6,8	9,1	26	5,2	7,9
	B3	2,5YR 4/6	90 - 135+	2	22	76	5,26	2,8	0,1	96	0	3,2	5,8	9,0	36	1,77	4,1
NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos Típico	Ap	10YR4/3	0-25	11	32	58	7,8	45,3	2,2	156	92	48,3	0,0	48,3	100	5,5	4,1
	C	10YR5/5	25-42+														

A= areia; S= silte; Arg= argila,