

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**DEMETRIO ANGELO LAMA ISMINIO**

**PEDOGENESE E PEDOARQUEOLOGIA NO TRANSECTO DA CORDILHEIRA  
DOS ANDES PERUANOS ATÉ AS TERRAS BAIXAS DA AMAZONIA**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2020**

**DEMETRIO ANGELO LAMA ISMINIO**

**PEDOGENESE E PEDOARQUEOLOGIA NO TRANSECTO DA CORDILHEIRA  
DOS ANDES PERUANOS ATÉ AS TERRAS BAIXAS DA AMAZONIA**

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 Scientae*.

Orientador: Carlos Ernesto G.R. Schaefer

Coorientador: Elpidio Inácio F. Filho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

L213p  
2020  
Lama Isminio, Demetrio Angelo, 1986-  
Pedogênese e pedoarqueologia no transecto da Cordilheira dos Andes Peruanos até as Terras Baixas da Amazônia / Demetrio Angelo Lama Isminio. – Viçosa, MG, 2020.  
131 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Solos - Análise. 2. Solos - Formação. 3. Solo de terraço costeiro. 4. Andes, Cordilheira dos, Região. 5. Amazônia.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.

Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.

II. Título.

CDD 22. ed. 631.4


**DEMETRIO ANGELO LAMA ISMINIO**

**PEDOGÊNESE E PEDOARQUEOLOGIA NO TRANSECTO DA CORDILHEIRA  
DOS ANDES PERUANOS ATÉ ÀS TERRAS BAIXAS DA AMAZÔNIA**

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 Scientae*.

APROVADA: 23 de dezembro de 2020.

Assentimento:



---

Demetrio Angelo Lama Isminio  
Autor



---

Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer  
Orientador

A minha mãe, Silvia, ao meu pai, Demétrio;  
Aos meus irmãos, Perley, Percy, Paúl;  
Aos meus sobrinhos, Paulo, Adriano, Fausto, Diego e Valéria  
Ofereço

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde e força para alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, por acreditarem em mim.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento com a bolsa de estudo outorgada.

Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, pela oportunidade e capacitação profissional de realização deste curso.

Ao professor Carlos Schaefer, pela confiança, oportunidade e orientação durante a execução do trabalho, os quais foram fundamentais no meu processo de formação profissional e pessoal

A Christianne, pelo carinho, paciência, a grande ajuda, apoio e companheirismo

Agradeço aos meus amigos, Athos, Gastom, Luis Aníbal, Francis, Rafael Gomes, Nancy, Viviane, Iorrana, Mateus (negão), Rafael Dávila, Juliana, Gustavo que estiveram sempre presentes no meu dia a dia dispostos a trocar algumas palavras.

A todos os professores e técnicos do Departamento de Solos, em especial, Liovando, Victor Hugo e João Ker.

Aos funcionários do Departamento de Solos, Carlinhos, Mauricio, Claudinho, Evandro, Jorge Orlando e Júlio, pela ajuda desinteressada

A Claudinha, pela ajuda nos assuntos burocráticos

A Emanuel Amaral, pelo auxílio no trabalho de campo

A Daví do Vale, pelas sugestões para o aperfeiçoamento do trabalho

A Tatiana, pela ajuda durante o experimento

A Nilton Briceño, pela ajuda na elaboração dos Mapas.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento com a bolsa de estudo outorgada.

## RESUMO

LAMA ISMINIO, Demetrio Angelo., D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2020. **Pedogênese e pedoarqueologia no transecto da Cordilheira dos Andes Peruanos até as Terras Baixas da Amazônia.** Orientador: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer. Coorientador: Elpidio Inácio Fernandes Filho.

Os estudos científicos dos solos concentram-se em três grandes ambientes fisiográficos no Perú: Cordilheira Andina, Faixa Subandina e Peneplanície Amazônica. A tese foi estruturada em dois capítulos, no Capítulo 1 propõe aprofundar o conhecimento dos solos ao longo de uma topolitosequência desde a Cordilheira Oriental Andina de Cusco até as terras baixas da Amazônia em Madre de Dios, no Perú, a partir das suas propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, classificadas de acordo com sistema Soil Taxonomy e WRB/FAO. No Capítulo 2 o estudo concentra-se nos terraços pré-hispânicos localizados nas províncias altas “Altiplanicie” de Cusco, amplamente dominados pela atividade agrícola, que tem como objetivo investigar as propriedades morfológicas, físicas, químicas, mineralógicas e datação por radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ). No Capítulo 3, o estudo foi realizado no Vale Sagrado dos Incas, em Cusco, dominado pela atividade agrícola desde a ocupação do Imperio Inca, que tem como objetivo investigar as propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos. Para todos os Capítulos foram abertas trincheiras e as amostras foram submetidas a análises físico-químicas de rotina, difração de raios-x, dissolução seletiva de ditionito-citrato-bicarbonato, oxalato de amônio e pirofosfato de sódio. No *capítulo 1*, os solos associados aos sedimentos aluviais antigos da Peneplanície Amazônica, apresentaram maior desenvolvimento pedogenético, onde a mineralogia da fração argila foi constituída principalmente por caulinita. Ainda nesta região registrou-se o predomínio de formas cristalinas de óxidos de Fe e Al, em forte contraste com os solos da Faixa subandina e Cordilheira Oriental. Por outro lado, maiores acúmulos de carbono orgânico foram encontrados nas partes mais elevadas da Cordilheira, justificado pela altitude. Os solos foram classificados de acordo com a Soil Taxonomy como Entisols, Inceptisols e Ultisols. De acordo a WRB/FAO, estes foram classificadas como Gleysols, Umbrisols, Acrisols, Fluvisols e Regosols. No *capítulo 2* os horizontes antrópicos encontradas nos terraços agrícolas com influência antrópica marcante, variaram de 20 a 140 cm de espessura, com maiores teores de P comparado com os solos sem influência antrópica marcante. Os valores de P disponível e total atingiram até 1717 e 6724,59 mg kg<sup>-1</sup>, indicando que o prolongado cultivo de solos com adições de adubos orgânicos favorece a sua disponibilidade, além da sua

lixiviação. A data de radiocarbono do carvão, indica uma idade de 4110 +/- 30 BP, sugerindo que seu uso está associado ao período Pré-cerâmico. Por outro lado, a mineralogia da fração argila é constituída principalmente por minerais tipo 2:1, com presença de hematita na região do semiárido localizado nas posições mais baixas de altitude, incluindo presença de formas cristalinas de óxidos de Fe como a hematita. Na atualidade, muitos desses terraços encontram-se abandonados com baixa disponibilidade de fósforo, devido a conquista pelos espanhóis, que marcaram um período de ruptura na construção desses terraços, além da continua migração da população das áreas rurais para as cidades do litoral peruano e amazônica, em busca de melhores oportunidades de trabalho. De acordo com a WRB/FAO, estes terraços são classificados como “Anthrosols”, com horizonte A Tétrico, além de Kastanozems, Phaeozems, e Regosols com características antrópicas (Horizonte A terrico). No entanto, estes solos não se enquadram de forma satisfatória ao sistema Soil Taxonomy. No *Capítulo 3*, os solos encontram-se intensamente cultivados, principalmente com milho, encontrando-se sistemas de terraços ao redor do vale do rio urubamba. Os horizonts antrópicos encontradas variam de 20 a 100 cm de espessura. Esses horizontes apresetam altos teores de P, comparado com o solo sem influência antrópica, indicando um prolongado cultivo desses solos com adições de adubos orgânicos, favorecendo a sua disponibilidade. De modo geral, estes solos apresentam saturação por bases acima de 50% em todos os horizontes, sem presença de carbonatos, principalmente os solos originados de depósitos aluviais advindas das partes das montanhas da Cordilheira de Urubamba. A mineralogia da fração argila de todos os solos, esta composta por filosilicatos 2:1. As analisis da de FRX da fração areia indicam descontinuidades litológicas como observadas no P02 e P04, principalmente no P03, indicando que esse terraço foi construído de um material diferente ao material original. A agricultura moderna que vem sendo desenvolvida atualmente, vem favorecendo o aumento de fósforo disponível nos solos, mãos os níveis de carbono orgânico são baixos, indicando o uso de fertilizantes químicos. De acordo com a WRB/FAO, estes solos são classificados como “Anthrosols”, com horizonte A Tétrico, além de Regosols com características antrópicas.

**Palavras-chave:** Cordilheira dos Andes. Amazônia. Processos pedogenéticos. Terraços Pré-Hispanicos. Solos antrópicos.

## ABSTRACT

LAMA ISMINIO, Demetrio Angelo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2020. **Pedogenesis and Pedoarchaeology in the transect of the Peruvian Andes to the Amazon Lowlands.** Adviser: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer. Co-adviser: Elpidio Inácio Fernandes Filho.

The scientific studies of soils are focused on three major physiographic environments in Peru: the Andean Cordillera, the Subandina Belt, and the Amazonian Peninsula. The thesis was structured into two chapters, the Chapter 1 proposes to deepen the knowledge of the soils along a toponym sequence from the Andean Eastern range of Cusco to the Amazon lowlands in Madre de Dios, Peru, from its morphological, physical, chemical, and mineralogical properties, classified according to the Soil Taxonomy and WRB/FAO system. In Chapter 2 the study focuses on the pre-Hispanic terraces located in the high provinces "Altiplanicie" of Cusco, largely dominated by agricultural activity, which aims to investigate the morphological, physical, chemical, mineralogical properties, and radiocarbon dating ( $^{14}\text{C}$ ). In Chapter 3, the study was carried out in the Sacred Valley of the Incas in Cusco, dominated by agricultural activity since the occupation of the Inca Empire, which aims to investigate the physical, chemical, and mineralogical soil properties. For all Chapters, trenches were opened, and samples were subjected to routine physical-chemical analysis, x-ray diffraction, selective dissolution of dithionite-citrate-bicarbonate, ammonium oxalate and sodium pyrophosphate. For all Chapters, trenches were opened, and the samples were submitted to routine physicochemical analysis, x-ray diffraction, selective dissolution of dithionite-citrate-bicarbonate, ammonium oxalate, and sodium pyrophosphate. In chapter 1, the soils associated with the old alluvial sediments of Peneplanicie Amazonica presented greater pedogenetic development, where the mineralogy of the clay fraction was constituted mainly by kaolinite. Still in this region, the predominance of crystalline forms of Fe and Al oxides was registered, in strong contrast with the soils of the Subandina Belt and Eastern Cordillera. On the other hand, greater accumulation of organic carbon was found in the highest parts of the Cordillera, justified by altitude. The soils were classified according to the Soil Taxonomy as Entisols, Inceptisols, and Ultisols. According to WRB/FAO, these were classified as Gleysols, Umbrisols, Acrisols, Fluvisols and Regosols. In chapter 2 the anthropic horizons found in agricultural terraces with marked anthropic influence, varied from 20 to 140 cm in thickness, with higher P levels compared with soils without marked anthropic influence. The available

and total P values reached 1717 and 6724.59 mg kg<sup>-1</sup>, indicating that the prolonged cultivation of soils with additions of organic fertilizers favors their availability, besides their leaching. The radiocarbon date of coal indicates an age of 4110 +/- 30 BP, suggesting that its use is associated with the Pre-ceramic period. On the other hand, the mineralogy of the clay fraction is composed mainly by 2:1 mineral, with the presence of hematite in the semiarid region located in the lower altitude positions, including the presence of crystalline forms of Fe oxides like hematite. Nowadays many of these terraces are abandoned with low phosphorous availability, due to the Spanish conquest, which marked a period of rupture in the construction of these terraces, in addition to the continuous migration of the population from the rural areas to the cities of the Peruvian and Amazon coasts, in search of better job opportunities. According to WRB/FAO, these terraces are classified as "Anthrosols", with horizon A T rrico, besides Kastanozems, Phaeozems, and Regosols with anthropic characteristics (horizon A terric). However, these soils do not fit satisfactorily with the Soil Taxonomy system. In Chapter 3, the soils are intensively cultivated, mainly with corn, and terrace systems are found around the Urubamba river valley. The anthropic horizons found vary from 20 to 100 cm thick. These horizons present high levels of P, compared to the soil without anthropic influence, indicating prolonged cultivation of these soils with additions of organic fertilizers, favoring its availability. In general, these soils present base saturation above 50% in all horizons, without the presence of carbonates, especially the soils originated from alluvial deposits coming from the mountainous parts of the Cordillera de Urubamba. The mineralogy of the clay fraction of all soils is composed of phyllosilicates 2:1. XRF analysis of the sand fraction indicates lithological discontinuities as observed in P02 and P04, especially in P03, indicating that this terrace was built from a different material than the original. The modern agriculture that is currently being developed has favored the increase of available phosphorus in the soils, but organic carbon levels are low, indicating the use of chemical fertilizers. According to WRB/FAO, these soils are classified as "Anthrosols", with A T rrico horizon, and Regosols with anthropic characteristics.

**Keywords:** Andean Cordillera. Amazon. Pedogenetic processes. Pre-hispanic-terraces. Anthropic soils.

## SUMÁRIO

Introdução geral.....	12
Referências bibliográficas .....	13
<b>CAPÍTULO I</b> .....	15
<b>SOLOS DE UMA TOPOLOTOSSEQUÊNCIA DA CORDILHEIRA ORIENTAL AS TERRAS BAIXAS DA AMAZÔNIA PERUANA</b> .....	15
<b>RESUMO</b> .....	16
<b>ABSTRACT</b> .....	17
1. Introdução.....	18
2. Materiais e métodos.....	19
2.1. Área de estudo .....	19
2.2. Amostragem e classificação.....	21
2.3. Análises físicas e químicas .....	21
2.4. Análises mineralógicas .....	24
3. Resultados.....	24
3.1. Propriedades do solo .....	24
3.1.1. Peneplanície Amazônica.....	24
3.1.3. Caracterização Mineralógica .....	30
4. Discussão.....	39
4.1. Implicações climáticas, interações pedogeomorfológicas e a influência litológica ..	39
4.2. Análises da dissolução seletiva.....	42
4.3. Processos pedogenéticos associados a toplotosequência.....	44
5. Conclusões.....	45
Agradecimentos .....	46
Referencias .....	46
<b>CAPÍTULO II</b> .....	56
<b>PEDOARQUEOLOGIA NOS TERRAÇOS PRÉ-HISPANICOS DE CUSCO</b> .....	56
<b>RESUMO</b> .....	57
<b>ABSTRACT</b> .....	58
1. Introdução.....	59
2. Materiais e Métodos .....	60

2.1.	Área de estudo .....	60
2.2.	Amostragem e classificação.....	61
2.3.	Análises físicas e químicas .....	61
2.4.	Análises mineralógicas .....	62
2.5.	Datação por <sup>14</sup> C.....	63
3.	Resultados.....	63
3.1.	Solos com influência antrópica.....	63
3.2.	Solos sem influência antrópica marcante.....	72
3.3.	Dissolução seletiva .....	76
4.	Discussão.....	81
4.1.	Influência dos terraços na paisagem e propriedades físicas do solo.....	81
4.2.	Terraceamento e propriedades químicas do solo .....	84
4.3.	Análises de dissolução seletiva dos solos em estudo.....	85
5.	Conclusões.....	87
	Agradecimentos .....	87
	Referencias .....	88
	<b>APÉNDICE</b> .....	95
	<b>CAPÍTULO III</b> .....	102
	<b>SOLOS DO VALE SAGRADO DOS INCAS, CUZCO</b> .....	102
	<b>RESUMO</b> .....	103
	<b>ABSTRACT</b> .....	104
1.	Introdução.....	105
2.	Materiais e Metodos .....	106
2.1.	Área de estudo .....	106
2.2.	Amostragem e classificação.....	107
2.3.	Análises físicas e químicas .....	109
2.4.	Análises mineralógicas .....	109
3.	Resultados.....	110
3.1.	Solos com influência antrópica.....	110
3.2.	Solo sem influência antrópica.....	112

4.	Discussão .....	118
4.1.	Influência da atividade antrópica na paisagem e propriedades dos solos .....	118
4.2.	Influência da atividade antrópica no conteúdo de P e matéria orgânica do solo .....	120
4.3.	Que aspectos limitaram ao aumento do conteúdo de fósforo disponível e matéria orgânica?.....	121
5.	Conclusão .....	123
	Agradecimentos .....	124
	Referências bibliográficas .....	124
	<b>APENDICE</b> .....	130

## Introdução geral

A área de estudo constitui parte da bacia hidrográfica do Amazonas, delimitada como resultado da formação da Cordilheira Andina, pelos sucessivos movimentos de placas tectônicas desde finais do Cretáceo (MARTÍNEZ et al., 1999), onde a floresta Amazônica, que faz parte da bacia hidrográfica, constitui uma área geologicamente estável (SALO et al., 2005), de alta biodiversidade atribuído durante o Quaternário (SOMBROEK, 2000; RODAZZ et al., 2005).

A grande diversidade pedológica dos Andes até a Amazônia, deriva de uma grande variedade de materiais de origem, condições climáticas, relevo (ONERN, 1972, 1977, 1988) e interações bióticas (QUESADA et al., 2011), mais seu conhecimento é ainda incipiente, especialmente nos setores mais elevados na Cordilheira Andina. Nas terras baixas da Amazonia peruana são encontrados os solos mais intemperizados com predomínio de caulinita (TYLER et al., 1978; SANCHEZ & BUOL, 1974; OSCHER & BUOL, 1998). Na região Andina as menores condições de intemperismo podem ser observadas na composição mineralógica dos solos, devido ao predomínio de minerais 2:1 (WILCOX et al., 1988, PORTES et al., 2016) além do considerável acúmulo de matéria orgânica, o que constitui um importante reserva de carbono.

É nessa região Andina, com solos quimicamente mais ricos, onde civilizações pré-hispânicas estabeleceram sistemas de agricultura denominados “andenes” há pelo menos 4000 anos atrás (PEARSALL, 2008), estimando-se cerca de meio a um milhão de hectares de campos cultivados (MASSON, 1980) usados para a produção de quinoa e milho. Sua importância começou depois do 200AD pela cultura Huarpa e Wari (KENDALL & RODRIGUEZ, 2009), alcançando sua máxima expressão durante o Imperio Inca (LUMBRERAS, 1999), estimando-se cerca de meio a um milhão de hectares de campos cultivados (MASSON, 1980), usados para a produção.

Apesar de esses terraços agrícolas representarem verdadeiros solos antrópicos, com altos teores de fósforo (SANDOR & EASH, 1995, NANAVATI et al., 2016) atualmente muitas dessas áreas encontram-se abandonadas, pois a conquista pelos espanhóis marcou um período de ruptura na sua construção. A chegada dos espanhóis impactou também no surgimento de diferentes doenças, principalmente a varíola e sarampo que afetaram grandemente a população ocasionando o despovoamento das comunidades levando ao êxodo rural. Hoje em dia, essa migração continua, o que resulta no abandono desses terraços.

Deste modo, a tese objetiva a entender a pedogênese e pedoarqueologia no transecto da Cordilheira dos Andes peruanos até as terras baixas da Amazônia, dividida em dois capítulos.

Capítulo 1, o objetivo é subsidiar o conhecimento pedológico mais integrado e aprofundado desde as Terras Baixas da Amazônia peruana até a Cordilheira Oriental Andina, a partir de suas propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas dos solos ao longo de uma topolitosequência.

Capítulo 2: Investigar as propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas dos terraços agrícolas nas províncias altas de Cuzco solos em terraços agrícolas antigos.

Capítulo 3: Investigar os efeitos da atividade antrópica nas propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos do Vale Sagrado dos Incas.

#### Referências bibliográficas

KENDALL, A.; RODRIGUEZ, A. Desarrollo y perspectivas de los sistemas de andeneria de los Andes Centrales del Perú. Cuzco: **Institud français d'études andines**, 2009.

LUMBRERAS, L.G. Formación de las sociedades urbanas. In: Lumbreras, L.G (Ed). História de America Andina. Vol. 1: Las Sociedades Aborígenes. **Universidad Andina Simón Bolívar**. pp 223-265, 1999.

MARTINEZ, V.W.; MORALES, R.M.; DIAZ, H.G.; MILLA, S.D.; MONTOYA, P.C.; HUAYHUA, R.J.; ROMERO, P.L.; RAYMUNDO, S.T. Geología del los cuadrangulos de Bolívar, Curaray, Santa Clotilde, Quebrada Aguablanca, Quebrada Sabaloyacu, San Lorenzo, Intuto, Río Pintoyacu, Río Mazán, Río Corrientes, Libertad, Río Nanay, Santa Rosa, Yacumama, Río Itaya, Yanayacu, Chapajilla y Nauta. **INGEMMET**, Boletin 131, Série A: Carta Geológica Nacional. Lima - Perú, 1999.

MASSON, M.L. La recuperación de los andenes para la ampliación de la frontera agrícola em la sierra, Lima, 30:172-244, 1984.

OFICINA NACIONAL DE EVALUACIÓN DE RECURSOS NATURALES (ONERN). Inventario, evaluación e integración de los recursos naturales de la zona de ríos Inambari y Madre de Dios. Lima – Perú, 1972.

OFICINA NACIONAL DE EVALUACIÓN DE RECURSOS NATURALES (ONERN). Inventario, evaluación e integración de los recursos naturales de la zona Iberia-Iñapari. Lima – Perú, 1977.

OFICINA NACIONAL DE EVALUACIÓN DE RECURSOS NATURALES (ONERN). Inventario y evaluación de los recursos naturales de la zona altoandina del Peru (Suelos, Uso Actual, Agrostología) semidetallado del departamento del Cusco. Lima – Perú, 1988.

PEARSALL, D.M. Plant Domestication and the shift to agriculture in the Andes. In: Silverman, H and Isbell, W.H (eds) Handbook of South American Archaeology. New York: **Springer**, pp.105-120, 2008.

QUESADA, C.A.; LLOYD, J.; ANDERSON, O.; FYLLAS, N.M.; SCHWARZ, M. & CZINCZIK. Soil of Amazonia Whit particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences** 8:1415-1440, 2011.

RODDAZ, M.; VIERS, J.; BRUSSET, S.; BABY, P.; HÉRAIL, G. Sediment provenances and drainage of the Neogene Amazonian foreland basin. **Earth Planet Sci Lett** 239, 57-78, 2005.

SALO, J. Notas en la história de la exploración científica y teorías em la selva baja de la Amazonia Peruana. *In*: Kaliolla, R., Puhakka, M., Danjoy, W. eds. Amazonia Peruana Vegetación Húmeda Tropical em el LLano Subandino. Turku, University of Turku. P. 23-31, 1993.

SANDOR, J.A.; EASH, N.S. Ancient agricultural soils in the Andes of southern Peru. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 59:170-179, 1995.

SOMBROEK, W. Amazon Landforms and soils in relation to biological diversity. **Acta Amazônica**, 30 (1): 81-100, 2000

## **CAPÍTULO I**

### **SOLOS DE UMA TOPOLITOSEQUÊNCIA DA CORDILHEIRA ORIENTAL AS TERRAS BAIXAS DA AMAZÔNIA PERUANA**

## RESUMO

Os ambientes altomontanos da Cordilheira dos Andes Oriental abrigam rica biodiversidade, além de importantes fontes hídricas, incluindo a Bacia Amazônica. Apresenta paisagens singulares e solos distintos em função de materiais de origem, relevo e clima bem diferenciados. Apesar de avanços recentes, o conhecimento sobre a região Andina, ainda é incipiente, notadamente em relação aos solos. O objetivo deste trabalho foi aprofundar o conhecimento dos solos ao longo de uma toplotosequência, desde a Cordilheira Oriental (Cusco) até as terras baixas da Peneplanície Amazônica (Madre de Dios), no Peru, num itinerário de variação altitudinal de 4725 a 240 m.a.s.l. Realizou-se análises morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas em 11 perfis de solos selecionados em toplotosequência. Os pedons foram coletados em três ambientes fisiográficos: *Cordilheira Oriental*, *Faixa Subandina* e *Peneplanície Amazônica*. O fator altitude foi muito importante para diferenciação dos solos, mas ocorreram solos fortemente associados ao material de origem. Os solos associados à sedimentos aluviais antigos da *Peneplanície Amazônica* apresentaram maior desenvolvimento pedogenético. A morfogênese prevaleceu em relação à pedogênese nos relevos montanhosos da *Faixa Subandina* e vales fluvioglaciais da *Cordilheira Oriental*. Na parte mais elevada da Cordilheira, à maioria dos pedons apresentam acúmulo de carbono orgânico, justificado pelas condições climáticas frias. A mineralogia da fração argila de todos os pedons é constituída principalmente por caulinita, quartzo e illita, com maior grau de alteração nos solos da *Peneplanície Amazônica*, onde se registrou-se também predomínio de formas cristalinas óxidos de Fe e Al, em forte contraste com a *Faixa Subandina* e *Cordilheira Oriental*, onde possuem domínio de minerais 2:1. A pirofilita e lepidocrocita foram encontradas nos pedons originados de rochas metamórficas, e a clorita em associação com a caulinita em metasedimentos dos vales fluvioglaciais da *Cordilheira Oriental*. A classificação taxonômica desses solos segundo a Soil Taxonomy é: Entisols, Inceptisols e Ultisols; segundo a WRB, a nível de categoria foram identificados Gleysols Plinthosols, Umbrisols, Acrisols, Fluvisols e Regosols.

**Palavras chaves:** Cordilheira dos Andes. Pedogênese. Carbono. Mineralogia.

## ABSTRACT

The high montane environments of the eastern Andean Cordillera are home to rich biodiversity as well as important water sources, including the Amazon Basin. It presents unique landscapes and distinct soils due to the different materials of origin, relief and climate. Despite recent advances, knowledge about the Andean region is still incipient, especially regarding soils. The objective of this work was to deepen the knowledge of soils along a topolithosequence, from the Cordillera Oriental (Cusco) to the lowlands of the Amazon Peneplain (Madre de Dios), in Peru, along an altitudinal range of 4725 to 240 m.a.s.l. Morphological, physical, chemical and mineralogical analyses were performed on 11 soil profiles selected in topolithosequence. The pedons were collected in three physiographic environments: Eastern Cordillera, Sub-Andean Belt and Amazon Peneplain. The altitude factor was very important for differentiation of the soils, but soils strongly associated to the parent material occurred. Soils associated with old alluvial sediments of the Amazon Peneplain showed greater pedogenetic development. Morphogenesis prevailed over pedogenesis in the mountainous reliefs of the Sub-Andean Belt and fluvioglacial valleys of the Cordillera Oriental. In the higher part of the Cordillera, most pedons show accumulation of organic carbon, justified by the cold climatic conditions. The mineralogy of the clay fraction of all pedons is constituted mainly by kaolinite, quartz and illite, with a greater degree of alteration in the soils of the Amazon Peneplain, where the predominance of crystalline forms of Fe and Al oxides has also been registered, in strong contrast to the Subandean Belt and Eastern Cordillera, where they have a dominance of 2:1 minerals. Pyrophyllite and lepidocrocite were found in the pedons originated from metamorphic rocks, and chlorite in association with kaolinite in metasediments from the fluvioglacial valleys of the Cordillera Oriental. The taxonomic classification of these soils according to Soil Taxonomy is: Entisols, Inceptisols and Ultisols; according to WRB, at category level Gleysols Plinthosols, Umbrisols, Acrisols, Fluvisols and Regosols were identified.

**Keywords:** Andean Cordillera. Pedogenesis. Carbon. Mineralogy.

## 1. Introdução

A bacia hidrográfica do Amazonas é considerada a mais extensa do mundo, englobando uma área de drenagem de 5,8 milhões de km<sup>2</sup>, cuja área de depósitos sedimentares de aproximadamente 2,5 a 3 milhões de km<sup>2</sup> (RÄSÄNEN et al., 1992). A bacia do Amazonas apresenta uma dinâmica peculiar, com intensos transportes de materiais desde os Andes até as planícies amazônicas (SALO, 1993; RÄSÄNEN et al., 1990) além de abrigar uma alta biodiversidade (DUMONT; LAMOTTE; KAHN, 1990; HAMILTON et al., 2007). A história climática da região é complexa e foi palco de diversas oscilações climáticas durante o Quaternário (ANICETO et al., 2014; HÄGGI et al., 2017), além de ter sido afetada fortemente pelos fenômenos de El Niño e La Niña (MOURA et al., 2019; ZECH et al., 2010).

A grande diversidade ambiental desde os Andes até a Amazônia, sugere uma importante diversidade pedológica que ainda carece de mais estudos. Os Andes constituem sistemas hidroclimáticos e biogeoquímicos diversos (GARREAUD, 2009; INSEL; POULSEN; EHLERS, 2010). A região altoandina constitui uma importante reserva de carbono e possui importante reserva hídrica que fornece água e sedimentos para áreas à jusante (BUYTAERT et al., 2006; ROLANDO et al., 2017), sendo esta dinâmica essencial para manutenção da rica biodiversidade nas partes mais baixas da Amazônia.

Na atualidade os estudos pedológicos que articulam o *continuum* da sequência de solos das montanhas andinas até a baixada amazônica são praticamente inexistentes. Essa carência de estudos pedológicos integrados na área Amazônica e a região Andina peruana reflete na falta de consenso na delimitação de unidades contíguas e adjacentes de solos entre os dois países, revelada na publicação recente do Atlas de Solos da América do Sul (GARDI et al., 2014). Tal fato ilustra como é importante um conhecimento integrado dos solos ao longo de setores de fronteira, especialmente onde as informações de solo são poucas, havendo a necessidade de ampliar este conhecimento para uma melhor compreensão dos solos em resposta às intervenções humanas.

Dentro deste escopo, a presente pesquisa objetiva conhecer os processos pedogenéticos de um trecho hidrológicamente contínuo, desde Cordilheira Oriental Andina até as Terras Baixas da Amazônia do Peru, a partir de suas propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas ao longo de uma topolitosequência.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1. Área de estudo

A área de estudo (Figura 1), localiza-se na bacia de retroarco no sul do Peru (RODDAZ et al., 2005; RÄSÄNEN, 1993), relacionado com a subducção da placa de Nazca em direção da placa Sul-Americana (ESPURT et al., 2008; REGARD et al., 2009) entre 26 e 2 Ma (CABRERA; SÉBRIER; MERCIER, 1991), ou seja, durante o período mioceno até início do quaternário (SÉBRIER et al., 1988). Em consequência dessa colisão originou três grandes ambientes fisiográficos: Peneplanície Amazônica, Faixa subandina e Cordilheira Oriental, (INGEMMET, 1995).

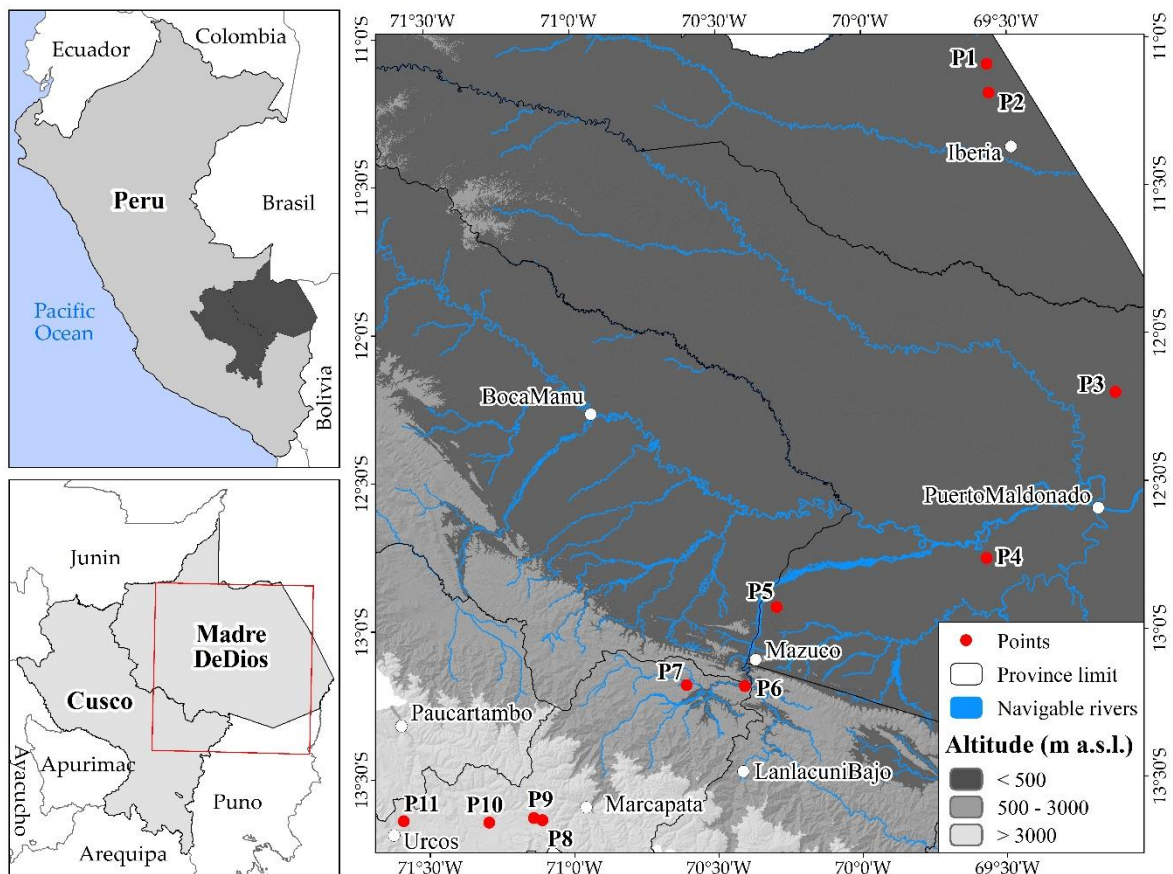


Figura 1. Representação da área de estudo com localização dos perfis analisados

Os pedons da *Peneplanície Amazônica* (P01, P02, P03 e P04) compreendem vastas áreas de paisagem aluvial antiga (Uplands), situada acima das várzeas (Floodplains), de ambiente mais estável, originada de sedimentos não consolidados (COOMES, 2004; RÄSÄNEN et al.,

1987). O P01, P02 e P03 estão localizados num clima subúmido e quente, com temperatura média anual variando de 24,5 a 25,0 °C, precipitação pluviométrica de 1600 a 2100 mm.ano<sup>-1</sup>, sob vegetação de Floresta Subtropical úmida transicional a Floresta Tropical úmida (com exceção P03). (INADE, 2007). O P04 assentado sobre um clima úmido e quente, com temperatura de 24,5 a 26 °C, precipitação pluviométrica de 2100 a 3500 mm.ano<sup>-1</sup>, com vegetação de Floresta Subtropical úmida (incluído o P03) (INADE, 2007).

Os pedons da *Faixa Subandina* (P05, P06 e P07) localizado entre a Cordilheira Oriental e a Peneplanície Amazônica (INGEMMET, 1995), estão situados nos primeiros dobramentos orientais da Cordilheira Andina, conformada por uma sequência de cadeias montanhosas com dobramentos sinclinais - anticlinais (Molina et al., 1996). Possui clima muito úmido e semi-quente, temperatura de 21,5 a 25 °C, e precipitação pluviométrica de 3500 a 6000 mm (INADE, 2007), com vegetação de Floresta Subtropical muito úmida, transicional a bosque pluvial Subtropical (INADE, 2007; IMA, 2009).

Com respeito aos pedons da Cordilheira Oriental (P08, P09, P10 e P11), constituído de vertentes abruptas e crestas, representa relevo bastante acidentado. A influência do Último Máximo Glacial (UMG) provocou o desenvolvimento de paisagens glaciais, circos, lagoa glacial, vales em U constituído de vales fluvio glaciais e depósitos de morainas antigas (Mark et al., 2002) que fornecem evidências de episódios de avanços e recuos de geleiras desde o Pleistoceno tardio até o Holoceno. Os Pedons P08 e P09 situa-se num clima muito úmido e semi - frígido, temperatura média anual de 2 a 6 °C, e precipitação de 900 a 1500 mm.ano<sup>-1</sup>, com vegetação de Tundra. Os pedons P10 e P11 apresentam clima muito úmido e frio, precipitação pluvial de 500 a 1000 mm.ano<sup>-1</sup>, temperatura média anual de 12 a 14 °C, com vegetação de Páramo (IMA, 2009).

Do ponto de vista geológico, a área de estudo (Figura 2) dos Perfis P01 e P02 é localizada na Formação Madre de Dios (inferior), composta de conglomerados polimícticos, clastos argilosos e líticos em matriz arena siltosa (ROMERO et al., 1998). Os Perfis P03 e P04 são desenvolvidos de arenito, siltito e argilito da Formação Madre de Dios (superior) (SANCHEZ, 2003). O P05 é associado à Formação Ipururo (Nmp - i), constituído de arenitos, conglomerados e “ardósias cinzentas” (SÁNCHEZ, 2003) enquanto P06 e P07 são localizados na Formação Chonta, composto de arenitos esverdeados, ardósia e intercalações de calcário, quartzito e margos (SÁNCHEZ & ZAPATA, 2003; SANCHEZ, 2003). Os pedons P08 e P11 estão sobre a Formação Ananea, constituído de ardósias cinzentas e siltitos micáceos, finamente laminadas (HÉRAIL; FORNARI; ROUHIER, 1989; CARLOTTO; CARDENAS, CARLIER,

2011; SÁNCHEZ & ZAPATA, 2003). Os Perfis P09 e P10 são localizados nos depósitos recentes de origem fluvio - glacial, constituídos blocos de rochas metamórficas, sedimentares, de formas angulares a subangulares e matriz arenosiltosa (CARLOTTO et al., 2011; SÁNCHEZ & ZAPATA, 2003).

## 2.2. Amostragem e classificação

Onze perfis de solos foram selecionados (Figura 3). Os horizontes foram descritos e coletadas seguindo os procedimentos da Soil Survey Staff (2017) e classificadas de acordo a Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014) e WRB/FAO (IUUS WORKING GROUP WRB, 2015). As cores úmidas foram obtidas de acordo com a caderneta de Munsell (MUNSELL COLOR 2012).

## 2.3. Análises físicas e químicas

Realizou-se análises granulométrica pelo método da pipeta adaptado por Ruiz (2005). Determinou-se o pH em água e em solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup> (relação 1:2,5). Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>, foram extraídas com KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>, sendo o Ca e Mg por espectrometria de absorção atômica e o Al por titulação com solução de NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>. Extraíu-se Na, K e P disponíveis com Mehlich-1 (HCL 0,05 mol L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup>), onde o Na e K foram determinados por fotometria de chama e o P por colorimétrica (EMBRAPA, 2017).

Determinou-se carbono orgânico (CO) conforme Walkley & Black (1934). Quantificou-se o fosforo adsorvido (P<sup>a</sup>) após agitação durante 1 h da TFSA com solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P, na relação 1:10 (Alvarez et al., 2000). Com base nos resultados obtidos, foi realizado os cálculos da soma de bases (SB), CTC a pH 7,0, a saturação por bases (V) e saturação por Al<sup>3+</sup> (m).

Realizou-se análises de dissolução seletiva: (1) compostos de Fe e Al cristalinos e não cristalinos no solo, extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (Fe<sub>d</sub> y Al<sub>d</sub>) (MEHRA & JACKSON, 1958), (2) compostos de Fe e Al associados a constituintes amorfos extraídos por solução de oxalato ácido de amônio (OAA) a pH 3 (Fe<sub>o</sub> y Al<sub>o</sub>) (MCKEAGUE; DAY, 1966) e compostos de Fe e Al ligado a compostos orgânicos extraídas por solução de pirofosfato de sódio (Fe<sub>p</sub> y Al<sub>p</sub>) (MCKEAGUE, 1967) a pH 10. O conteúdo de Ferrihydrite foi estimado pela seguinte equação 1,7x % Fe<sub>o</sub> (CHILDS et al., 1991).

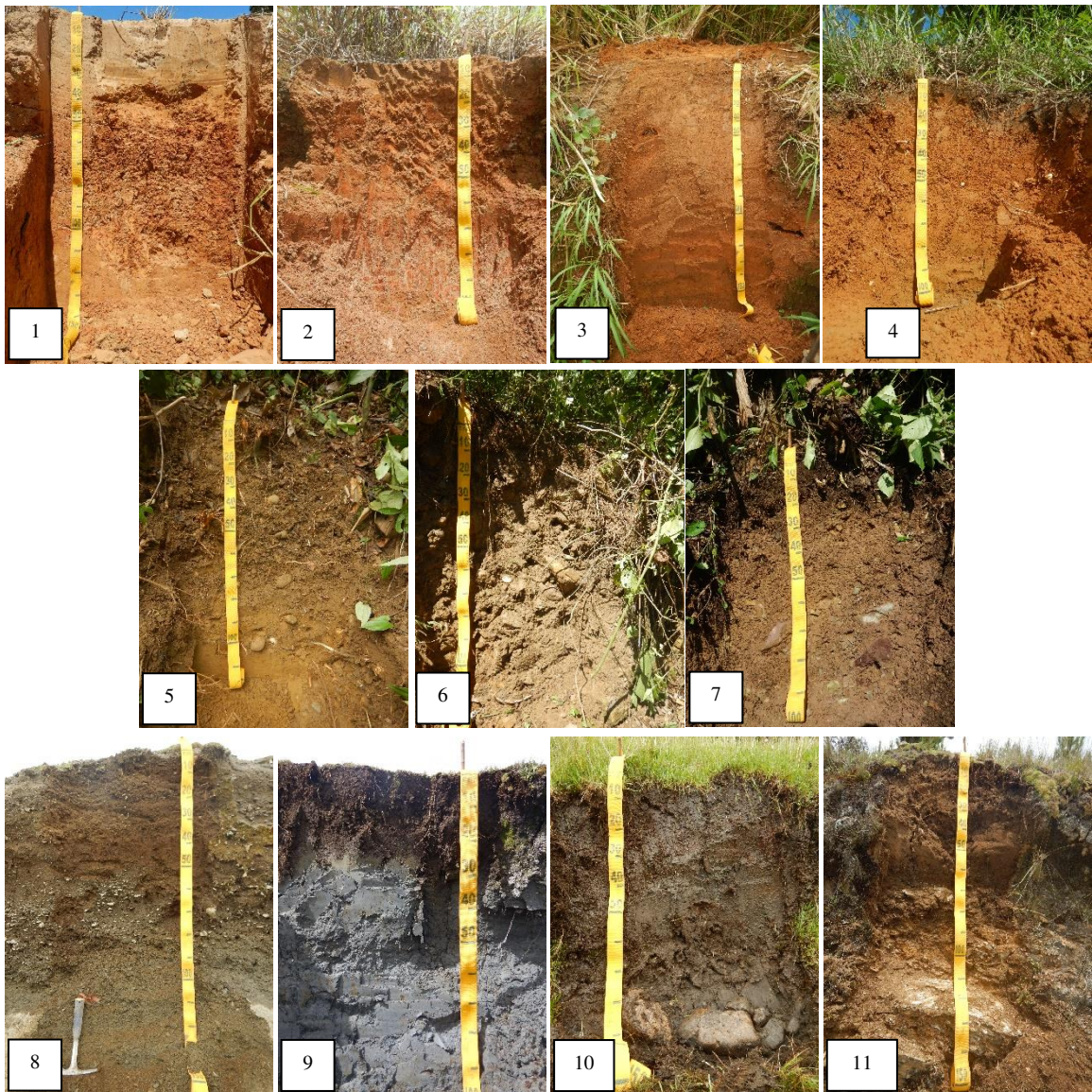


Figura 3. Perfis de solos da *Peneplanície Amazônica* (P01, P02, P03 e P04), *Faixa Subandina*: (P05, P06 e P07) e *Cordilheira Oriental* (P08, P09, P10 e P11).

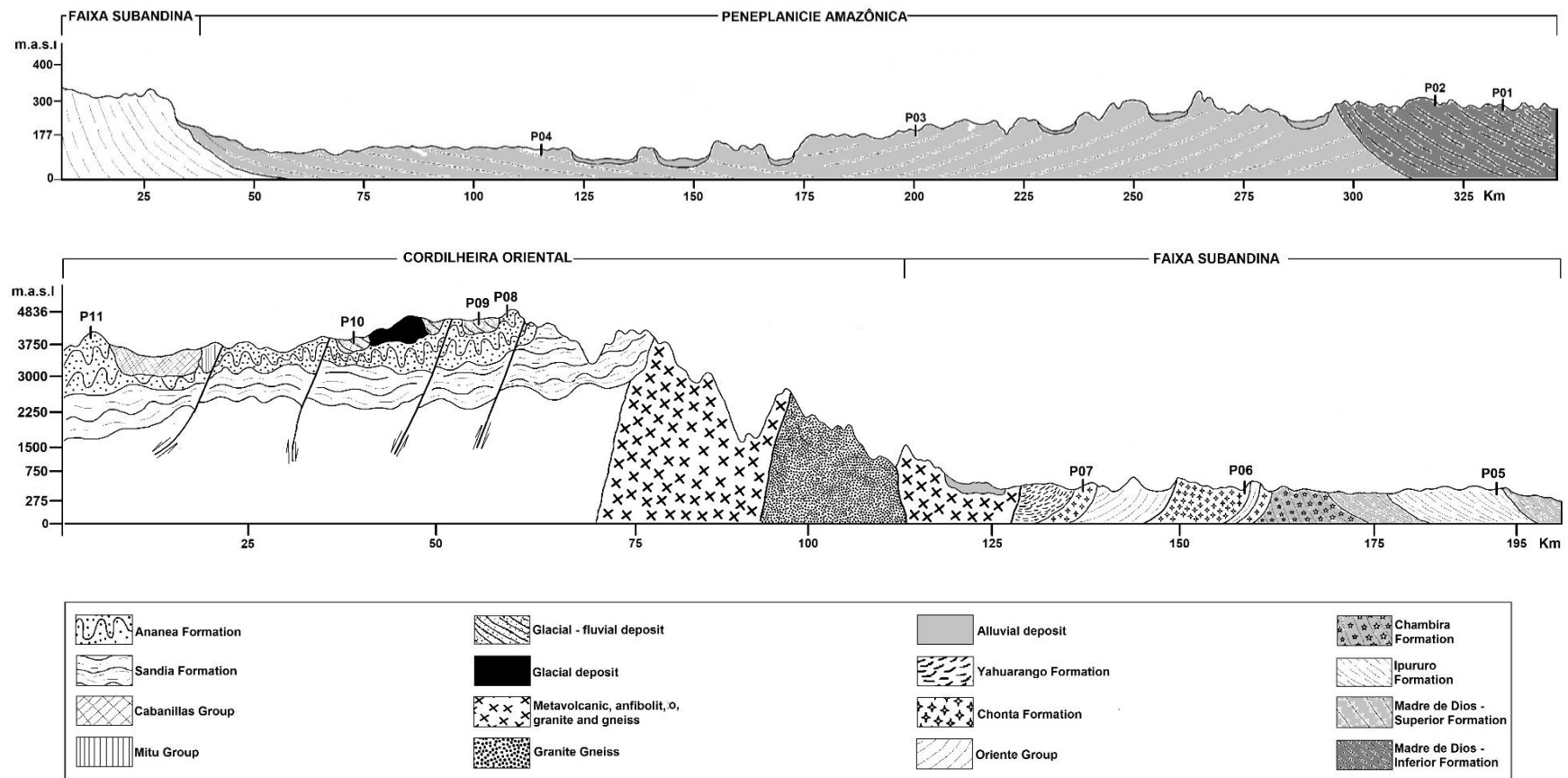


Figura 2. Perfil esquemático representando a topositosequência analisada com os respectivos perfis do solo

## 2.4. Análises mineralógicas

Realizou-se análises mineralógicas com uso da técnica de difração de raios - X (DRX) (EMBRAPA, 2017). Previamente removeu-se a matéria orgânica com uso de hipocloreto de sódio 10% (p/v) a pH 9,5 (Anderson, 1961). Montou-se lâminas orientadas de argila natural (método do esfregaço). Realizou-se tratamentos na fração argila: remoção de óxidos de Fe e Al com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (MEHRA & JACKSON, 1958); saturação com 1 mol L<sup>-1</sup> MgCl<sub>2</sub>; solvatação com glicerol; saturação com 1 mol L<sup>-1</sup> de KCl sob diferentes temperaturas (25 e 350 °C). Configurou-se o difratômetro de raios X com radiação de Co  $\alpha$  de 2° a 70° 2 $\theta$ .

## 3. Resultados

### 3.1. Propriedades do solo

As propriedades morfológicas, químicas, físicas e mineralógicas foram caracterizados para todos os solos ao longo da toplotosequência (Figura 2) que representa uma interação complexa entre aspectos climáticos, vegetacionais, geomorfológico e litológico encontradas na área de estudo (Tabela 1).

#### 3.1.1. Peneplanicie Amazônica

Os solos coletados na Peneplanicie Amazonica, são formados de depósitos aluviais antigos, situados em um relevo ondulado de drenagem moderada (Pedons P01 e P02) a relevo suave a ondulado bem drenado (Pedons P03 e P04), profundos. Em campo os pedons P01 e P02 mostraram a presença de um horizonte argílico (Bt), evidenciado pela presença de “cutans” na superfície dos *peds* dos horizontes subsuperficiais (Bt1 e Bt2), e confirmado pelo acúmulo de argila (29 a 55.7%) (Tabela 2), com presença de bicromia e mosqueados abundantes, aumentando em profundidade. Os pedons bem drenados (P03 e P04), apresentam seixos arredondados a 50 - 150 cm no P03 e 80 - 100 cm no P04.

Os solos de drenagem moderada são mais argilosos, com horizontes superficiais de cor Bruno escuro (7,5YR 3/2 a 10YR 3/3), que mudou para vermelho a vermelho amarelado (5YR 5/8 a 2,5YR 4/8) em profundidade, com mosqueados cinzentos claro a cinzento (2,5Y 7/1 a 2,5Y 5/1). Solos bem drenados desenvolvidos de materiais mais arenosos apresentam cor Bruno

escuro a bruno avermelhado escuro (5YR 3/2 a 7,5YR 3/4) e vermelho amarelado (5YR 4/6) em profundidade. Diferente dos solos mais argilosos no relevo ondulado, os solos com textura mais arenosa em relevo suave, não possuem concreções endurecidas em profundidade. De modo geral, a textura varia de franco arenosa a argilosa em profundidade nos pedons P01 e P02, e franco argilo arenosa a franco argilosa nos pedons P03 e P04, de estrutura granular a bloco subangular, de grau fraco a forte (Tabela 2).

O pH do solo varia de 4,34 a 5,92 (Tabela 3). O pH é geralmente mais alto em superfície do que em profundidade. Destaca-se que os horizontes superficiais de todos os pedons no apresentam saturação por alumínio (com exceção para o P04), devido aos valores mais altos de  $\text{Ca}^{2+}$  (1,76 a 5,01  $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) e CO em superfície (8,0 a 25,5  $\text{g kg}^{-1}$ ) (Tabela 3). Nos pedons P01 e P02, foram observados valores mais altos da CTC (t) (5,13 a 15,46  $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ), CTC (T) (7,42 a 18,51  $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) e retenção de fósforo (87,50 a 96,33%), devido aos valores mais altos de  $\text{Al}^{3+}$  (3,01 a 12,15  $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) e argila no horizonte argílico (Bt) (290 a 557  $\text{g.kg}^{-1}$ ) (Tabela 2).

### 3.1.2. Faixa Subandina

Na *Faixa Subandina* o pedon P05 situa-se nos primeiros dobramentos da Cordilheira Andina, de relevo fortemente ondulado, enquanto os solos P06 e P07 localizam-se nos contrafortes andinos em relevo montanhoso a fortemente ondulado. Os pedons desta região apresentam solos moderadamente profundos com fragmentos grosseiros arredondados em todo o perfil (Figura 3), sendo observados maior presença de seixos no P06 (> 50%) de 5 até 30 cm de diâmetro.

Os pedons P05 e P07 apresentam horizonte superficiais de cor bruno escuro a bruno amarelado escuro (10YR 3/4 a 10YR 4/4) com horizonte B de cor bruno a bruno amarelo escuro (7,5YR 4/4 a 10YR 4/6), com estrutura granular, no horizonte superficiais e bloco subangular no B (Tabela 2). O P06 não apresenta desenvolvimento de horizonte B, possivelmente devido ao balanço morfogênese/pedogênese ser mais favorável ao primeiro, destacado pela presença de muitos sinais de movimentos de massa na região. Os pedons apresentam textura franca a muito argilosa, sendo que P07 apresentando os maiores teores de argila (Tabela 2).

O pH que variam de 4,50 a 5,51 (Tabela 3). O pH do P06 e P07 diminui em profundidade, com exceção do P05. Para todos os pedons os horizontes superficiais apresentaram valores mais altos de CO (9,1 a 32,7  $\text{g kg}^{-1}$ ) e CTC (T) (11,24 a 23,18  $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ),

diminuindo a medida que a profundidade aumenta (Tabela 3), além de aumento de  $Al^{3+}$  em profundidade. No P07, destaca-se valores mais altos da CTC (t), CTC (T) e retenção de fósforo, devido aos valores mais altos de  $Ca^{2+}$  (8,28 a 14,04  $cmol_c.dm^{-3}$ ),  $Mg^{2+}$  (1,74 a 3,19  $cmol_c.dm^{-3}$ ) e K (0,15 a 0,92  $cmol_c.dm^{-3}$ ) (Tabela 3) e argila (504 a 611  $g.kg^{-1}$ ) (Tabela 2).

### 3.1.3. Cordilheira Oriental

Os solos possuem horizontes superficiais bastante escuro (Figura 3) de coloração bruno a muito escuro (10YR 3/4 a 10YR 4/4) com espessura  $\geq 30$  cm (Tabela 2). Os pedons P08 e P11 estão localizados nas faixas metamórficas de alta montanha, enquanto os pedons P09 e P10, situam-se em antigos vales fluvio-glaciais (Figura 2).

Os pedons localizados nos topos de montanha, apresentam desenvolvimento de horizonte B, de cor bruno a bruno oliváceo (10YR 4/3 a 2,5Y 3/3), com presença de frações grosseiras no perfil que conferem condições cascalhentas no A, a muito cascalhenta no C, com grau de arredondamento variado angular, subangular e subarredondada típico de depósitos de glaciais pouco selecionados, como observado no P08. Em P11 onde foi observado “crioturbação” acentuada no horizonte CR, além de iluviação da matéria orgânica até o topo do horizonte CR.

O pedon P09 apresenta horizonte C cinzento azulado (Gley 2 5B 6/1 a 10B 5/1), além de mosqueados bruno amarelado (10YR 5/8) (Figura 3). O pedon P10, apresenta coloração escura em todo o perfil, devido a acumulação da matéria orgânica, sendo mal drenado com presença de lençol freático aflorante aos 50 cm, com ocorrência de frações grosseiras no Ch. A maioria dos solos apresentam textura argilosa.

O pH do solo varia de 4,09 a 4,92 (Tabela 3), com valores de pH mais baixos em superfície do que em profundidade, valores similares foram observados na saturação por alumínio (m). Altos valores da CTC (T) (16,30 a 20,83  $cmol_c.dm^{-3}$ ) nos horizontes superficiais (exceto P08), talvez em função do alto teor de CO (69.6 a 182.1  $g.kg^{-1}$ ), além dos elevados teores de argila (41.4 a 55.4 %). Para todos os pedons, foram observados valores bem altos de retenção de fosforo (61,33 a 92,83%) (Tabela 3). Valores mais altos da CTC (T) e CO (Tabela 3) foram encontrados nos pedons localizados nos vales fluvio-glaciais respeito aos pedons localizados no topo das montanhas.

Para todos os pedons analisados, teores de Fe e Al ( $Fe_o$  e  $Al_o$ ) extraíveis com oxalato foi consideravelmente mais baixo do que os valores extraídos com DCB ( $Fe_d$  e  $Al_d$ ) (Tabela 4), mostrando a dominância de materiais cristalinos na área de estudo. A razão  $Fe_o/Fe_d$  e  $Al_o/Al_d$  geralmente incrementou com a altitude, sendo mais altos nos pedons da *Cordilheira Oriental* (Tabela 4), indicando a maior presença de óxidos de Fe Al não cristalino. Para todos os pedons em estudo a forma de Fe e Al forma complexos organometálicos, como evidencia os altos valores da razão  $Fe_p/Fe_o$  ( $> 0,2$ ) e  $Al_p/Al_o$  ( $> 0,5$ ) (Tabela 4).

Tabela 1. Caracterização dos locais de coletas dos perfis, com respectivas coordenadas geográficas, altitude e classificações dos solos

Perfil	Localidade	Altitude (m.a.s.l)	Posição	Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014)	WRB (IUSS, Working Group WRB, 2015)	Regime de umidade	Régime de temperatura	Vegetação	Geologia	Período
1	11° 5'34"S 69° 33'60"W	312	Shoulder	Typic Hapludults	Haplic Acrisols (Endoclayic, Cutanic, Differentic, Ochric)	Udic	Isohipertérmico	Floresta Subtropical	Formación Madre de Dios Inferior (NQ - md/i)	Mioceno
2	11° 11'25"S 69° 33'35"W	290	Summit	Typic Pinthudults	Haplic Plinthosols (Endoclayic, Dystric, Ochric)	Udic	Isohipertérmico	Floresta Subtropical	Formación Madre de Dios Inferior (NQ - md/i)	Mioceno
3	12° 12'9"S 69° 7'30"W	255	Terraces	Oxic Dystrudepts	Dystric Cambisols (Loamic, Ochric)	Udic	Isohipertérmico	Floresta Subtropical	Formación Madre de Dios Superior (NQ - md/i)	Pleistoceno
4	12° 45'48"S 69° 34'11"W	240	Terraces	Typic Dystrudepts	Dystric Cambisols (Loamic, Ochric)	Udic	Isohipertérmico	Floresta Subtropical	Formación Madre de Dios Superior (NQ - md/i)	Pleistoceno
5	12° 55'36"S 70° 17'44"W	313	Footslope	Typic Dystrudepts	Dystric Cambisols (Loamic, Ochric)	Udic	Isohipertérmico	Floresta Subtropical	Formation Ipururo (Nmp - i)	Mio - plioceno
6	13° 11'35"S 70° 24'24"W	380	Backslope	Typic Udorthents	Eutric Regosols (Loamic, Ochric)	Udic	Isohipertérmico	Floresta Subtropical	Formation Chonta (Kis - ch)	Cretaceo
7	13° 11'18"S 70° 36'29"W	503	Back slope	Typic Dystrudepts	Eutric Cambisols (Clayic, Ochric)	Udic	Isohipertérmico	Floresta Subtropical	Formation Chonta (Kis - ch)	Cretaceo
8	13° 38'28"S 71° 6'36"W	4725	Back slope	Typic Humicryepts	Cambic Umbrisols (Loamic, Hyperdystric)	Ustic	Cryic	Puna	Formation Ananea (SD - a)	Siluro - Devoniano
9	13° 38'2"S 71° 8'23"W	4450	Toeslope	Typic Humicryepts	Dystric Umbric Gleysols (Clayic)	Ustic	Cryic	Bofedal	Depósito Fluvio-Glacial (Q - flgl)	Pleistoceno
10	13° 38'53"S 71° 17'41"W	3830	Toeslope	Oxyaquic Cryofluvents	Dystric Fluvisols (Clayic, Hyperhumic, Oxyaquic)	Aquic	Cryic	Bofedal	Depósito Fluvio-Glacial (Q - flgl)	Pleistoceno
11	13° 38'26"S 71° 35'24"W	4185	Back Slope	Typic Humicryepts	Cambic Umbrisols (Clayic, Hyperdystric, hyperhumic)	Ustic	Cryic	Páramo	Formation Ananea (SD - a)	Siluro - Devoniano

Tabela 2. Propriedades morfológicas e físicas dos solos analisados

Horiz.	Prof. cm	Color (úmido)	Areia	Areia	Silte	Argila	Textura	Estrutura
			grossa	fina				
%								
<b>Peneplanície Amazônica</b>								
<b>P01: Typic Hapludults/ Haplic Acrisols (Endoclayic, Cutanic, Differentic, Ochric) - 312 m</b>								
Ap	0 - 5	10YR 3/3	3.4	53.2	28.4	15.0	Franco arenoso	1, f m, gr
E	5 - 20	7,5YR 4/4	2.3	53.0	27.2	17.4	Franco arenoso	1, f m, sbl
EB	20 - 30	7,5YR 5/4	2.6	51.6	29.0	16.8	Franco arenoso	2, f m, sbl
Bt1	30 - 50	5YR 5/8 com Mq 2,5Y 7/1	2.2	44.2	24.6	29.0	Franco argilo arenoso	2, f m, sbl
Bt2	50 - 100	5YR 5/8 com Mq 2,5Y 7/1	0.5	34.5	12.8	52.2	Argila	3, f m, sbl
BC	100 - 150	5YR 5/8 com Mq 2,5Y 7/1	0.5	52.2	8.4	38.8	Argilo arenosa	0, -, ma
<b>P02: Typic Plinthudults/ Haplic Plinthosols (Endoclayic, Dystric, Ochric) - 290 m</b>								
A	0 - 8	7,5YR 3/2	9.1	43.5	29.2	18.2	Franco arenosa	2, f m, sbl
BA	8 - 25	5YR 4/6 com Mq 2.5 YR 5/1	8.1	39.5	24.5	27.8	Franco argilo arenoso	3, m c, sbl
Btgv1	25 - 60	2.5YR 4/8 e 2.5Y 5/1	5.7	29.6	21.1	43.5	Argila	3, m c, sbl
Btgv2	60 - 100	2.5YR 4/8 e 2.5Y 5/1	1.6	16.1	26.6	55.7	Argila	3, m c, sbl
<b>P03: Typic Dystrudepts/ Dystric Cambisols (Loamic, Ochric) - 255 m</b>								
Ap	0 - 10	5YR 3/2	45.2	20.9	11.2	22.7	Franco argilo arenoso	1, f m, sbl gr
BA	10 - 30	5YR 4/6	41.0	19.8	12.6	26.6	Franco argilo arenoso	1, f m, sbl gr
Bw1	30 - 70	5YR 4/6	40.9	20.1	13.1	26.0	Franco argilo arenoso	1, m c, sbl gr
Bw2	70 - 120	5YR 4/6	43.5	20.5	11.6	24.5	Franco argilo arenoso	2, m c, sbl gr
BC	120 - 150 +	5YR 4/6	36.9	15.9	13.6	33.7	Franco argilo arenoso	2, m c, sbl gr
<b>P04: Typic Dystrudepts/ Dystric Cambisols (Loamic, Ochric) - 240 m</b>								
Ap	0 - 12	7,5YR 3/4	22.0	21.3	26.0	30.7	Franco argilosa	2, f m, sbl gr
Bw	12 - 50	5YR 4/6	19.6	20.0	21.9	38.6	Franco argilosa	1, m c, sbl gr
BC	50 - 80	5YR 4/6	29.7	20.5	21.6	37.2	Franco argilosa	1, c, sbl
C	80 - 100	5YR 5/8	21.6	21.3	22.5	34.6	Franco argilosa	0, -, ma
<b>Faixa Subandina</b>								
<b>P05: Typic Dystrudepts/ Dystric Cambisols (Loamic, Ochric) - 313 m</b>								
A	0 - 35	10YR 3/4	26.2	25.0	27.7	21.2	Franco argilo arenoso	1, f m sbl
AB	35 - 60	10YR 3/4	20.2	26.0	30.6	23.2	Franca	1, md m, sbl
Bw	60 - 85	10YR 4/6	19.9	24.6	31.3	24.2	Franca	2, m c, sbl
C	85 - 100	10YR 4/6	18.7	24.4	33.3	23.5	Franca	-
<b>P06: Typic Udorthents/ Eutric Regosols (Loamic, Ochric) - 380 m</b>								
A	0 - 10	10YR 4/4	27.4	37.6	16.7	18.3	Franco arenosa	1, m, gr
C1	10 - 50	10YR 4/4	24.3	40.2	15.6	19.9	Franco arenosa	1, m c, sbl
C2	50 - 90	10YR 4/4	32.9	31.4	12.1	23.6	Franco argilo arenoso	1, m c, sbl
C3	90 - 110	10YR 4/4	12.4	52.9	15.6	19.0	Franco arenosa	-
<b>P07: Typic Dystrudepts/ Eutric Cambisols (Clayic, Ochric) - 503 m</b>								
A	0 - 20	10YR 4/4	6.4	4.8	37.3	51.5	Argila	2, m, sbl gr
Bw	20 - 60	7,5YR 4/4	4.4	2.9	31.6	61.1	Muito argilosa	2, m c, sbl
C	60 - 100	5YR 4/3	8.8	5.1	35.6	50.4	Argila	-

Continuação

Horiz.	Prof. cm	Color (úmido)	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Textura	Estrutura
%								
<b>Cordilheira Oriental</b>								
<b>P08: Typic Humicryepts/ Cambic Umbrisols (Loamic, Hyperdystric) - 4725 m</b>								
A	0 - 12	2,5Y 3/3	36.0	4.6	28.3	31.2	Franco argilosa	2, m, gr
AB	12 - 30	2,5Y 3/3	34.8	2.4	28.7	34.2	Franco argilosa	2, m c, gr
Bwh	30 - 55	2,5Y 3/3	34.1	4.9	31.3	29.7	Franco argilosa	2, m c, sbl
C1	55 - 90	-	37.7	5.0	24.9	32.4	Franco argilosa	0, -, ma
C2	90 - 120	-	40.8	1.8	26.4	31.0	Franco argilosa	0, -, ma
<b>P09: Typic Humicryepts/ Dystric Umbric Gleysols (Clayic) - 4450 m</b>								
A1	0 - 10	10YR 2/2	11.4	1.9	38.5	48.2	Argila	3, m c, gr
A2	10 - 30	10YR 3/1	7.5	1.6	35.6	55.4	Argila	2, m c, gr
Cg1	30 - 40	Gley 2 4/5B com 10YR 5/8	0.4	0.5	38.4	58.7	Argila	2, m c, sbl
Cg2	40 - 100	Gley 2 4/10B com 10YR 5/8	0.6	0.6	40.0	58.8	Argila	2, m c, pr sbl
<b>P10: Oxyaquic Cryofluvents/ Dystric Fluvisols (Clayic, Hyperhumic, Oxyaquic) - 3830 m</b>								
Ah1	0 - 30	10YR 2/2	21.4	4.0	33.2	41.4	Argila	2, m, gr
Ah2	30 - 60	10YR 2/2	20.7	3.9	33.9	41.5	Argila	2, m, gr
Ch	60 - 90+	-	24.6	3.9	33.4	38.1	Franco argilosa	0, -, ma
<b>P11: Typic Humicryepts/ Cambic Umbrisols (Clayic, Hyperdystric, hyperhumic) - 4185 m</b>								
A1	0 - 25	10YR 3/3	4.8	3.8	35.7	55.7	Argila	2, m, gr
A2	25 - 55	10YR 3/3	6.5	2.9	35.6	55.0	Argila	2, m, gr
Bwh	55 - 70	10YR 4/3	8.3	2.3	36.2	53.2	Argila	1, m c sbl
CR	70 - 120	-	10.5	4.1	47.8	37.6	Franco argilo siltosa	-

Desenvolvimento: 0 = sem estrutura, 1 = fraca, 2 = moderada, 3 = forte; tamanho: f = fina, m = media, c = grossa; type: gr = granular, sbl = bloco subangular, pr = prismatica, ma = maciça

### 3.1.3. Caracterização Mineralógica

De acordo com os difratogramas de raios - X (DRX) obtidos (Figura 4, 5 e 6), a assembleia mineralógica da fração argila em todos os pedons estudados é constituída principalmente por caulinita (Ko), quartzo (Qz) e illita (II), além de vermiculita com hidroxy (HIV) observado na maioria dos pedons. Na Peneplanicie Amazonica, a goethita (Gt) e vermiculita (Vm) foram registradas no P03 e P04, além de apresentar picos intensos de caulinita (Figura 4). Os feldspatos (Fd) foram identificados nos P05 da Faixa Subandina (Figura 5) e Vales fluvio - glaciais (P09 e P10) da Cordilheira Oriental (Figura 6). Em P08 e P11 foram registradas pirofilita (Pf) e lepidocrocita (Lp) (Figura 6). A lepidocrocita só é encontrada na fração argila natural, e após submetida a diferentes tratamentos, o pico desaparece. No P09 e P10 houve identificação de clorita (Ch), provavelmente associados a caulinita (Figura 6).

A razão  $Al_p/Al_o$  ( $> 0,5$ ) observados na maioria dos pedons indica a contribuição de complexos orgânicos ligados ao alumínio. De acordo com Kleber et al. (2007) a formação de complexos orgânicos ligados ao alumínio dificulta a formação de alofana em pH baixo. Os

valores obtidos pela soma  $Al + 1/2Fe_o$  são menores que 2% em todos os pedons, quantidade mínima requerida para indicar propriedades ândicas (IUUS WORKING GROUP WRB, 2015; SOIL SURVEY STAFF, 2014).

Tabela 3. Propriedades químicas dos solos analisados

Perfil	Prof. cm	pH		ApH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al <sup>a</sup>	CTC <sup>b</sup>	CTC <sup>c</sup>	CTC <sup>d</sup>	V <sup>e</sup>	m <sup>f</sup>	P <sup>g</sup>	CO <sup>h</sup>
		H <sub>2</sub> O	KCl														
		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>											%	g kg <sup>-1</sup>			
<b>Peneplanície Amazônica</b>																	
<b>P01 – Typic Hapludults/ Haplic Acrisols (Endoclayic, Cutanic, Differentic, Ochric) - 312 m</b>																	
Ap	0 - 5	5.92	5.38	-0.54	5.01	1.56	0.32	0.08	0.00	2.20	6.97	9.17	61.13	76.00	0.00	27.67	21.9
E	5 - 20	5.10	3.79	-1.31	2.15	0.12	0.07	0.03	0.87	3.20	3.24	5.57	32.01	42.50	26.90	28.00	8.0
EB	20 - 30	5.26	3.90	-1.36	2.11	0.28	0.05	0.03	0.68	2.70	3.14	5.16	30.71	47.70	21.70	32.59	5.1
Bt1	30 - 50	4.91	3.60	-1.31	1.40	0.66	0.05	0.01	3.01	5.30	5.13	7.42	25.59	28.60	58.70	65.17	2.9
Bt2	50 - 100	4.97	3.50	-1.47	2.05	1.85	0.07	0.01	8.36	11.40	12.24	15.38	29.46	25.90	67.70	89.67	3.7
BC	100 - 150	5.00	3.45	-1.55	1.50	1.68	0.07	0.00	7.97	10.60	11.22	13.85	35.7	23.50	71.00	87.50	2.2
<b>P02: Typic Plinthudults/ Haplic Plinthosols (Endoclayic, Dystric, Ochric) - 290 m</b>																	
A	0 - 8	5.50	4.27	-1.23	4.05	0.71	0.12	0.01	0.00	3.50	4.89	8.39	46.10	58.28	0.00	26.33	20.0
BA	8 - 25	4.90	3.59	-1.31	1.31	0.97	0.08	0.00	3.01	5.50	5.37	7.86	28.27	30.03	56.05	69.83	5.1
BtgV1	25 - 60	4.77	3.52	-1.25	0.91	1.22	0.07	0.00	5.83	8.50	8.03	10.70	24.60	20.56	72.60	88.00	5.1
BtgV2	60 - 100	4.80	3.47	-1.33	0.81	2.44	0.06	0.00	12.15	15.20	15.46	18.51	33.23	17.88	78.59	96.33	3.7
<b>P03 – Typic Hapludox/ Dystric Cambisols (Loamic, Ochric) - 255 m</b>																	
Ap	0 - 10	5.77	5.13	-0.64	3.08	0.79	0.15	0.02	0.00	1.60	4.04	5.64	24.85	71.60	0.00	34.83	8.0
BA	10 - 30	5.33	4.37	-0.96	2.69	0.56	0.08	0.00	0.10	2.40	3.43	5.73	21.54	58.10	2.90	33.83	8.0
Bw1	30 - 70	4.71	3.78	-0.93	1.04	0.14	0.09	0.00	1.36	4.70	2.63	5.97	22.96	21.30	51.70	46.33	8.8
Bw2	70 - 120	4.66	3.7	-0.96	0.58	0.08	0.07	0.00	1.55	4.80	2.28	5.53	22.57	13.20	68.00	50.17	6.6
BC	120 - 150	4.60	3.72	-0.88	0.31	0.03	0.07	0.00	2.14	5.50	2.55	5.91	17.54	6.90	83.90	66.5	6.6
<b>P04 – Typic Dystrudepts/ Dystric Cambisols (Loamic, Ochric) - 240 m</b>																	
Ap	0 - 12	4.77	3.77	-1.00	1.76	0.92	0.17	0.00	1.17	6.70	4.02	9.55	31.11	29.80	29.10	54.33	25.5
Bw	12 - 50	4.56	3.67	-0.89	0.32	0.07	0.06	0.00	3.21	5.80	3.66	6.25	16.19	7.20	87.70	85.33	5.1
BC	50 - 80	4.37	3.65	-0.72	0.22	0.04	0.05	0.00	3.50	5.80	3.81	6.11	16.42	5.10	91.90	89.33	2.9
C	80 - 100	4.34	3.62	-0.72	0.21	0.05	0.06	0.00	3.50	6.30	3.82	6.62	19.13	4.80	91.60	79.33	5.1
<b>Faixa Subandina</b>																	
<b>P05 - Typic Dystrudepts/ Dystric Cambisols (Loamic, Ochric) - 313 m</b>																	
A	0 - 35	4.5	3.97	-0.53	4.08	1.11	0.23	0.02	0.39	7.10	5.83	12.54	59.15	43.40	6.70	35.50	32.7
AB	35 - 60	4.69	4.06	-0.63	4.43	1.46	0.19	0.01	0.29	6.40	6.39	12.50	53.88	48.80	4.50	41.50	31.0
Bw	60 - 85	4.79	3.9	-0.89	3.46	1.16	0.10	0.00	0.58	5.50	5.30	10.22	42.23	46.20	10.90	47.00	16.8
C	85 - 100	4.99	3.77	-1.22	0.33	0.13	0.05	0.00	2.24	4.70	2.75	5.21	22.17	9.80	81.50	87.50	3.7
<b>P06 - Typic Udorthents/ Eutric Regosols (Loamic, Ochric) - 380 m</b>																	
A	0 - 10	5.1	4.24	-0.86	5.66	1.24	0.33	0.01	0.19	4.00	7.43	11.24	61.42	64.40	2.60	46.17	9.1
C1	10 - 50	5.07	4.02	-1.05	5.32	1.08	0.12	0.01	0.58	3.80	7.11	10.33	51.91	63.20	8.20	52.67	10.2
C2	50 - 90	5.09	3.97	-1.12	5.47	1.11	0.15	0.03	0.58	3.40	7.34	10.16	43.05	66.50	7.90	53.50	5.5
C3	90 - 110	4.75	3.69	-1.06	2.86	0.50	0.14	0.02	2.24	5.30	5.76	8.82	46.42	39.90	38.90	73.00	5.1
<b>P07 - Typic Dystrudepts/ Eutric Cambisols (Clayic, Ochric) - 503 m</b>																	
A	0 - 20	5.41	4.87	-0.54	14.04	3.19	0.92	0.03	0.00	5.00	18.18	23.18	45.01	78.40	0.00	61.67	29.1
Bw	20 - 60	5.15	3.69	-1.46	8.28	1.74	0.15	0.00	4.96	9.60	15.13	19.77	32.36	51.40	32.80	92.33	5.5
Cr	60 - 100	5.29	3.5	-1.79	10.69	2.98	0.18	0.08	4.66	8.30	18.59	22.23	44.11	62.70	25.10	87.67	4.4

Continuação ...

Profile	Depth cm	pH		$\Delta$ pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al <sup>a</sup>	CEC <sup>b</sup>	CEC <sup>c</sup>	CEC <sup>d</sup>	PSB <sup>e</sup>	Al sat <sup>f</sup>	P <sup>g</sup>	CO <sup>h</sup>
		H <sub>2</sub> O	KCl														
		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>															
<b>Cordilheira Oriental</b>																	
<b>P08 – Typic Humicrypets/ Cambic Umbrisols (Loamic, Hyperdystric) - 4725 m</b>																	
A	0 - 12	4.24	3.78	-0.46	0.13	0.05	0.10	0.08	3.50	10.30	3.86	10.66	34.17	3.40	90.70	84.83	17.5
AB	12 - 30	4.29	3.8	-0.49	0.08	0.03	0.06	0.10	3.21	10.10	3.48	10.37	30.32	2.60	92.20	89.17	19.7
Bwh	30 - 55	4.34	3.88	-0.46	0.14	0.03	0.06	0.10	2.82	13.10	3.15	13.43	45.22	2.50	89.50	92.83	32.8
C1	55 - 90	4.33	3.98	-0.35	0.11	0.01	0.06	0.08	2.33	12.30	2.59	12.56	38.77	2.10	90.00	91.50	19.7
C2	90 - 120	4.46	3.92	-0.54	0.14	0.03	0.06	0.04	2.72	7.40	3.00	7.68	24.77	3.60	90.70	73.33	4.4
<b>P09 – Typic Humicrypts/ Dystric Umbric Gleysols (Clayic) - 4450 m</b>																	
A1	0 - 10	4.49	3.64	-0.85	2.06	0.90	0.56	0.10	1.55	17.20	5.18	20.83	43.22	17.40	29.90	63.33	182.0
A2	10 - 30	4.66	3.7	-0.96	0.33	0.26	0.13	0.10	2.72	16.00	3.55	16.83	30.38	4.90	76.60	80.50	118.0
Cg1	30 - 40	4.84	3.66	-1.18	0.13	0.09	0.05	0.05	2.62	4.80	2.94	5.12	8.72	6.20	89.10	71.17	5.1
Cg2	40 - 100	4.97	3.7	-1.27	0.72	0.44	0.07	0.05	1.85	3.40	3.13	4.68	7.96	27.40	59.10	61.33	5.1
<b>P10 – Oxyaquic Cryofluvents/ Dystric Fluvisols (Clayic, Hyperhumic, Oxyaquic) - 3830 m</b>																	
Ah1	0 - 30	4.92	3.95	-0.97	2.90	0.55	0.11	0.24	0.87	12.50	4.67	16.30	39.37	23.30	18.60	86.00	95.6
Ah2	30 - 60	4.54	3.78	-0.76	2.21	0.32	0.07	0.14	1.36	13.60	4.10	16.34	39.37	16.80	33.20	83.67	95.6
Ch	60 - 90	5.04	3.92	-1.12	2.55	0.45	0.04	0.10	1.75	16.20	4.88	19.33	50.73	16.20	35.90	82.50	52.8
<b>P11 – Typic Humicrypts/ Cambic Umbrisols (Clayic, Hyperdystric, hyperhumic) - 4185 m</b>																	
A1	0 - 25	4.75	3.45	-1.30	1.01	0.13	0.11	0.14	4.08	16.40	5.47	17.79	31.94	7.80	74.60	80.83	69.6
A2	25 - 55	4.09	3.36	-0.73	0.4	0.03	0.06	0.09	5.54	18.90	6.12	19.48	35.42	3.00	90.50	88.00	71.7
Bwh	55 - 70	4.35	3.41	-0.94	0.51	0.09	0.07	0.05	5.25	17.00	5.97	17.72	33.31	4.10	87.90	88.17	33.1
CR	70 - 120	4.66	3.6	-1.06	0.43	0.15	0.06	0.06	4.18	7.40	4.88	8.10	21.54	8.60	85.70	71.17	5.2

<sup>a</sup> Acidez potencial

<sup>b</sup> Capacidade de troca de cátions efetiva

<sup>c</sup> Capacidade de troca de cátions potencial

<sup>d</sup> Capacidade de troca de cátions da fração argila

<sup>e</sup> Porcentagem de saturação de bases

<sup>f</sup> Saturação por alumínio

<sup>g</sup> Retenção de fósforo

<sup>h</sup> Carbono orgânico

Tabela 4. Teores de Fe e Al nos extratos de ditionito - citrato - bicarbonato de sódio (Fe<sub>d</sub> e Al<sub>d</sub>), oxalato ácido de amônio (Fe<sub>o</sub> e Al<sub>o</sub>) e pirofosfato de sódio (Fe<sub>p</sub> e Al<sub>p</sub>) nos horizontes dos perfis dos solos estudados.

Perfil	Prof. cm	Fe <sub>d</sub>	Al <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	Al <sub>o</sub>	Fe <sub>p</sub>	Al <sub>p</sub>	Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>	Al <sub>o</sub> /Al <sub>d</sub>	Al <sub>o</sub> + 1/2Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>p</sub> /Fe <sub>o</sub>	Al <sub>p</sub> /Al <sub>o</sub>	Ferridrita
		%											
<b>Peneplanície Amazônica</b>													
<b>P01 - Typic Hapludults/ Haplic Acrisols (Endoclayic, Cutanic, Differentic, Ochric) - 312 m</b>													
Ap	0 - 5	0.52	0.05	0.23	0.02	0.08	0.04	0.44	0.4	0.14	0.35	2.00	0.39
E	5 - 20	0.58	0.07	0.11	0.02	0.09	0.06	0.19	0.29	0.08	0.82	3.00	0.19
EB	20 - 30	0.55	0.07	0.08	0.02	0.06	0.04	0.15	0.29	0.06	0.75	2.00	0.14
Bt1	30 - 50	1.14	0.12	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.33	0.07	1.00	1.00	0.09
Bt2	50 - 100	2.89	0.31	0.06	0.11	0.07	0.1	0.02	0.35	0.14	1.17	0.91	0.10
BC	100 - 150	2.23	0.25	0.03	0.1	0.02	0.07	0.01	0.40	0.12	0.67	0.70	0.05
<b>P02 - Typic Plinthudults/ Haplic Plinthosols (Endoclayic, Dystric, Ochric) - 290 m</b>													
A	0 - 8	0.38	0.07	0.3	0.03	0.09	0.05	0.79	0.43	0.18	0.30	1.67	0.51
BA	8 - 25	0.09	0.1	0.15	0.05	0.11	0.03	1.67	0.50	0.13	0.73	0.6	0.26
Btgv1	25 - 60	0.85	0.21	0.15	0.11	0.07	0.07	0.18	0.52	0.19	0.47	0.64	0.26
Btgv2	60 - 100	1.46	0.33	0.1	0.21	0.02	0.13	0.07	0.64	0.26	0.20	0.62	0.17
<b>P03 - Typic Dystrudepts/ Dystric Cambisols (Loamic, Ochric) - 255 m</b>													
Ap	0 - 10	1.4	0.17	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.18	0.05	0.75	0.67	0.07
BA	10 - 30	1.51	0.19	0.05	0.02	0.04	0.03	0.03	0.11	0.05	0.80	1.5	0.09
Bw1	30 - 70	1.52	0.18	0.06	0.03	0.05	0.03	0.04	0.17	0.06	0.83	1.00	0.10
Bw2	70 - 120	1.65	0.19	0.06	0.03	0.06	0.04	0.04	0.16	0.06	1.00	1.33	0.10
BC	120 - 150	2.14	0.26	0.18	0.05	0.08	0.05	0.08	0.19	0.14	0.44	1.00	0.31
<b>P04 - Typic Dystrudepts/ Dystric Cambisols (Loamic, Ochric) - 240 m</b>													
Ap	0 - 12	0.92	0.27	0.04	0.07	0.29	0.06	0.04	0.26	0.09	7.25	0.86	0.07
Bw	12 - 50	0.05	0.14	0.04	0.06	0.04	0.04	0.80	0.43	0.08	1.00	0.67	0.07
BC	50 - 80	0.03	0.11	0.03	0.06	0.01	0.04	1.00	0.55	0.08	0.33	0.67	0.05
C	80 - 100	0.1	0.13	0.08	0.06	0.23	0.04	0.80	0.46	0.10	2.88	0.67	0.14
<b>Faixa Subandina</b>													
<b>P05 - Typic Dystrudepts/ Dystric Cambisols (Loamic, Ochric) - 313 m</b>													
A	0 - 35	0.83	0.22	0.13	0.08	0.21	0.08	0.16	0.36	0.15	1.62	1.00	0.22
AB	35 - 60	0.71	0.2	0.13	0.08	0.23	0.06	0.18	0.4	0.15	1.77	0.75	0.22
Bw	60 - 85	0.84	0.21	0.1	0.06	0.2	0.05	0.12	0.29	0.11	2.00	0.83	0.17
C	85 - 100	0.05	0.13	0.07	0.06	0.02	0.03	1.4	0.46	0.10	0.29	0.50	0.12
<b>P06 - Typic Udorthents/ Eutric Regosols (Loamic, Ochric) - 380 m</b>													
A	0 - 10	0.41	0.14	0.17	0.06	0.06	0.03	0.41	0.43	0.15	0.35	0.50	0.29
C1	10 - 50	0.11	0.11	0.22	0.06	0.07	0.03	2.00	0.55	0.17	0.32	0.50	0.37
C2	50 - 90	0.09	0.1	0.18	0.07	0.04	0.02	2.00	0.70	0.16	0.22	0.29	0.31
C3	90 - 110	0.13	0.12	0.31	0.08	0.05	0.04	2.38	0.67	0.24	0.16	0.50	0.53
<b>P07 - Typic Dystrudepts/ Eutric Cambisols (Clayic, Ochric) - 503 m</b>													
A	0 - 20	1.1	0.16	0.34	0.21	0.1	0.09	0.31	1.31	0.38	0.29	0.43	0.58
Bw	20 - 60	1.22	0.18	0.25	0.25	0.07	0.12	0.20	1.39	0.38	0.28	0.48	0.43

Cr	60 - 100	0.83	0.12	0.35	0.17	0.03	0.07	0.42	1.42	0.35	0.09	0.41	0.6
<i>Continuação ...</i>													
Perfil	Prof cm	Fe <sub>d</sub>	Al <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	Al <sub>o</sub>	Fe <sub>p</sub>	Al <sub>p</sub>	Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>	Al <sub>o</sub> /Al <sub>d</sub>	Al <sub>o</sub> + 1/2Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>p</sub> /Fe <sub>o</sub>	Al <sub>p</sub> /Al <sub>o</sub>	Ferridrita
%													
<b>Cordilheira Oriental</b>													
<b>P08 - Typic Humicrypets/ Cambic Umbrisols (Loamic, Hyperdystric) - 4725 m</b>													
A	0 - 12	1.64	0.33	0.58	0.26	0.19	0.21	0.35	0.79	0.55	0.33	0.81	0.99
AB	12 - 30	1.86	0.45	0.87	0.31	0.18	0.22	0.47	0.69	0.75	0.21	0.71	1.48
Bwh	30 - 55	2.39	0.62	1.14	0.47	0.76	0.48	0.48	0.76	1.04	0.67	1.02	1.94
C1	55 - 100	1.71	0.52	0.96	0.48	0.67	0.48	0.56	0.92	0.96	0.70	1.00	1.63
C2	90 - 120	0.91	0.24	0.32	0.2	0.09	0.14	0.35	0.83	0.36	0.28	0.70	0.54
<b>P09 - Typic Humicrypts/ Dystric Umbric Gleysols (Clayic) - 4450 m</b>													
A1	0 - 10	0.98	0.39	0.66	0.4	0.63	0.39	0.67	1.03	0.73	0.95	0.98	1.12
A2	10 - 30	1.25	0.51	0.71	0.54	0.68	0.71	0.57	1.06	0.9	0.96	1.31	1.21
Cg1	30 - 40	0.59	0.15	0.20	0.13	0.04	0.06	0.34	0.87	0.23	0.20	0.46	0.34
Cg2	40 - 100	0.37	0.11	0.31	0.22	0.03	0.03	0.84	2.0	0.38	0.10	0.14	0.53
<b>P10 - Oxyaquic Cryofluvents/ Dystric Fluvisols (Clayic, Hyperhumic, Oxyaquic) - 3830 m</b>													
Ah1	0 - 30	3.76	0.54	2.27	0.51	0.84	0.53	0.6	0.94	1.65	0.37	1.04	3.86
Ah2	30 - 60	1.72	0.41	0.76	0.38	1.22	0.59	0.44	0.93	0.76	1.61	1.55	1.29
Ch	60 - 90	0.63	0.55	0.39	0.66	0.33	0.67	0.62	1.2	0.86	0.85	1.02	0.66
<b>P11 - Typic Humicrypts/ Cambic Umbrisols (Clayic, Hyperdystric, hyperhumic) - 4185 m</b>													
A1	0 - 25	3.28	0.5	0.62	0.42	0.66	0.37	0.19	0.84	0.73	1.06	0.88	1.05
A2	25 - 55	3.2	0.59	0.65	0.47	0.77	0.44	0.2	0.8	0.80	1.18	0.94	1.11
Bwh	55 - 70	3.48	0.48	0.57	0.37	0.59	0.58	0.16	0.77	0.66	1.04	1.57	0.97
CR	70 - 120	4.29	0.22	0.18	0.11	0.07	0.1	0.04	0.5	0.20	0.39	0.91	0.31

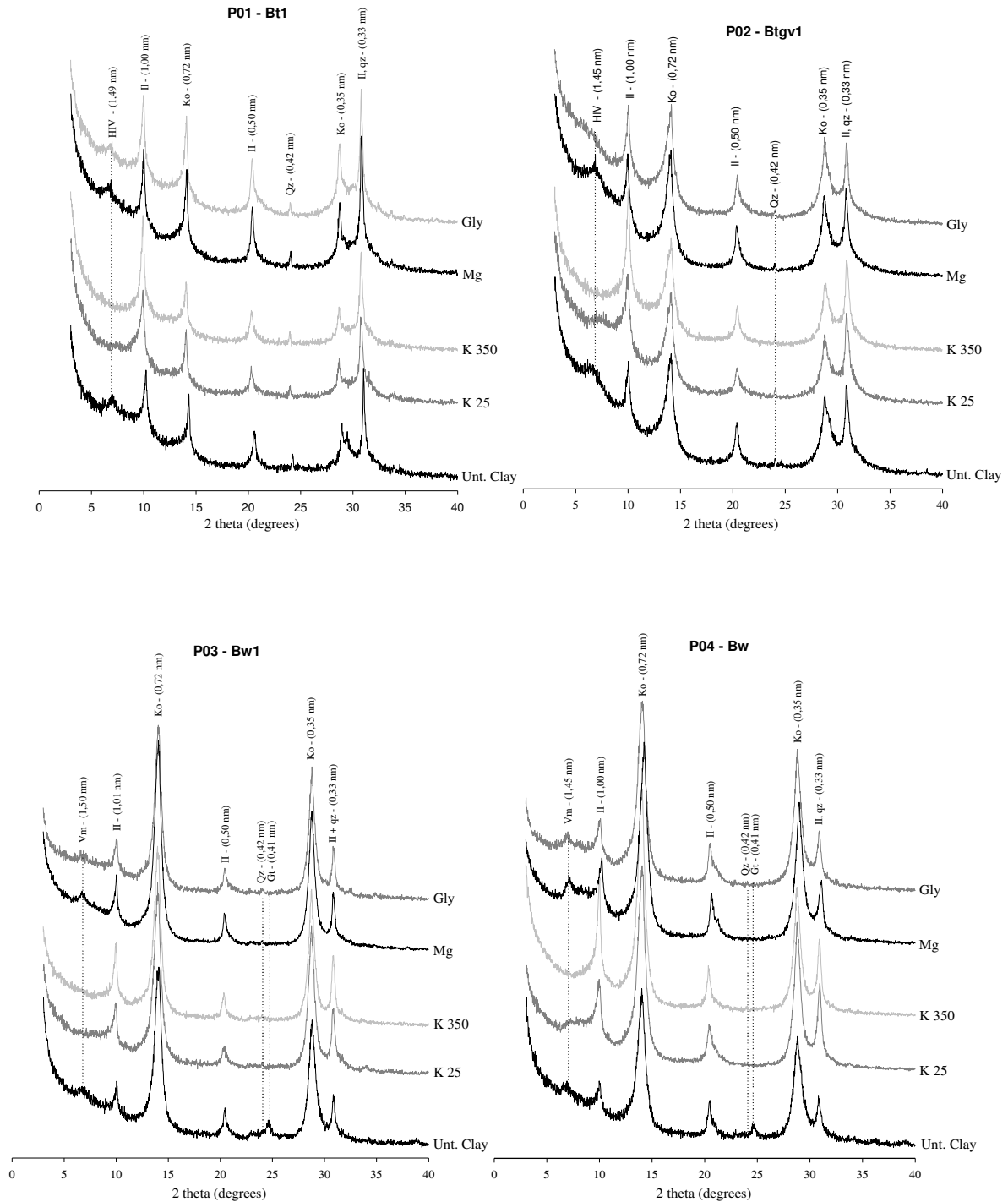


Figura 4. Difração de raios-X da fração argila dos pedons da *Peneplanície Amazonica*, Unt. Clay - Argila natural; saturação com K<sup>+</sup> (tratamento sob temperatura de 25° e 350°); saturação com Mg<sup>2+</sup>; saturação com Mg<sup>2+</sup>; Glycerol - saturado pelo Mg<sup>2+</sup> e solvatado com glicerol (Ko = caulinita; Gt = goetita; II = ilita; Qz = quartzo; HIV = vermiculite-hidroxy-entrecamadas)

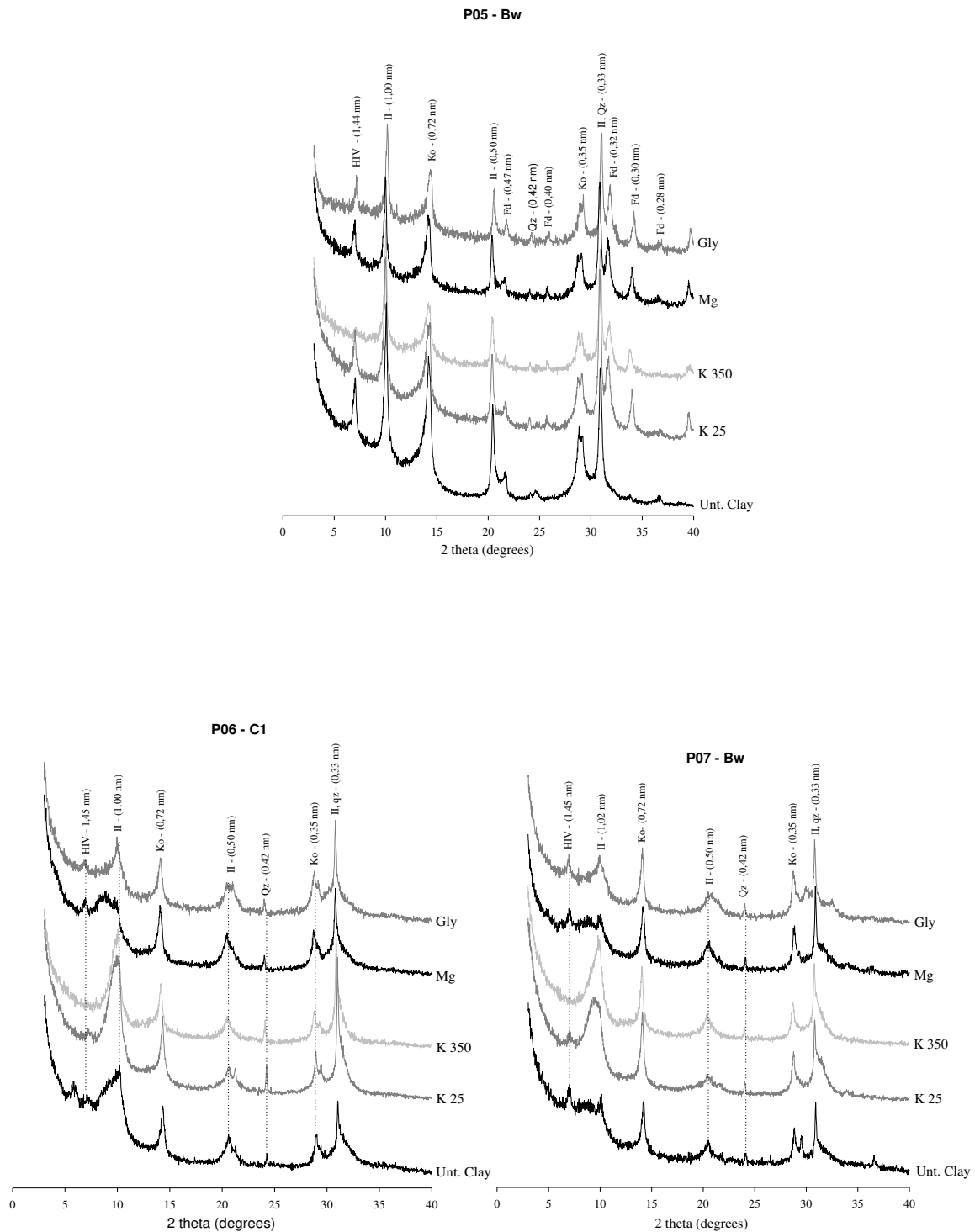


Figura 5. X - Difração de raios-X da fração argila dos pedons da *Faixa Subandina*. Unt. Clay - Argila natural; saturação com K<sup>+</sup> (tratamento sob temperatura de 25° e 350°); saturação com Mg<sup>2+</sup>; saturação com Mg<sup>2+</sup>; Glycerol - saturado pelo Mg<sup>2+</sup> e solvatado com glycerol (Ko = caulinita; II = illita; Qz = quartzo; HIV = Vermiculita-hidroxy-entrecamadas).

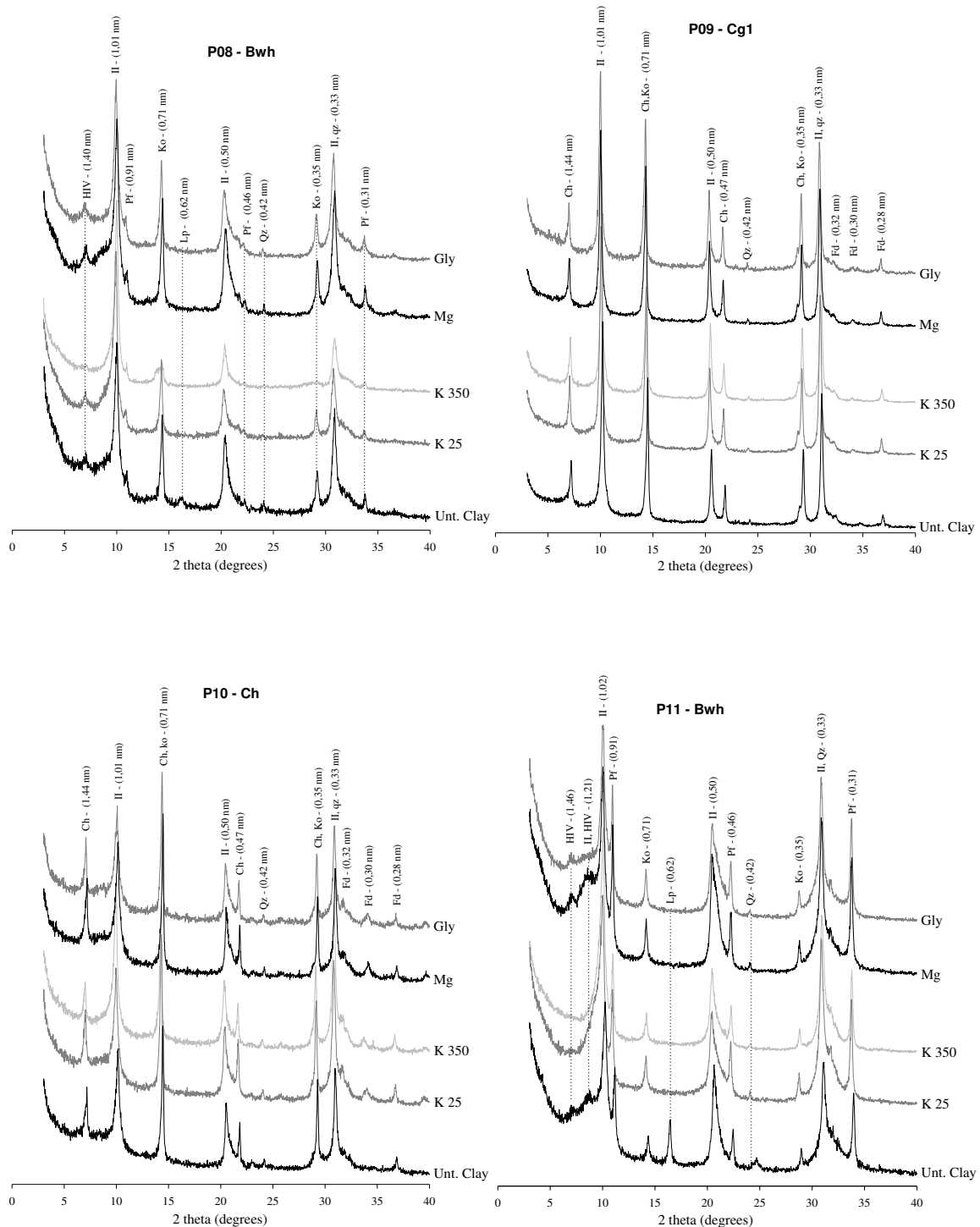


Figura 6. Difração de raios-X da fração argila dos pedons da *Cordilheira Oriental*, Unt. Clay - Argila natural; saturação com K<sup>+</sup> (tratamento sob temperatura de 25° e 350°); saturação com Mg<sup>2+</sup>; saturação com Mg<sup>2+</sup>; Glycerol - saturado pelo Mg<sup>2+</sup> e solvatado com glycerol (Ko = Kaolinite; Ch = clorita; II = ilita; Fd = feldespato; Ph = pirofilita; Qz = quartzo; HIV = Vermiculita-hidroxy-entrecamadas).

## 4. Discussão

### 4.1. Implicações climáticas, interações pedogeomorfológicas e a influência litológica

As variações dos solos e o desenvolvimento pedogenético observadas na região estudada, estão associadas ao relevo, que é relacionado a sequências de eventos tectônicos, e as diferenças de altitudes que influenciam no clima e vegetação, além do relevo são fatores determinantes no grau do desenvolvimento pedogenético dos solos.

Os pedons da Peneplanície Amazônica apresentam estado avançado de intemperismo em relação aos pedons da Faixa Subandina e Cordilheira Oriental, como indica a relação  $Fe_o/Fe_d$  e  $Al_o/Al_d$ , (Tabela 4) composição mineralógica (Figura 4, 5 e 6) e profundidade do solo (Tabela 2), em concordância com o clima tropical úmido e quente durante o Neogeno e Quaternário (VONHOF AND KAANDORP, 2010) determinantes no desenvolvimento pedogenético dos solos.

A ocorrência de Ultisols (P01 e P02) nas posições paisagísticas mais antigas, é induzida pela sua estabilidade estrutural ao longo do tempo (CAMACHO, 2020; CARNICELLI et al., 2015; MILLER, 1983; TYLER et al., 1978; WEST et al., 1997) permitindo a formação de horizonte argílico. De acordo com West et al. (1997) os Ultisols desenvolvidos de sedimentos transportados numa idade geológica específica, determina o tempo de formação do solo. Nosso estudo, os Ultisols foram desenvolvidos em sedimentos com idade de ~ 9 Ma (Miocene tardio) (Espurt et al., 2010).

Estudos efetuados por Osher & Buol (1998) em Ultisols derivados da Formação Madre de Dios - superior, constatou a presença de gibbsita e o domínio da caulinita. Neste trabalho não foi identificado a gibbsita em Ultisols derivados da Formação Madre de Dios - inferior, além de apresentar um equilíbrio na proporção dos minerais 2:1 e a caulinita (Figura 4), conferindo a eles o caráter de argila de atividade alta ( $> 24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) (IUUS WORKING GROUP WRB, 2015). Solos com argila de atividade alta foram reportados na mesma região tanto na faixa peruana (ONERN, 1977) como na brasileira (GAMA, 1986; AMARAL, 2007) apesar de apresentarem elevados teores de  $Al^{3+}$  trocável (Tabela 3), não satisfazem as características de elevada acidez, baixa CTC e CTC efetiva, além de  $\Delta pH$  elevado e negativo. Bernini et al. (2013) Alguns autores estudando solos de argila de atividade alta no Acre, Brasil, indica que a extração com KCl sobrestima o conteúdo de Al trocável devido a capacidade de extrair o Al não trocável presente nas entrecamadas da esmectita. Os Ultisols apresentaram o

alto teor de  $Al^{3+}$  trocável que pode estar relacionado a presença de minerais 2:1 como vermiculita hidróxi-alumínio entre-camadas (HIV) favorecido pelas condições ácidas do solo (ING, et al., 2002; YING, et al., 2013; RICH, 1968).

A goethita em Ultisols reportado por Osher & Buol (1998) explicaria a pedogênese dos Inceptisols (P03 e P04) derivado das relíquias dos Ultisols (ONERN, 1972) submetido a um intenso intemperismo durante o Quaternário e formando ambientes muito estáveis, depositados em períodos úmidos (VONHOF & KAANDORP, 2010) com boas condições de drenagem, observando-se picos de caulinita bastantes intensos (Figura 4) conferindo caráter de argila de atividade baixa ( $< 24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) (IUUS WORKING GROUP WRB, 2015).

O P03 (Oxic Dystrudepts) apresenta pH mais elevado (Tabela 3) do que o P04 (Typic Dystrudepts) o que promove a liberação de quantidades razoáveis de bases a partir do desgaste do material mais próximo a superfície, com características óxicas observadas em campo como estrutura granular típica, valores bem baixos da razão de  $Fe_o/Fe_d$  em todos os horizontes, refletindo o predomínio de formas de óxidos de ferro de maior cristalinidade (hematita e goethita) (OLIVEIRA et al., 1998) favorecidos pela baixa atividade da água e boa aeração. Porém a presença de vermiculita (Figura 4) parece conferir valores da CTC de argila ( $> 16 \text{ cmol}_c/\text{kg}$ ) (IUUS WORKING GROUP WRB, 2015; Soil Survey Staff, 2014) além de fragmentos de rocha a profundidade de 50 a 100 cm e justificando sua definição como Inceptisols.

Condições semelhantes de desenvolvimentos de Oxisols a partir de materiais retrabalhados com características óxicas foram reportados por vários autores (CAMACHO et al., 2020; CUNHA et al., 2019; MATHIAN et al., 2020; SKORUPA et al., 2017; VIDAL-TORRADO & LEPSCH, 1999). (SKORUPA et al., 2017) indica que o caráter óxico em Inceptisols (Typic Dystrudepts) reforça o desenvolvimento dos Oxisols a partir de materiais pre intemperizados, desde que o clima seja tropical e úmido. Porém o processo de pedogênese do nosso solo em estudo (P03) é ainda de menor intensidade, sendo retardada pelo clima atual mais seco (INADE, 2007) criando um ambiente mais conservador.

Os grandes processos erosivos e a deformação da Tectónica Andina durante o Mioceno - Plioceno (PALACIOS et al., 1996) acompanhados pelas mudanças climáticas como a alteração da pluviosidade, taxas de erosão e sedimentação durante o Mioceno até o quaternário (VONHOF AND KAANDORP, 2010), afetaram o desenvolvimento dos solos. A vegetação atribuída a estabilidade do ecossistema durante o quaternário pleistocênico (RODDAZ et al.,

2005) favoreceu a pedogênese dos solos com desenvolvimento de horizonte B (P05 e P07) corroborando os solos encontradas pelo ONERN (1977) na mesma região. O P06 (Typic Udorthents) evidencia a forte dinâmica erosiva coluvial devido à instabilidade dos contrafortes andinos, com valores mais altos da razão de  $Fe_o/Fe_d$  (Tabela 4) sugerindo solo mais novo em relação aos outros pedons em estudo.

O P05 (Typic Dystrudepts) apresenta um maior desenvolvimento como sugere os resultados de análises químicas (Tabela 3) com saturação de bases < 50%, valores baixos da razão  $Fe_o/Fe_d$  (Tabela 04) e mineralogia (Figura 05) com picos intensos de caulinita e illita, além de feldspatos. Os minerais do grupo dos feldspatos identificados, estão comumente relacionados com a composição mineralógica do material parental associado à Formação Ipururo (Tabela 1). Além das condições climáticas como a alta pluviosidade e clima quente, o maior desenvolvimento do P05 na Faixa Subandina provavelmente deve-se a pouca taxa de erosão sofrida pelo relevo durante tectônica Andina em comparação com os pedons P06 e P07 apesar de estarem localizados em depósitos sedimentares mais antigos (Cretáceo inferior) (Tabela 1). Valores mais altos de pH e  $Ca^{2+}$  observados no P06 e P07 está relacionado com o material parental, constituído de materiais calcários associados a Formação Chonta (Tabela 1), associados a argila de atividade alta ( $>24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) (IUUS WORKING GROUP WRB, 2015) e saturação por bases > 50% (Tabela 3).

Características típicas dos solos da região alto andina são o alto teor de carbono orgânico (WILCOX et al., 1988; GOODMAN et al., 2001; PORTES et al., 2016; ROLANDO et al., 2017; SENRA et al., 2019) como observado na Cordilheira Oriental (Tabela 3). Propriedades de solo como pH, e textura do solo, afetam a decomposição da matéria orgânica, afetando assim mesmo o teor de carbono orgânico (YU et al., 2020). A Pobreza nutricional reduz a atividade biológica, retardando o processo de decomposição da MO, porém exercendo um papel importante na geração de cargas que contribui a CTC do solo associado ao alto teor de argila (Tabela 3).

Outros fatores que preservam o alto teor de carbono orgânico em altitudes elevadas, é a presença de materiais não cristalinos como a ferrihydrite (Tabela 3) e complexo Al - húmus (SHOJI et al., 1993). Kleber et al. (2005) indica que os materiais não cristalinos exercem um papel muito importante na estabilização e formação de complexos organo - mineral. Por outro lado, devido a toxidez de alumínio q afetam a atividade biológica, a presença de complexos de Al húmus pode impedir a decomposição da matéria orgânica. Estudos realizados em Galápagos

(CANDRA et al., 2019) indica que a estabilização da matéria orgânica do solo com presença de materiais não cristalinos resultou num decréscimo da mineralização do carbono orgânico.

O P08 (Typic Humicryepts) de relevo montanhoso localizado na parte mais alta (4725 m) na Cordilheira Oriental apresenta os teores de carbono orgânico mais baixos em relação aos pedons P09, P10 e P11. A forte erosão sofrida pelo aumento da precipitação (SELTZER, 1990) durante o último período máximo glacial local (MARK et al., 2002; SMITH et al., 2005) poderia ter influenciado no seu desenvolvimento até alcançar a estabilidade, onde na atualidade apresenta espécie vegetativa a “cesped de puna” (IMA, 2009). O P11 encontra-se no mesmo material parental (Tabela 1), composição mineralógica (Figura 6) do que o pedon P08, pois esta apresenta maior grau de intemperismo como observado nos valores baixos  $Fe_o/F_d$  (Tabela 4), isto ocasionado pela estabilidade das encostas e clima mais quente (IMA, 2009). Valores mais altos de carbono orgânico foram observados nos pedons localizados nos Vales Fluviogaciais (P09 e P10).

Destaca-se que onde são encontrados horizontes Bw, sugere-se longos períodos de estabilidade como observado nos pedons P08 e P11. Resultados de datação de  $^{14}C$  nos pedons da Cordilheira Vilcanota em Cuzco identificados por (GOODMAN et al., 2001) demonstram idades  $> 41,520$  BP para Bt e  $< 16,650$  para Bw e Cg. Miller and Birkeland, (1992) encontraram solos com horizontes Bw (Back slope) na Cordilheira Oriental no norte de Perú, indicando que as encostas estudadas estão estáveis entre 8 e 12 ka.

A pirofilita observado nos pedons P08 e P11 (Figura 6) derivado de rochas metamórficas (Tabela 1) foi possivelmente a fonte de  $Al^{3+}$  liberado pelo intemperismo observando-se valores mais altos em relação aos pedons P09 e P11. A pirofilita é um aluminossilicato muito raro nos solos, más é frequentemente encontrada em rochas metamórficas dos Andes rico em alumínio (RUIZ CRUZ, et al., 2004). A presença de clorita nos pedons dos vales fluviogaciais (P09 e P10) de sedimentos metassedimentares indica baixo grau de evolução, além de apresentar valores bem altos da razão  $Fe_o/Fe_d$ . Porém avaliar o grau de intemperismo desconsiderando a mineralogia da fração argila poderia implicar em grandes erros (PORTES et al., 2016).

#### 4.2. Análises da dissolução seletiva

O aumento da razão  $Fe_o/Fe_d$  e  $Al_o/Al_d$  é observado nos pedons da *Cordilheira oriental* (Tabela 4), o que sugere a dominância de formas de Fe e Al não cristalino ocasionado pelos

altos teores de carbono orgânico devido as baixas temperaturas a maior altitude, q dificulta a cristalização dos óxidos do Fe (KLEBER et al., 2015; SCHWERTMANN, 1985). Observa-se que o pedons P05 e P11 apresenta  $Fe_o < Fe_p$ , e  $Fe_d$  mais alto do que  $Fe_o$  e  $Fe_p$ , o que sugere que as quantidades de Fe liberadas pelo intemperismo dos minerais são principalmente complexadas com sustâncias húmicas e depois transformadas óxidos de Fe cristalino, mas pobremente ordenado. Valores mais altos de  $Fe_o/Fe_d$  foi observado no P06 (Typic Udorthents), sugerindo um solo pouco evoluído respeito aos outros pedons estudados.

Valores  $Fe_o/Fe_d < 0,07$  observados nos pedons da *Peneplanicie Amazônica* sugerem a predominância de hematita e goethita (SCHWERTMANN et al., 1982) favorecido pelas altas temperaturas (LEWIS AND SCHWERTMANN, 1979). Razão  $Fe_o/Fe_d$  cerca de 0.2, sugere que uma pequena quantidade do Fe extraível está presente como minerais de Fe pouco ordenados como a ferrihydrite (PARFITT AND CHILDS, 1988). Valores mais altos de ferrihydrite foram encontrados nos pedons da Cordilheira Oriental, evidenciado pelos valores altos de  $Fe_o/Fe_d$  (Tabela 4), onde o baixo pH, baixa temperatura e alta matéria orgânica favoreceram a sua formação, além da lepidocrocite (CAMPBELL AND SCHWERTMANN, 1984) corroborando os resultados das análises de DRX no P08 e P11 (Figura 6). Em horizontes superficiais dos pedons da Peneplanicie Amazônica e Faixa Subandina apresentaram valores altos de ferrihydrite (Tabela 4), diminuindo em profundidade.

Valores da razão  $Fe_p/Fe_o > 0.2$  evidenciam o domínio de complexos orgânicos sobre formas não cristalina de Fe. Em consequência, alguns solos mostram valores altos de  $Fe_o/Fe_d$  revelando a dominância de formas não cristalinas. Embora, valores de  $Fe_p$  mais altos do que  $Fe_o$  (Tabela 4) não é consistente, uma vez que as formas dissolvidas pelo método oxalato de amônio não é eficiente para extrair o Fe e Al associados com ácidos húmicos (LOVELAND E BULLOCK, 1976). Resultados similares foram reportados por Portes et al. (2016) e Senra et al., (2019).

A razão  $Al_p/Al_o$  é usado para identificar a presença de alofana ou imogolite ( $Al_p/Al_o < 0.5$ ) ou complexos de Al - Humus ( $Al_p/Al_o > 0.5$ ) (NANZYU et al., 1993). Nosso estudo a razão  $Al_p/Al_o > 0.5$  indica a dominância de complexos de Al - Húmus na maioria dos pedons com exceção do P05 e horizonte C do P07 e P09. A formação de alofana e imogolite vs a formação de complexos de Al e Fe, são regidos pela acidez do solo. A allophane e imogolite predominam a  $(H_2O) > 4,9$ , enquanto os complexos de Al e Fe - húmus predominam a pH mais baixo (SHOJI AND FUJIWARA, 1984).

#### 4.3. Processos pedogenéticos associados a topolitosequência

Ao longo da topolitosequência analisada foi possível identificar a ocorrência de vários processos pedogenéticos. Na *Peneplanície Amazônica*, o principal processo pedogenético encontrada foi a migração da argila (lessivagem), favorecido pela elevada pluviosidade da região. A lessivagem vertical foi observada principalmente nos pedons P01 e P02, evidenciado pelos filmes de argila, estas feições também foram registradas por Osher & Buol (1998). Na região também observou-se sinais de leucinização, com este processo de perda de matéria orgânica registrou-se horizontes empalidecidos (P01) (Figura 3), desta forma teve-se a gênese de horizonte E (Tabela 1).

A restrição de drenagem, associado aos ciclos de umedecimento e secagem, favoreceu os processos de plintização formado pela segregação do Fe, que ocorreu principalmente no horizonte Bt e evidenciado pela presença de mosqueados vermelhos (DOS ANJOS et al., 1995; FRITSCH et al., 2007; DELARMELINDA et al., 2017) e formação de concreções endurecidas (< 5%) como registrado no P01. Estas características plínticas encontram-se normalmente em solos formados em solos tropicais sub-úmidos (DOS ANJOS et al., 1995; IUSS WORKING GROUP WRB, 2015). Osher and Buol (1998) indica que a proeminência das características redoxi-mórficas nestes solos é muito provavelmente o resultado do clima atual. De acordo a INADE (2007) o clima atual onde encontra-se localizados os Ultisols em estudo, estão em transição a um clima tropical úmido.

Em relação à Faixa Subandina o desenvolvimento de estrutura em blocos subangulares no P05 e P07, indica o processo de pedalização, por estarem localizados em áreas estáveis, de temperaturas bastante quente e úmida, onde na atualidade o desenvolvimento de vegetação estabiliza as encostas das montanhas, melhorando a pedogênese do solo como observado por diversos trabalhos na Faixa Subandina Peruana e Boliviana (ONERN, 1972; SENRA et al. 2019).

O principal processo observado na Cordilheira Oriental está associado a acumulação de matéria orgânica (Melanização), que produz uma coloração escura no horizonte A dos pedons, corroborados por inúmeros trabalhos (GOODMAN et al., 2001; MILLER & BIRKELAND, 1992; PORTES et al., 2016; WILCOX et al., 1988) nos Andes Peruanos. Processos de quelação foram reportadas nos pedons P08, P10 e P11, onde os cátions liberados durante o intemperismo são mobilizados por combinar-se com ácidos orgânicos (Buurman and Van Reewijk, 1984), demonstrado pelos valores próximos a 1 das relações  $Fe_p/Fe_o$  e  $Al_p/Al_o$ .

O P11, além de apresentar processos de melanização e quelação, pois encontrou-se muitas quebras das rochas (crioclastia), como produto de ciclos repetitivos de congelamento e descongelamento, destaca-se o horizonte Cr do P11. Esse processo de “crioclastia” parece ter sido ocasionado durante os últimos períodos frios (glaciação) reportados por diversos estudos na região andina (BUFFEN et al., 2009; CLAPPERTON, 1983; GOODMAN et al., 2001; MARK et al., 2004; RABASSA & CLAPPERTON, 1990; RODBELL et al., 2009), na atualidade o clima é mais quente (IMA, 2007).

O intenso processo de gleyzação no P09, trata-se provavelmente de uma herança pedogenética de um ambiente com nível do lençol freático mais alto, visto que as condições atuais não indicam encharcamento que justifique a existência do horizonte Cg (Figura 3) como observado em campo, além da presença de mosqueados brunados (ferrihidrita), corroborado pelos valores de  $Fe_p/Fe_o < 0.2$  (Tabela 4). Kampf and Curi (2012) indica que o rebaixamento do lençol freático, os macroporos e canais de raízes são os primeiros em oxidar, devido a rápida difusão do  $O_2$ . Em adição o interior reduzido dos agregados tem cores cinzentas, e a superfície oxidada há a formação de mosqueados ( $Fe^{3+}$ ).

## 5. Conclusões

Os solos da topolitosequência dos Andes à Amazônia Peruana retratam diminuição dos processos de intemperismo químico de acordo com o aumento do gradiente altitudinal. Este padrão pode ser confirmado a partir da observação dos processos pedogenéticos.

Na Cordilheira Oriental registrou-se a dominância de processos físicos (como crioclastia), melanização (devido ao maior acúmulo orgânico em altitudes elevadas) e gleyzação, retratando uma herança pedogenética. Por sua vez na Faixa Subandina predomina a pedalização, em contraste com a Peneplanície Amazônica onde predominam a pedalização, lessivagem e plintização.

As assembleias mineralógicas também confirmam a diminuição do intemperismo químico com incremento da altitude. E refletem sinais de crioclastia na Cordilheira Oriental através da presença de minerais primários (como quartzo) na fração argila. O transporte de material andino em direção a Amazônia também pode ser observado a partir de caracterização mineralógica, com presença de minerais 2:1 na fração argila dos solos amazônicos.

Valores elevados da razão  $Fe_o/Fe_d$ ,  $Al_o/Al_d$ ,  $Fe_p/Fe_o$  e  $Al_p/Al_o$  foram observados nos solos das altas montanhas da *Cordilheira Oriental*, indicando que a melanização não permite uma maior cristalinidade dos óxidos de Fe e Al. Os solos não possuem características Andicas, com valores de relação  $Al_o+1/2Fe_o < 2\%$  em todos os solos.

#### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Este trabalho é a contribuição do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera - grupo TERRANTAR

#### Referencias

ALVAREZ, V.V.H., NOVAIS, R.F., DIAS, L.E., OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fosforo remanescente. B. **Inf.SBCS** v. 25, p. 27-32, 2000.

AMARAL, E.F. Estratificação de Ambientes para Gestão Ambiental e Transferencia de Conhecimento, no Estado de Acre, Amazônia Occidental. **Universidade Federal do Viçosa**. 185 p. (Tese de Doutorado), 2007.

ANDERSON, J.U. An Improved Pretreatment for Mineralogical analysis of Samples Containing Organic Matter. **Clays Clay Miner.** v. 10, p.380–388, 1961.

ANJOS, L.H.C., FRANZMEIER, D. P., SCHULZE, D. G. Formation of soils with plinthite on a toposequence in Maranhão State, Brazil. **Geoderma**, v. 64 n.3–4, p.257–279, 1995

ANICETO, K.; MOREIRA-TURCQ, P.; CORDEIRO, R.C.; FRAIZY, P.; QUINTANA, I., TURCQ, B. Holocene paleohydrology of Quistococha Lake (Peru) in the upper Amazon Basin: Influence on carbon accumulation. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 415, p. 165–174, 2014.

BERNINI, T.A.; PEREIRA, M.G.; FONTANA, A.; ANJOS, L.H.C.; CALDERANO, S.B.; WADT, P.G.S.; MORAES, A.G.L.; SANTOS, L.L. Taxonomia de solos desenvolvidos sobre depósitos sedimentares da Formação Solimões no Estado do Acre. **Bragantia**, v. 72, n. 1, p. 71–80, 2013.

BUFFEN, A.M.; THOMPSON, L.G.; MOSLEY-THOMPSON, E.; HUH, K.I. Recently exposed vegetation reveals Holocene changes in the extent of the Quelccaya Ice Cap, Peru.

**Quaternary Research**, v. 72, n. 2, p. 157–163, 2009.

BURMAN, P.; VAN REEUWIJK, L.P. Proto-imogolite and the process of podzol formation: a critical note. **Journal of Soil Science**, v. 35, n. 3, p. 447–452, 1984.

BUYTAERT, W.; CÉLLERI, R.; DE BIÈVRE, B.; CISNEROS, F.; WYSEURE, G.; DECKERS, J.; HOFSTEDE, R. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. **Earth-Science Reviews**, v. 79, n. 1–2, p. 53–72, 2006..

CABRERA, J.; SÉBRIER, M.; MERCIER, J.L. Plio-Quaternary geodynamic evolution of a segment of the Peruvian Andean Cordillera located above the change in the subduction geometry: the Cuzco region. **Tectonophysics**, v. 190, n. 2–4, p. 331–362, 1991.

CAMACHO, M.E.; QUESADA-ROMÁN, A.; MATA, R.; ALVARADO, A. Soil-geomorphology relationships of alluvial fans in Costa Rica. **Geoderma Regional**, v. 21, 2020.

CANDRA, I.N., GERZABEK, M.H., OTTNER, F., TINTNER, J., WRIESSNIG, K., & ZEHETNER, F. (2019). Weathering and soil formation in rhyolitic tephra along a moisture gradient on Alcedo Volcano, Galápagos. **Geoderma**, 343, 215-225.

CAMPBELL, A.S.; SCHWERTMANN, U. Iron oxide mineralogy of placic horizons. **Journal of Soil Science**, v. 35, n. 4, p. 569–582, 1984.

CARNICELLI, S.; BENVENUTI, M.; ANDREUCCI, S.; CIAMPALINI, R. Late Pleistocene relic Ultisols and Alfisols in an alluvial fan complex in coastal Tuscany. **Quaternary International**, v. 376, p. 163–172, 2015.

CARLOTTO, V., CARDENAS, J., CARLIER, G., 2011. Geología del Cuadrángulo de Cusco 28 - s - 1:50000. INGEMMET, Boletín, Serie A: 138, 258p., 6 mapas.

CHILDS, C.W.; MATSUE, N.; YOSHINAGA, N. Ferrihydrite in volcanic ash soils of Japan. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 37, n. 2, p. 299–311, 1991

CLAPPERTON, C.M. The glaciation of the Andes. **Quaternary Science Reviews**, v. 2, n. 2–3, p. 83–155, 1983.

COOMES, O. T. Paleoriverine Features of the Amazon Lowlands: Human Use of the ‘Arena Negra’ Soils of Lake Charo, Northeastern Peru. **Amazonian Dark Earths: Explorations in Space and Time**. [S.l: s.n.], 2004

CUNHA, A. DE M.; FONTES, M. P. F.; LANI, J. L. Mineralogical and chemical attributes of soils from the Brazilian atlantic forest domain. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 1, p. 82–92, 2019

DAMOTTA, P.E.F.; KAMPF, N. Iron oxide properties as support to soil morphological features for prediction of moisture regime in oxisols of central Brazil. *Z. Pflanzenernahr. Bodenk.* 55, 385 - 90, 1992.

DELARMELINDA, E.A.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; WADT, P.G.S.; DENG, Y.; CAMPOS, M.C.C.; CÂMARA, E.R.G. 2017. Soil-landscape relationship in a chronosequence of the middle Madeira River in southwestern Amazon, Brazil. *Catena*, 149: 199-208.

DUMONT, J. F.; LAMOTTE, S.; KAHN, F. Wetland and upland forest ecosystems in Peruvian Amazonia: Plant species diversity in the light of some geological and botanical evidence. *Forest Ecology and Management*, v. 33-34, n. C, p. 125-139, 1990.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de solo. Manual de métodos de análises de solos. Rio de Janeiro. 3 ed. Rio de Janeiro, RJ: **EMBRAPA Solos**. 230 p, 2017

ESPURT, N.; BABY, P.; BRUSSET, S.; RODDAZ, M.; HERMOZA, W., BARBARAND, J. The Nazca Ridge and Uplift of the Fitzcarrald Arch: Implications for Regional Geology in Northern South America. *Amazonia, Landscape and Species Evolution: A Look into the Past*, n. 2007, p. 89-100, 2010.

ESPURT, N.; FUNICIELLO, F.; MARTINOD, J.; GUILLAUME, B.; REGARD, V. FACCENNA, C.; BRUSSET, S. Flat subduction dynamics and deformation of the South American plate: Insights from analog modeling. *Tectonics*, v. 27, n. 3, p. 1–19, 2008.

FRITSCH, E., HERBILLON, A. J., DO NASCIMENTO, N. R., GRIMALDI, M., MELFI, A. J., 2007. From Plinthic Acrisols to Plinthosols and Gleysols: Iron and groundwater dynamics in the tertiary sediments of the upper Amazon basin. *European Journal of Soil Science*, 58(5), 989–1006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00877.x>

GAMA, J.R.N.F., 1986. Caracterização e formação de solos com argila de atividade alta do Estado do Acre. Itaguaí, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 150 p. (Dissertação de Mestrado)

GARDI, C.; ANGELINI, M.; BARCELÓ, S.; COMERMA, J.; CRUZ GAISTARDO, C.; ENCINA ROJAS, A.; JONES, A.; KRASILNIKOV, P.; MENDONÇA-SANTOS, M.L.; MONTANARELLA, L.; MUNIZ UGARTE, O.; SCHAD, P.; VARA RODRÍGUEZ, M.I; VARGAS, R. (eds). Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. **Luxembourg, Comisión Europea, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea**, L-2995. 176 pp, 2014

GARREAUD, R.D. The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, v. 22, p. 3–11,

2009.

GOODMAN, A.Y.; RODBELL, D.T.; SELTZER, G.O.; MARK, B.G. Subdivision of glacial deposits in southeastern Peru based on pedogenic development and radiometric ages. **Quaternary Research**, v. 56, n. 1, p. 31–50, 2001.

HÄGGI, C.; CHIESSI, C.M.; MERKEL, U.; MULITZA, S.; PRANGE, M.; SCHULZ, M.; SCHEFUß, E. Response of the Amazon rainforest to late Pleistocene climate variability. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 479, p. 50–59, 2017.

HAMILTON, S.K.; KELLNDORFER, J.; LEHNER, B., TOBLER, M. Remote sensing of floodplain geomorphology as a surrogate for biodiversity in a tropical river system (Madre de Dios, Peru). **Geomorphology**, v. 89, n. 1- 2 SPEC. ISS., p. 23–38, 2007.

HÉRAIL, G., FORNARI, M., ROUHIER, M., 1989. Geomorphological control of gold distribution and gold particle evolution in glacial and fluvio-glacial placers of the Ancocalla-Ananea basin - Southeastern Andes of Peru. *Geomorphology*, 2(4), 369 - 383. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(89\)90021-4](https://doi.org/10.1016/0169-555X(89)90021-4)

IMA (Instituto de Manejo de Agua y Medio Ambiente), 2009. Zonificación Ecológica Económica de la Región Cusco. PER - IMA. Cusco, Perú.

INADE (Instituto Nacional de Desarrollo), 2007. Estudio de Meso Zonificación Ecológica Económica del Corredor Interoceánico Sur Tramo Iñapari - Inambari. INADE - PEAE. Madre de Dios, Perú.

INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico). 1995. Geología del Perú. Serie A: Carta Geológica Nacional, 55. Lima, escala 1:4 000 000.

ING, H.; EU, S.; ENG, U. Clay mineralogy of spodosols with high clay contents in the Subalpine Forest of Taiwan. **Clays and Clay Miner.** v. 50, n. 6, p. 726–735, 2002.

INSEL, N.; POULSEN, C. J.; EHLERS, T. A. Influence of the Andes Mountains on South American moisture transport, convection, and precipitation. **Climate Dynamics**, v. 35, n. 7, p. 1477–1492, 2010.

IUUS WORKING GROUP WRB. **Base Referencial mundial del recurso suelo 2014, actualización.** [S.l: s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/i3794es/I3794es.pdf>>.

KAMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (Pedogênese). In: KER, J.C., CURI, N., SCHAEFER, C.E.G.R.; TORRADO, P.V. Pedologia: Fundamentos. Viçosa, SBCS. 343 p,

2012.

KLEBER, M.; EUSTERHUES, K.; KEILUWEIT, M.; MIKUTTA, C.; MIKUTTA, R.; NICO, P.S. Mineral-Organic Associations: Formation, Properties, and Relevance in Soil Environments. [S.l.]: **Elsevier Ltd**, 2015. v. 130.

KLEBER, M.; SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; RÖBNER, J.; JAHN, R. Halloysite versus gibbsite: Silicon cycling as a pedogenetic process in two lowland neotropical rain forest soils of La Selva, Costa Rica. **Geoderma**, v. 138, n. 1–2, p. 1–11, 2007

LEWIS, D.G.; SCHWERTMANN, U. The Influence of Aluminum on the Formation of Iron Oxides. IV. The Influence of [Al], [OH], and Temperature. **Clays and Clay Minerals**, v. 27, n. 3, p. 195–200, 1979.

LOVELAND, P.J.; BULLOCK, P. **Chemical and mineralogical properties of brown podzolic soils in comparison with soils of other groups**. Journal of Soil Science, v. 27, p. 52–56, 1976.

MARK, B.G.; SELTZER, G.O.; RODBELL, D.T. Late Quaternary glaciations of Ecuador, Peru and Bolivia. **Developments in Quaternary Science**, v. 2, n. PART C, p. 151–163, 2004

MARK, B.G.; SELTZER, G.O.; RODBELL, D.T.; GOODMAN, A.Y. Rates of deglaciation during the last glaciation and holocene in the Cordillera Vilcanota-Queelccaya Ice Cap Region, southeastern Perú. **Quaternary Research**, v. 57, n. 3, p. 287–298, 2002.

MATHIAN, M.; BUENO, G. T.; BALAN, E.; RITSCH, E.; DO NASCIMENTO, N. R.; SELO, M.; ALLARD, T. Kaolinite dating from Acrisol and Ferralsol: A new key to understanding the landscape evolution in NW Amazonia (Brazil). **Geoderma**, v. 370, 2020.

MCKEAGUE, J.A. An Evaluation of 0.1 M pyrophosphate and pyrophosphate - dithionite in comparison with oxalate as extractants of the accumulation products in podzols and some other soils. **Can. J. Soil Sci.**, v. 47 (2), p. 95–99, 1967.

MCKEAGUE, J.A.; DAY, J.H. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al AIDS in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 46, n. 1, p. 13–22, 1966.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron Oxide Removal from Soils and Clays by a Dithionite-Citrate System Buffered with Sodium Bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, v. 7, n. 1, p. 317–327, 1958

MILLER, B.J. Chapter 8 Ultisols. **Developments in Soil Science**, v. 11, n. PART B, p. 283–323, 1983.

MILLER, D.C.; BIRKELAND, P.W. Soil catena variation along an alpine climatic transect, northern Peruvian Andes. **Geoderma**, v. 55, n. 3–4, p. 211–223, 1992.

MOLINA, O.; REYNA, C.; GALLOSO, A. Mapa Geologico del Cuadrangulo de Colorado 26v (2845). Serie A: Carta Geologica Nacional. Escala 1: 100 000, Lima - Perú, 1996. <https://geocatminapp.ingemmet.gob.pe/complementos/descargas/Mapas/GeologiaIntegrada/27v.png>

MOURA, M.M.; DOS SANTOS, A.R.; PEZZOPANE, J.E.M.; ALEXANDRE, R.S.; DA SILVA, S.F.; PIMENTEL, S.M.; DE ANDRADE S.S.; SILVA, F.G.R.; BRANCO, E.R.F.; MOREIRA, T.R.; DA SILVA, R.G.; DE CARVALHO, J. R. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 1639–1651, 2019.

MUNSELL SOIL COLOR COMPANY. Munsell Soil Color Charts, **Baltimore**, 2012.

NANZYO, M.; DAHLGREN, R.; SHOJI, S. Chapter 6 Chemical Characteristics of Volcanic Ash Soils. **Developments in Soil Science**, v. 21, n. C, p. 145–187, 1993.

OLIVEIRA, C.V.; KER, J.C.; FONTES, L.E.F.; CURI, N.; PINHEIRO, J.C. Química e mineralogia de solos derivados de rochas do Grupo Bambuí no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 583–593, 1998.

OFICINA NACIONAL DE EVALUACIÓN DE RECURSOS NATURALES. Inventario, evaluación e integración de los recursos naturales de la zona de los rios Inambari y Madre de Dios. **ONERN**, Lima, Perú, 369p, 1972.

OFICINA NACIONAL DE EVALUACIÓN DE RECURSOS NATURALES. Inventario, evaluación e integración de los recursos naturales de la Zona Iberia - Iñapari. **ONERN**, Lima, Perú, 376p, 1977.

OSHER, L.J.; BUOL, S.W. Relationship of soil properties to parent material and landscape position in eastern Madre de Dios, Peru. **Geoderma**, v. 83, n. 1–2, p. 143–166, 1998

PALACIOS, O.M.; MOLINA, O.G.; GALLOSO, C.A.; REYBA, C.L. Boletín N° 81: Geología de los cuadrángulos de Puerto Luz, Colorado, Laberinto, Puerto Maldonado, Quincemil, Masuco, Astillero y Tampopata. Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalurgico -

INGEMMET, 1996.

PARFITT, R.L.; CHILDS, C.W. Estimation of forms of Fe and Al: A review, and analysis of contrasting soils by dissolution and Moessbauer methods. **Australian Journal of Soil Research**, v. 26, n. 1, p. 121–144, 1988.

PORTES, R.C.; SPINOLA, D.N.; REIS, J.S.; KER, J.C.; DA COSTA, L.M.; FERNANDES FILHO, E.; KÜHN, P.; SCHAEFER, C.E.G.R. Pedogenesis across a climatic gradient in tropical high mountains, Cordillera Blanca - Peruvian Andes. **Catena**, v. 147, p. 441–452, 2016.

RABASSA, J.; CLAPPERTON, C.M. Quaternary glaciations in the southern hemisphere: An overview. **Quaternary Science Reviews**, v. 9, n. 2-3, p. 299-304, 1990.

RÄSÄNEN, M.E.; SALO, J. S.; KALLIOLA, R. J. Fluvial perturbation in the western Amazon basin: Regulation by long-term sub-Andean tectonics. **Science**, v. 238, n. 4832, p. 1398–1401, 1987

RÄSÄNEN, M.E.; SALO, J.S.; JUNGNER, H.; PITTMAN, L.R. Evolution of the Western Amazon Lowland Relief: impact of Andean foreland dynamics. **Terra Nova**, v. 2, n. 4, p. 320-332, 1990.

RÄSÄNEN, M.; NELLER, R.; SALO, J.; JUNGNER, H. Recent and ancient fluvial deposition systems in the Amazonian foreland basin, Peru. **Geological Magazine**, v. 129, n. 3, p. 293-306, 1992.

RÄSÄNEN, M. La geohistoria y geología de la Amazonia Peruana. In: Kalliola, R.; Puhakka, M., danjou, E. (eds). Amazonia Peruana vegetación húmeda tropical em el Llano Subandino. **Turku, University of Turku**. p. 43 - 67, 1993.

REGARD, V.; LAGNOUS, R.; ESPURT, N.; DARROZES, J.; BABY, P.; RODDAZ, M.; CALDERON, Y.; HERMOZA, W. Geomorphic evidence for recent uplift of the Fitzcarrald Arch (Peru): A response to the Nazca Ridge subduction. **Geomorphology**, v. 107, n. 3–4, p. 107–117, 2009.

RICH, C.J. Hydroxy interlayers in expansible layer silicates. **Clays and Clay Minerals** 16, 15 - 30, 1968.

RODBELL, D.T.; SMITH, J.A.; MARK, B.G. Glaciation in the Andes during the Lateglacial and Holocene. **Quaternary Science Reviews**, v. 28, n. 21-22, p. 2165–2212, 2009.

RODDAZ, M.; VIERS, J.; BRUSSET, S.; BABY, P.; HÉRAIL, G. Sediment provenances and

drainage evolution of the Neogene Amazonian foreland basin. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 239, n. 1–2, p. 57–78, 2005.

ROLANDO, J.L.; TURIN, C.; RAMÍREZ, D.A.; MARES, V.; MONERRIS, J.; QUIROZ, R. Key ecosystem services and ecological intensification of agriculture in the tropical high-Andean Puna as affected by land-use and climate changes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 236, p. 221–233, 2017.

ROMERO, L P.; MORALES, R.M.C.; CARPIO, M.R. Geología de los cuadrangulos de Rio Acre 22-v, Iñapari 22-x, Quabrada Mala, 23-v, Iberia 23-x, San Lorenzo 23-y, Puerto Lidia 24-v, Río Manuripe 24-x, Mávila 24-y, Santa Maria 24-z, Valencia 25-z, Palma Real 26-z y Rio Heath 27-z. Escala 1:100 000 Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET, 1998.

RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Rev. Bras. Cienc. Solo** 29, 297-300, 2005

RUIZ CRUZ, M.D.; MORATA, D.; PUGA, E.; AGUIRRE, L.; VERGARA, M. Microstructures and interlayering in pyrophyllite from the Coastal Range of central Chile: evidence of a disequilibrium assemblage. **Clay Minerals**, v. 39, n. 4, p. 439–452, 2004

SÁ, M.M.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BOCKHEIM, J.G.; LOUREIRO, D.C.; MICHEL, R. F.M.; SIMAS, F.N.B. Genesis of a Holocene soil chronosequence from the southernmost Andes Mountains, Tierra del Fuego. **Catena**, v. 162, n. November 2017, p. 291–302, 2018.

SALO, J., 1993. Notas en la historia de la exploración científica y teorías en la selva baja de la Amazonia Peruana. In: Kalliola, R.; Puhakka, M. & Danjoy, W. eds. Amazonia Peruana Vegetación Húmeda Tropical en el Llano Subandino. Turku, University of Turku. p. 23-31.

SÁNCHEZ, A.F.; ZAPATA, A.M. 2003. Memoria Descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de río Picha (25-p), Timpia (25-q), Chuanquiri (26-p), Quillabamba (26-q) Quebrada Honda (26-r), Parobamba (26-s), Pacaypata (27-p), Machupicchu (27-q), Urubamba (27-r), Calca (27-s), Chontachaca (27-t), Quincemil (27-u), Ocongate (28-t), Corani (28-u) y Ayapata (28-v). Escala 1:100 000. Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET.

SÁNCHEZ, J.I., 2003. Memoria descriptiva de la revisión y actualización de 21 cuadrángulos del Llano Amazonico. 25-r, 25-s, 25-t, 25-u, 25-v, 25-x, 25-y, 25-z, 26-t, 26-u, 26-v, 26-x, 26-y, 26-z, 27-v, 27-x, 27-y, 27-z, 28-z, 28-y, 28-x - 1:100 000. Lima, Perú: Instituto Geologico

Minero y Metalúrgico - INGEMMET.

SCHWERTMANN, U. The Effect of Pedogenic Environments on Iron Oxide Minerals. v. 1, p. 171–200, 1985.

SCHWERTMANN, U.; SCHULZE, D. G.; MURAD, E. Identification of Ferrihydrite in Soils by Dissolution Kinetics, Differential X-ray Diffraction, and Mössbauer Spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 4, p. 869–875, 1982.

SÉBRIER, M.; LAVENU, A.; FORNARI, M.; SOULAS, J. Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia and Northern Chile) from Eocene to present. **Geodynamique**, v. 3, n. 1–2, p. 85–106, 1988.

SELTZER, G.O. Recent glacial history and paleoclimate of the Peruvian-Bolivian Andes. **Quaternary Science Reviews**, v. 9, n. 2–3, p. 137–152, 1990.

SENRA, E.O., SCHAEFER, C.E., CORRÊA, G.R., GJORUP, D.F., REIS, J.S., FRANCELINO, M.R. Holocene pedogenesis along a chronotoposequence of soils from the Altiplano to the Cordillera Real, Bolivian Andes. **Catena**, v. 178, n. July 2018, p. 141–153, 2019.

SHOJI, S.; FUJIWARA, Y. Active aluminum and iron in the humus horizons of andosols from northeastern Japan: Their forms, properties, and significance in clay weathering. **Soil Science**. [S.l: s.n.], 1984

SHOJI, S.; NANZYU, M.; DAHLGREN, R.A. 1993. Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization, 1st ed. Developments in Soil Science, vol. 21 Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1993

SKORUPA, A.L.A.; SILVA, S.H.G.; POGGERE, G.C.; TASSINARI, D.; PINTO, L.C., ZINN, Y. L.; CURI, N., Similar Soils but Different Soil-Forming Factors: Converging Evolution of Inceptisols in Brazil. **Pedosphere**, v. 27, n. 4, p. 747–757, 2017.

SMITH, J.A., SELTZER, G.O., FARBER, D.L., RODBELL, D.T., FINKEL, R.C. Climate change: Early local last glacial maximum in the tropical Andes. **Science**, v. 308, n. 5722, p. 678–681, 2005

SOIL SURVEY STAFF. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. **USDA, Natural Resources Conservation Service**, v. 12, p. 372, 2014

SOIL SURVEY STAFF. Soil Survey Manual Agriculture. Handbook 18. **USDA, Natural**

**Resources Conservation Service**, v. 18, n. 18, p. 483, 2017.

TYLER, E.J.; BUOL, S.W.; SANCHEZ, P.A. Genetic Association of Properties of Soils of an Area in the Upper Amazon Basin of Peru. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, n. 5, p. 771–776, 1978.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F. Relações Material de Origem/Solo e Pedogênese em uma Sequência de Solos Predominantemente Argilosos e Latossólicos sobre Psamitos na Depressão Periférica Paulista. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 357–369, 1999.

VONHOF, H.B.; KAANDORP, R.J.G. Climate Variation in Amazonia during the Neogene and the Quaternary. **Amazonia, Landscape and Species Evolution: A Look into the Past**, p. 201–210, 2010

WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**. v.37, 1934

WEST, L.T.; BEINROTH, F.H.; SUMNER, M.E.; KANG, B.T. Ultisols: Characteristics and Impacts on Society. **Advances in Agronomy**, v. 63, n. C, p. 179–236, 1997.

WILCOX, B.P.; ALLEN, B.L.; BRYANT, F.C., Description and classification of soils of the high-elevation grasslands of central Peru. **Geoderma**, v. 42, n. 1, p. 79–94, 1988.

Ying, K., Hong, H., Churchman, G.J., Li, R., Li, Z., Wang, C., Han, W., 2013. Hydroxy-interlayered vermiculite genesis in Jiujiang late-Pleistocene red earth sediments and significance to climate. **Applied Clay Science**, v. 74, p. 20–27, 2013.

Yu, T.; Fu, Yesi., Hou, Q., Xia, X., Yan, B.; Yang, Z. Soil organic carbon increase in semi-arid regions of China from 1980s to 2010s. **Applied Geochemistry**, v. 116, n. 29, p. 104575, 2020

ZECH, J.; ZECH, R.; MAY, J.H.; KUBIK, P.W.; VEIT, H. Lateglacial and early Holocene glaciation in the tropical Andes caused by La Niña-like conditions. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 293, n. 1–2, p. 248–254, 2010.

## **CAPÍTULO II**

### **PEDOARQUEOLOGIA NOS TERRAÇOS PRÉ-HISPANICOS DE CUSCO**

## RESUMO

Os sistemas de terraços agrícolas, são uma técnica pré-hispânica de cultivo ainda praticada em vastos espaços da região andina, construídos para expandir a fronteira agrícola em terrenos inclinados, em solos condicionados. Apesar de avanços recentes, há pouco conhecimento das alterações do solo agricultado a longo prazo, especialmente no contexto de alta montanha. O objetivo do presente trabalho foi investigar as propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas de 13 perfis nas províncias das partes altas de Cuzco, estabelecendo uma cronologia baseada em datação por  $^{14}\text{C}$ . Dos 13 perfis em estudo, 9 são considerados sob influência antrópica, o restante, solos que não apresentaram influência antrópica marcante. Os horizontes A antrópicos variaram de 20 a 140 cm de espessura, muitos com horizontes enterrados enriquecidos de matéria orgânica. Elevados valores de P foram encontrados nos solos antrópicos, comparado com os solos sem influência antrópica marcante, indicando práticas de manejo do solo com melhoria cumulativa de a longo prazo, especialmente em casos valores extremamente altos em  $P_M$  e  $P_t$ , com idade de radiocarbono na faixa de 4110 +/- 30 BP, e, portanto, de período Pré-cerâmico (Pré-Inca). A mineralogia da fração argila dos solos em geral é semelhante, constituída principalmente por clorita, illita, caolinita e quartzo, com maior grau de alteração nos solos localizados no ambiente semiárido mais abaixo, e presença de formas cristalinas de óxidos de Fe, como hematita. Em contraste, os solos da região subúmida nas partes mais elevadas da área de estudo, mostram menor avanço pedogenético, e menor evolução.

Palavra-chave: Anthrosols. Agricultura antiga. Phosphorus. Andes Centrais

## ABSTRACT

The Andean systems or high agricultural terraces, are a pre-Hispanic cultivation technique still practiced in vast spaces of the Andean region, built to expand the agricultural frontier on sloping land, in conditioned soils. Despite recent advances, there is little knowledge of long-term changes in the cultivated soil, especially in the context of high mountains. The objective of this work was to investigate the morphological, physical, chemical, and mineralogical properties of 13 soil profiles in the provinces of the upper parts of Cuzco, establishing a chronology based on  $^{14}\text{C}$  dating. Of the 13 profiles in the study, 9 are considered under anthropic influence, the remaining 4, are soils that did not show marked anthropic influence. The anthropic horizons varied from 20 to 140 cm thick, many with buried horizons enriched with organic matter. High values of P were found in anthropic soils, compared with soils without marked anthropic influence, indicating soil management practices with long-term cumulative improvement, especially in cases of extremely high values in  $P_M$  and  $P_t$ , with radiocarbon age in the range of 4110  $\pm$  30 BP, and therefore Pre-Ceramic period (Pre-Inca). The mineralogy of the clay fraction of soils in general are similar in general, consisting mainly of chlorite, illite, kaolinite, and quartz, with a higher degree of alteration in the soils located in the semi-arid environment below, and the presence of crystalline forms of Fe oxides, such as hematites. In contrast, the soils of the sub-humid region in the higher parts of the study area show less pedogenetic advancement, and less evolution.

Keywords: Anthrosols. Ancient agriculture. Phosphorus. Central Andean.

## 1. Introdução

Na região andina sucessivas civilizações pré-hispânicas estabeleceram sistemas de agricultura em terraços (Andenes) para facilitar a agricultura intensiva e produção de alimentos nas encostas íngremes das montanhas, usados para a produção de milho (*Zea mays*), batata (*Solanum tuberosum* L.), quinua (*Chenopodium quinoa*), aveia (*Avena sativa* L.), alfalfa (*Medicago sativa* L.), etc. Os primeiros sistemas de terraços foram estabelecidos há pelo menos 4000 anos atrás (Pearsall, 2008), mas suas características e desenvolvimento são muito pouco conhecidas. No entanto, o desenvolvimento dos andenes foi assentado na experiência de outras culturas precedentes aos Incas (Lumbreras, 1999). As tentativas de desenvolver sistemas de terraços cultivados a desenvolver-se começaram depois do 200 AD, pelas culturas Huarpa e Wari (Kendall e Rodriguez, 2015).

Esses terraços representam verdadeiros solos antropogênicos, com coloração em geral mais escura, além da presença de artefatos cerâmicos arqueológicos e carvão (Goodman-Elgar, 2008; Kemp et al., 2006; Nanavati et al., 2016; Sandor & Eash, 1995), com elevados teores de fósforo disponível e total, carbono orgânico e nitrogênio no horizonte A (Sandor & Eash, 1995). A maioria desses solos vem sendo utilizada continuamente há quase cinco séculos, desde a conquista em ~ 1532 A.D (Londoño, 2008). A chegada dos espanhóis marca um período de ruptura na construção dos terraços, mas recentemente, há esforços de renovação da tecnologia dos terraços (Goodman-Elgar, 2008).

Muitos desses terraços encontram-se abandonados, e altamente vulneráveis à degradação, ou sofrendo excesso de cultivos, e redução dos teores de matéria orgânica e fósforo (Goodman-Elgar, 2008). A agricultura de subsistência tradicional nos Andes, vem sendo substituída por uma economia de trabalho e produção agrícola orientada para o mercado (Inbar & Llerena, 2000). Atualmente a população jovem andina continua migrando das áreas rurais para as cidades, processo que vem ocorrendo desde 1940 (OIM, 2015) em busca de melhores oportunidades de trabalho. A localização isolada e limitada infraestruturas no meio rural reduzem ainda a competitividade de produtos agrícolas e pecuários produzidos nos sistemas tradicionais, resultando em abandono dos terraços agrícolas.

Estudos realizados pela ONERN (1988) e (Sandor & Eash, 1995) indica que esses terraços estão associados a solos como Entisols, Mollisols e Inceptisols. Sendo solos condicionados pelo homem, não se enquadram de forma satisfatória nos sistemas de classificação, como Soil Taxonomy, pois não se prevê a presença de horizontes superficiais

antrópicos ou Plaggen, ou subsuperficiais Ágricos. No Sistema *World Reference Base* (IUUS Working Group WRB, 2015) esses solos são reconhecidos a nível categórico como Anthrosols.

O objetivo deste estudo foi investigar os solos em terraços agrícolas antigos, e seus efeitos nas propriedades físicas, químicas e mineralógica dos solos.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) é localizada na província alta “Altiplanicie” de Cuzco (Carlotto, et al., 1996; Carlotto et al., 2011). Esta região é amplamente dominada pela atividade agrícola, situada acima dos 3000 m a.s.l. com extensas áreas de terraços agrícolas durante o apogeu de dois grandes impérios: Wari (560 – 1000 AD) e Inca (1430 – 1532).

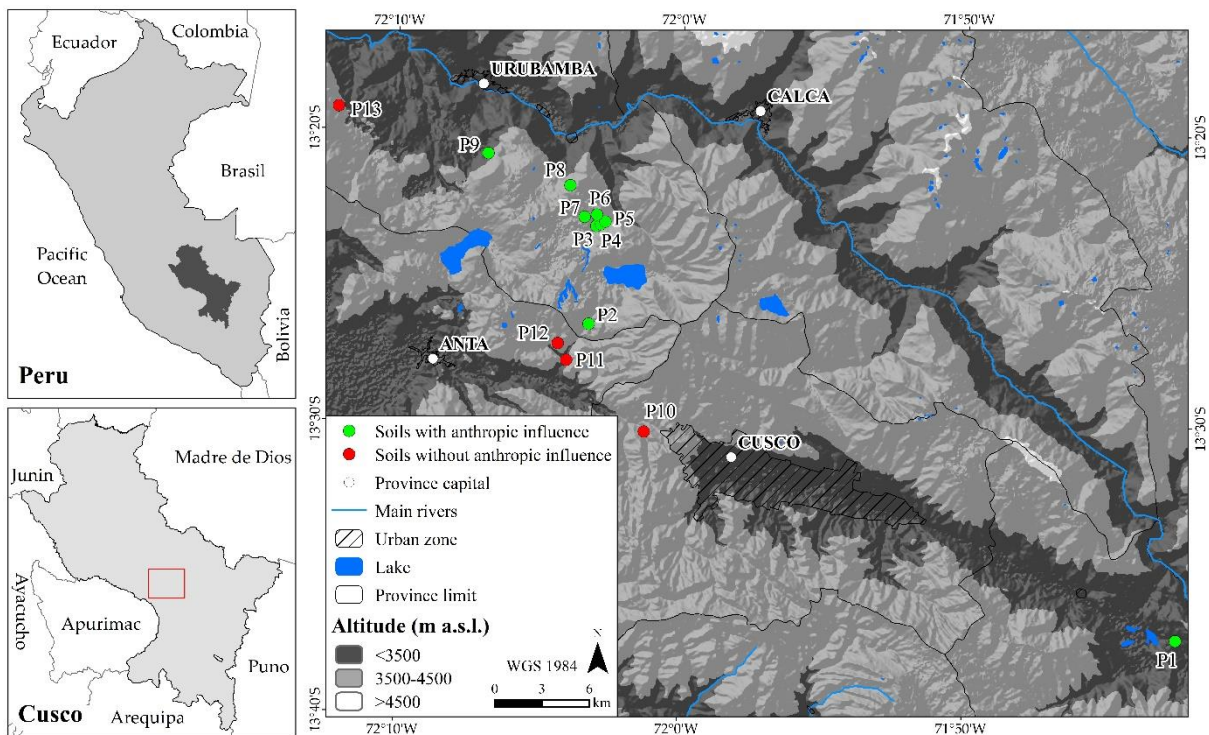


Figura 1. Área de estudo

O clima varia de semiárido a úmido com uma precipitação pluvial variando de 500 a 1000 mm, com temperatura média anual de 12 a 14 °C. Os meses de maior precipitação são de dezembro a março, com período seco nos meses de maio a julho (IMA, 2009). Ao longo da

história o regime da precipitação variou muito durante os últimos séculos, como indicam os registros climáticos na bacia de Marcacocha, localizado a 12 km de Ollantaytambo, em Cuzco. Períodos secos foram registrados em torno de 900 BC, 500BC, 100AD e 550 AD, com longo períodos secos de 900 a 1800 AD (Chepstow-Lusty et al., 2003). Estudos realizados por Sublette Mosblech et al (2012) na lagoa Huaypo a 20 km de Cuzco, indicam condições climáticas mais úmidas ao redor de 650-750 AD. Períodos mais úmidos também foram registrados nos estudos realizados por Thompson et al (1985, 1986) no “manto de gelo” de Quelccaya, nos períodos 610-650, 760-1040, 1500-1720 AD e 1870-1984 AD.

A Geologia da área de estudo é composta por rochas de diferentes idades. O perfil 01 é derivado de rochas andesíticas da Formação Rumicolca (NpQ-ru) do Plio-Pleistoceno (Carlotto et al., 2011). O P02, P03, P04, P05, P06, P07, P08, P09 e 13 são desenvolvidos de siltitos, argilitos, arenitos e calcário que formam a Formação Maras (Ks-m), da idade do Cretáceo, enquanto o P10 foi desenvolvido de xistos vermelhos e argilas, intercaladas com argilito, arenito-siltoso de cor vermelha e estratos de arenito de grau médio a fino da Formação Quilque (KsPp-qu) do Cretáceo superior ao Paleógeno (Sanchez e Zapata, 2003). O perfil P11, originado a partir de depósitos Aluviais, provenientes da erosão dos solos de montante (Qh-al) do Quaternário Tardio. O P12 é desenvolvido de sedimentos fluviolacustres da Formação San Sebastian (Qh-Sa) do Pleistoceno inferior (Carlotto et al., 1996)

## 2.2. Amostragem e classificação

13 perfis de solos foram selecionados no estudo (Figura 1). Os horizontes foram descritos e coletados seguindo os procedimentos da Soil Survey Staff (2017) e classificados segundo o WRB/FAO (IUUS Working Group WRB, 2015). As cores úmidas foram obtidas de acordo com a caderneta de Munsell (Munsell Color 2012).

## 2.3. Análises físicas e químicas

Realizou-se análises granulométricas pelo método da pipeta adaptado por Ruiz (2005). Determinou-se o pH em água e em solução de KCl 1,0 mol.L<sup>-1</sup>, em suspensão solo/solução 1:2,5 devidamente calibrado com soluções padrão de pH 4,0 e 7,0. Quantificou-se Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>, via extração com KCl 1,0 mol.L<sup>-1</sup>, sendo o Ca e Mg por espectrometria de absorção atômica e o Al por titulação com solução de NaOH 0,025 mol.L<sup>-1</sup>. Extraíu-se Na, K e P

disponíveis com Mehlich-1 (HCL 0,05 mol.L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol.L<sup>-1</sup>), onde o Na e K foram determinados por fotometria de chama e o P por colorimetria utilizando ácido ascórbico como redutor (EMBRAPA, 2017).

Determinou-se carbono orgânico (CO) conforme a Walkley & Black, (1934). Quantificou-se a fosforo adsorvido a partir do fosforo remanescente (P-rem) após agitação durante 1 h da TFSA com solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol.L<sup>-1</sup>, contendo 60 mg.L<sup>-1</sup> de P, na relação 1:10 (Alvarez et al., 2000). Com base nos resultados obtidos, foram calculados: Soma de bases (SB = Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup>); Capacidade de troca de cátions (T = S + Al + H); saturação por bases (V % = 100 S/T); saturação por alumínio (m % = 100 x Al<sup>3+</sup>/(S + Al<sup>3+</sup>)). O teor de fósforo total (P<sub>t</sub>) foi determinado de acordo a (Bowman, 1988).

#### 2.4. Análises mineralógicas

Realizou-se análises mineralógicas com uso de técnicas de difração de raios X (DRX) (EMBRAPA, 2017). Previamente removeu-se a matéria orgânica com uso de hipocloreto de sódio 10% (p/v) a pH 9,5 (Anderson, 1963). Montou-se lâminas orientadas de argila natural (método do esfregão). Realizou-se tratamentos na fração argila: remoção de óxidos de Fe e Al com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (Mehra & Jackson, 1958); saturação com 1 mol.L<sup>-1</sup> MgCl<sub>2</sub>; solvatação com glicerol; saturação com 1 mol.L<sup>-1</sup> de KCl sob diferentes temperaturas (25 e 350 °C). As amostras foram submetidas a análise por difratometria de raios X (DRX) no aparelho Panalytical X'Pert PRO (radiação de Co α) com configuração de 4° a 70° 2θ, a uma velocidade de varredura de 1° 2θ min<sup>-1</sup>, com um potencial gerador de 40kV e um gerador de corrente de 40 mA. Os difratograma foram interpretadas pelo uso das tabelas de (Chen, 1977).

Realizou-se análises de dissolução seletiva: (1) compostos de Fe e Al cristalinos e não cristalinos no solo, extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (Fe<sub>d</sub> y Al<sub>d</sub>) (Mehra & Jackson, 1958), (2) compostos de Fe e Al associados a constituintes amorfos extraídos por solução de oxalato ácido de amônio (OAA) (Fe<sub>o</sub> y Al<sub>o</sub>) a pH 3 (McKeague & Day, 1966). O conteúdo de ferridrita foi estimado pela seguinte equação 1,7x%Fe<sub>o</sub> (Childs, 1991).

Para avaliar as propriedades ândicas, a equação de Al<sub>o</sub> + 1/2Fe<sub>o</sub> foi usada, de acordo com Soil Survey Staff (2014).

## 2.5. Datação por $^{14}\text{C}$

Amostra de carvão de horizontes enterrados foram coletada e armazenada cuidadosamente em recipiente com fecho, evitando possíveis contaminações, é enviada a Beta Analytic laboratory (Miami, USA) para datação por Espectrometria de Massas com Aceleradores. A calibração foi realizada utilizando bases de dados específicas (Hogg et al., 2013).

## 3. Resultados

### 3.1. Solos com influência antrópica

Estes pedons foram identificadas em diferentes posições da altiplanicie de Cusco (Tabela 1 e Figura 1) localizadas em áreas de cultivo em terraços, com muitas evidências antrópicas, tais como cerâmica ossos e carvão. O horizonte A antrópico variou de 20 a 140 cm de espessura, desenvolvidos em superfícies condicionadas pelo homem. Estes pedons foram classificados como “*Anthrosols*”, com horizonte A Tétrico, além de “*Kastanozems* e *Phaeozems*” com características antrópicas (Horizonte A Tétrico) de acordo a IUUS Working Group WRB, (2015). Os seguintes critérios definidores de horizonte *terrico* são requeridas: (i) cor relacionado ao material de origem, (ii) saturação por bases  $\geq 50$ , (iv) ocorrência em superfícies artificialmente levantadas e (v) espessura  $\geq 20$  cm.

A textura dominante variou de franco a franco argilo siltoso. Os valores pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) mais altos do que o pH (KCl), implica em geração de cargas líquidas negativas, como se infere nos valores negativos de  $\Delta\text{pH}$  (Apêndie A), com predominância de saturação por bases (V) acima de 50% em todos os horizontes, onde o  $\text{Ca}^{2+} > 2 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$  é a base dominante no complexo de troca (Figura 6,7 e 8). Além do acúmulo de carbono orgânico (CO),  $\text{Ca}^{2+}$  e P extraído pelo Mehlich - 1 ( $\text{P}_M$ ) e P total, ocorre e distribuição irregular em profundidade, bem evidente.

O pedon P01 foi classificado como *Pantoterric Anthrosols* (*Pantohyperetric*, *Pantoloamic*, *Pantoescalic*). Descrito sobre uma superfície levantada (Bench terraces) a 3192 m.s.l.s., onde ocorrem plataformas horizontais com muros de contenção de pedras com faces inclinadas (Andesito), formando uma estrutura escalonada. O solo é bem drenado, com evidências de degradação, sendo muito vulneráveis a erosão. O horizonte antrópico apresenta uma coloração vermelha muito escuro acinzentado (2.5YR 2.5/2) com estrutura granular média,

moderado no horizonte Ap a bruno avermelhado escuro (2.5YR 3/4) com estrutura em bloco subangular médio, moderado no horizonte 2Bb. As raízes são abundantes no primeiro horizonte, comuns em profundidade, com presença de canais biológicos e muitos caramujos no perfil. A textura varia de franco argilosa a franco, pouco cascalhento (< 10%) (Tabela 2). O pH varia de ligeiramente ácido, a neutro com valores altos de  $\text{Ca}^{2+}$ , saturação por bases acima de 80% em todo o perfil,  $P_M$  acima de 30  $\text{mg.kg}^{-1}$  e  $P_t$  com valores de 281,15 a 586,11  $\text{mg.kg}^{-1}$  (Figura 3). A mineralogia da fração argila é composta de vermiculita, illita, caulinita, quartzo, feldespato e hematita (Figura 6).

O pedon P02 foi classificado como *Terric Chernic Phaeozems (Pantoloamic, Transportic)*. Descrito sobre uma superfície ligeiramente levantada (sloping-field terraces) de declividade suave a 3577 m.s.l.s., evidenciando ocupação humana antiga. O solo é bem drenado, com evidências de erosão laminar forte. O horizonte antrópico apresenta 40 cm de espessura, coloração bruno escuro (7.5YR 3/2) com estrutura forte em blocos subangulares pequenos a grande. As raízes variam de abundantes no Ap a comuns no 2Ab, com presença de minhocas vivas até o horizonte 3CA. A textura varia de franco a franco argiloso, com cascalho subarrendodado (< 10%) (Tabela 2). O pH varia de neutro a ligeiramente alcalino, teores de  $\text{Ca}^{2+}$ , saturação por bases acima de 80%,  $P_M$  acima de 30  $\text{mg.kg}^{-1}$  e  $P_t$  com valores de 632,30 a 768,0  $\text{mg.kg}^{-1}$  (Figura 3). O horizonte A antrópico encontra-se assentado sobre *Phaeozems*.

O perfil P03 classificado como *Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)* e consiste em uma superfície levantada (sloping-field terraces) a 3741 m.s.l.s., de declividade acentuada (8- 20%), apresentado ocupação humana antiga. Solo é bem drenado, com evidências de erosão moderada. O horizonte antrópico apresenta coloração preto (7.5YR a 2.5Y/1) nos horizontes Ap/2Ab/3Ab e 5Ab, observando-se assim mesmo um horizonte (4C) de cor vermelho amarelado (5YR 5/8) entre os 100 - 120 cm de profundidade. A estrutura do solo em todo o perfil varia de granular a blocos subangular médio, moderada, com presença de cerâmicas, ossos e carvão no 4C (Tabela 2). Raízes muito finas foram observadas em todo o perfil, variando desde abundantes nos horizontes superficiais, até poucas em profundidade, além de muitos canais de minhocas. A idade de radiocarbono do carvão na base, indicou início da ocupação há 4110 +/- 30 BP. A textura variou de franco argiloso até 55 cm, a franco nos horizontes mais profundos (Tabela 2). O pH é neutro a ligeiramente alcalino, com presença de carbonatos a partir dos 55 cm de profundidade, reagindo com HCl (10%). O  $\text{Ca}^{2+}$  é o cátion trocável dominante. Valores de  $P_M$  (978,30 a 1717,60  $\text{mg kg}^{-1}$ ) e P total (2415,82 a 6724,58  $\text{mg}$

kg<sup>-1</sup>) foram muito altos em relação aos outros pedons (Figura 3). A mineralogia da fração argila é composta de clorita, vermiculita, illita, caulinita, quartzo e cálcita (Figura 6).

O pedon P04 foi classificado como *Pantoterric Endopetrocalcic Kastanozems (Pantoloamic, Endodensic)*, sendo descrito sobre uma superfície local levantada (sloping-field terraces) a 3748 m.s.l.s, de declividade acentuada (8-20%), evidenciando ocupação humana antiga. O solo é bem drenado, com erosão laminar moderada. O horizonte antrópico atinge até uma profundidade de 35 cm, com coloração bruno avermelhado escuro (5YR 3/2) no Ap/2Ap a vermelho amarelado (5YR 5/6) no 3C, estrutura composta, granular pequeno a médio, e bloco subangular médio a grande, grau moderado. As raízes variam de abundante a poucas, com presença de canais biológicos de minhocas. A textura é franco argiloso no horizonte antrópico a argiloso no horizonte 4Ab (Tabela 2).

O pH é ligeiramente ácido, com valores altos de Ca, saturação de bases acima de 50%, P<sub>M</sub> varia de 2,70 a 8,70 mg.kg<sup>-1</sup> e P<sub>t</sub> com valores de 420,10 a 638,58 mg.kg<sup>-1</sup> (Figura 4). O horizonte A antrópico encontra-se assentado sobre *Kastanozems*. A presença de carbonatos foi observada no horizonte Cr, corroborada pela reação com HCl (10%).

O perfil P05 foi classificado como “Anthropic” Pantoeutric Regosol (*Pantoloamic*) descrito sobre uma superfície levantada (sloping-field terraces) a 3781 m.s.l.s., de declividade forte (20 a 45%), com presença de fragmentos de cerâmica entre 20 a 120 cm de profundidade, evidenciando ocupação humana antiga. A coloração do horizonte Antrópico é bruno avermelhado escuro em tudo o perfil (2.5YR 3/3 a 5YR 3/3), com estrutura granular pequena fraca no Ap a bloco subangular médio a grande forte no Cr. As raízes variam de abundantes a poucas, com presença de minhocas e galerias de minhocas observadas até o Cr. A textura é franco em tudo o perfil antrópico (Tabela 2). O pH é ligeiramente ácido, com valores altos de Ca<sup>2+</sup>, saturação de bases variando de 73,80 a 79,50%, P<sub>M</sub> > 30 mg.kg<sup>-1</sup> e P<sub>t</sub> variando de 409,43 a 663,24 mg.kg<sup>-1</sup> (Figura 4).

Tabela 1. Descrição geral dos pedons

Localidad	Perfil	Coordenadas UTM (WGS84)	Altitude (m.s.l.s)	Classificação de solo (WRB, 2015)	Descrição
Andahuaylillas	P01	13°37'17"S	3192	Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic, Pantoescalic)	Solo descrito no terraço agrícola, tipo "bench terraces" no footslope, bem drenado com forte erosão laminar. Na atualidade encontra-se abandonado, evidenciando registro de degradação. A vegetação clímax é de estepe espinhosa-Montano Baixo Subtropical (ee-MBS), província de umidade semiárido (INRENA, 1995). Horizonte térrico (WRB) foi identificado.
		71°42'30"W			
Chincheros	P02	13°26'38"S	3577	Terric Chemic Phaeozems (Pantoloamic, Transportic).	Solo descrito no terraço agrícola, tipo "sloping-field terraces" no footslope, bem drenado, com moderada erosão laminar. Atualmente abandonado. A vegetação clímax é de floresta úmida-Montano Subtropical, província de umidade de páramo muito úmido-Subalpino Subtropical (pmu-SaS), província de umidade úmido (INRENA, 1995). Phaeozems com horizonte A térrico (WRB) foi identificado.
		72°3'15"W			
	P03	13°23'16"S	3741	Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)	Solo descrito no terraço agrícola tipo "sloping-field terraces" no backslope, bem drenado, com forte erosão laminar e presença de cerâmica, ossos e carvão dentro do perfil, indicando antiga ocupação humana. Atualmente este solo encontra-se sob sistema em "barbecho". A vegetação clímax é estepe-Montano Subtropical (e-MS), província de umidade subúmido (INRENA, 1995). Horizonte térrico (WRB) foi identificado.
		72°3'1"W			
	P04	13°23'13"S	3748	Pantoterric Endopetrocalcic Kastanozems (Pantoloamic, Endodensic)	Solo descrito no terraço agrícola tipo "sloping-field terraces" no "backslope". Solo bem drenado, com forte erosão laminar. Atualmente sob sistema em "barbecho". A vegetação clímax é estepe-Montano Subtropical (e-MS), província de umidade subúmido (INRENA, 1995). Kastanozems com horizonte A térrico (WRB) foi identificado
		72°2'51"W			
	P05	13°23'7"S	3781	"Anthropic" Pantoeutric Regosol (Pantoloamic)	Solo descrito no terraço agrícola "sloping-field terraces" no backslope, bem drenado, com forte erosão laminar e presença de cerâmica a 120 cm de profundidade. Atualmente sob sistema em barbecho. A vegetação clímax é estepe-Montano Subtropical (e-MS), província de umidade subúmido (INRENA, 1995). Horizonte térrico (WRB) foi identificado.
72°2'42"W					
P06	13°22'53"S	3835	Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)	Solo descrito no terraço agrícola "sloping-field terraces" localizado no backslope, bem drenado, com forte erosão laminar e presença de cerâmicas dentro do perfil, evidenciando processos de degradação. A vegetação clímax é estepe-Montano Subtropical (e-MS), província de umidade subúmido (INRENA, 1995). Horizonte térrico (WRB) foi identificado.	
	72° 3'0"W				
P07	13°22'58"S	3729	Pantoterric' Anthrosols (Eutric, Pantoclayic, Pantoveritic)	Solo descrito no terraço agrícola tipo "sloping field terraces" no footslope, mal drenado, com erosão moderada. Atualmente sob sistema em barbecho. A vegetação clímax é estepe espinhosa-Montano Baixo Subtropical (ee-MBS), província de umidade semiárido (INRENA, 1995). Horizonte térrico (WRB) foi identificado.	
	72°3'25"W				
Huayllabamba	P08	13°21'53"S	3772	Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic, Pantoescalic)	Solo descrito no terraço agrícola tipo "sloping-field terraces" no backslope moderadamente drenado com forte erosão laminar e presença de cerâmica no primeiro horizonte. Atualmente este solo encontra-se abandonado, vulnerável a degradação. A vegetação clímax é estepe espinhosa-Montano Baixo Subtropical (ee-MBS), província de umidade semiárido (INRENA, 1995). Horizonte térrico foi (WRB) foi identificado.
		72°3'57"W			
Maras	P09	13°20'49"S	3414	Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic, Endocacalcic)	Solo descrito no terraço agrícola, tipo "sloping field terraces" localizado no "backslope", bem drenado, com forte erosão laminar. Atualmente abandonado, evidenciando processos de degradação. A vegetação clímax é estepe espinhosa - Montano Baixo Subtropical (ee-MBS), província de umidade semiárido (INRENA, 1995). Horizonte térrico (WRB) foi identificado.
		72°6'50"W			
Cusco	P10	13°30'19"S	3602	Pantohypereutric Pantorhodic Endoprotoveritic Cambisols (Pantoloamic, Ochric)	Solo descrito no terraço agrícola "sloping-field terraces" (Denevan, 2005) localizado no backslope. Bem drenado, com forte erosão laminar. Presença de cultivos agrícolas tipo batata e milho. A vegetação clímax é de páramo muito úmido-Subalpino tropical (pmu-SaS), província de umidade úmido (INRENA, 1995). Foi identificado horizonte cámbico (WRB), além de características verticas.
		72°1'15"W			
Cachimayo	P11	13°27'53"S	3449	Pantohypereutric Regosols (Pantoloamic, Fluvic, Ochric)	Solo descrito no toeslope (terraço aluvial recente), moderadamente drenado, com erosão laminar ligeira. Atualmente em barbecho. Sem horizonte de diagnostico. A vegetação clímax é de floresta úmida-Montano Subtropical, província de umidade úmido (INRENA, 1995).
		72°4'3"W			
P12	13°27'19"S	3590	Epidystric Cambisols (Anoclayic, Ochric)	Solo descrito no summit, bem drenado, com erosão laminar moderado. Atualmente sob sistema em barbecho. A vegetação clímax é de floresta úmida-Montano Subtropical, província de umidade úmido (INRENA, 1995). Horizonte cámbico (WRB) foi identificado.	
	72°4'18"W				
Maras	P13	13°19'14"S	3564	Endopetrocalcic Kastanozems (Loamic, Endodensic)	Solo descrito no backslope, bem drenado, com forte erosão laminar derivado. Com presença de cultivos principalmente batata. A vegetação clímax é estepe espinhosa - Montano Baixo Subtropical (ee-MBS), província de umidade semiárido (INRENA, 1995). Horizonte Móllico e petrocalcico (WRB) foram identificados.
		72°12'6"W			

O Perfil P06 foi classificado como *Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)* descrito numa superfície levantada (sloping-field terraces) a 3835 m.s.l.s, com declividade acentuada (8 – 20%), presença de cerâmicas que evidencia ocupação humana antiga. O solo é bem drenado, erosão moderada de relevo ondulado. O solo antrópico atinge até uma profundidade de 250 cm, com cores de bruno muito escuro (7.5YR 2.5/3) no Ap/2BA, bruno avermelhado escuro (5YR 2.5/2) no 3Ab/4Ab e preto (7.5YR 2.5/1) no 5Ab, com estrutura granular média moderado, a blocos subangular médio a grande grau forte. As raízes são abundantes nos horizontes superficiais a poucas nos horizontes mais profundos, com presença de muitas galerias de minhocas em todo o perfil. A textura varia de franco a franco argiloso, pouco cascalhento (8 - 15%) (Tabela 2). O pH varia de moderadamente ácido a neutro, com valores altos de  $\text{Ca}^{2+}$ , saturação por bases acima de 80% entre 20 e 250 cm. O  $P_M$  e  $P_t$  varia de 11,80 a 30,50  $\text{mg kg}^{-1}$  e 294,34 a 744,01  $\text{mg kg}^{-1}$  (Figura 4). A mineralogia da fração argila é composta de clorita, illita, caulinita, quartzo e feldespato (Figura 6)

O Perfil P07 foi classificado como *Pantoterric Anthrosols (Eutric, Pantoclayic, Pantoveritic)* descrito numa superfície levantada (sloping-field terraces) a 3729 m.s.l.s. que evidencia ocupação humana, de declividade suave (3-8%). O solo é mal drenado, erosão moderada, localizado num relevo suave ondulado. O solo antrópico atinge até uma profundidade de 110 cm, com cores de bruno avermelhado escuro (5YR 2.5/2 a 5YR 3/3) nos Ap/2Av/3Av a preto (10YR 2/1) no 5Av, com estrutura blocos subangular a blocos angulares pequeno a grande, fraco a moderado nos primeiros 60 cm, a prismático médio a grande de grau moderado em profundidade. As raízes vão de abundantes a comuns, distribuídas de forma irregular no perfil. A textura é argilosa (Tabela 2) de pH extremamente ácido nos horizontes mais profundos a ligeiramente ácido no primer horizonte, com valores altos de  $\text{Ca}^{2+}$ , saturação de bases acima de 50%. O  $P_M$  e  $P_t$  varia de 2,10 a 5,30  $\text{mg.kg}^{-1}$  e 109,26 a 445,49  $\text{mg.kg}^{-1}$  (Figura 5).

O Perfil 08 classificado como *Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic, Pantoescalic)* consiste em uma superfície construída (sloping-field terraces) a 3772 m.s.l.s. mostrando evidências de ocupação humana antiga, em declividade muito forte (45-75%). O solo é bem drenado, com erosão forte, em relevo montanhoso. O horizonte antrópico apresenta uma profundidade de 50 cm, de cor bruno escuro (7.5YR 3/2) com estrutura granular a bloco subangular pequeno a medio, fraco a moderado. As raízes variam de abundantes a poucas, com presença de cerâmica no horizonte Ap e canais de minhocas abundantes. A textura é franco argilosa, cascalhenta (15 - 50%). O pH é ligeiramente alcalino, sugerindo a presença de

carbonatos em todo o perfil, reagindo a HCl (10%), com valores altos de  $\text{Ca}^{2+}$ , com valores de  $P_M$  e  $P_t$  variando de 4,50 a 9,30  $\text{mg kg}^{-1}$  e 468,73 a 544,66  $\text{mg kg}^{-1}$  (Figura 5)

O pedon P09 foi classificado como *Pantoterric Anthrosols* (*Pantohypereutric, Pantoloamic*) consiste de uma superfície construída (sloping-field terraces) descrito a 3414 m.s.l.s. na localidade de Maras, de declividade forte (20-45%), que consiste de terraço com evidências de ocupação humana, em processo de degradação pelo abandono. O perfil é bem drenado com erosão moderada a forte, localizada num relevo ondulado a fortemente ondulado. O horizonte antrópico tem 140 cm de profundidade, de cor bruno avermelhado escuro a (5YR 2.5/2 a 5YR 3/4) com estrutura com blocos subangular a angular pequena a grande, fraco a forte. As raízes são abundantes a muito poucas, com presença de cerâmica no 2ABb e canais biológicos (minhocas) no perfil, observou-se além rizo concreções e nódulos de carbonatos na base do perfil antrópico. A textura varia de Franco siltosa a franco argilo siltosa, pouco cascalhento (8 – 15%). De modo geral, o pH do solo Antrópico é ligeiramente alcalino, sugerindo a presença de carbonatos, que reagem com HCl (10%). Os valores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $P_M$  e  $P_t$  de 0,92 a 2,58  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e 141,24 a 271  $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$  foram mais altos topsoil (Figura 5). A mineralogia da fração argila é composta por esmectita, vermiculita, clorita, caulinita, quartzo, illita e hematita. O pico da hematita desaparece após a desferrificação da argila (Figura 6).

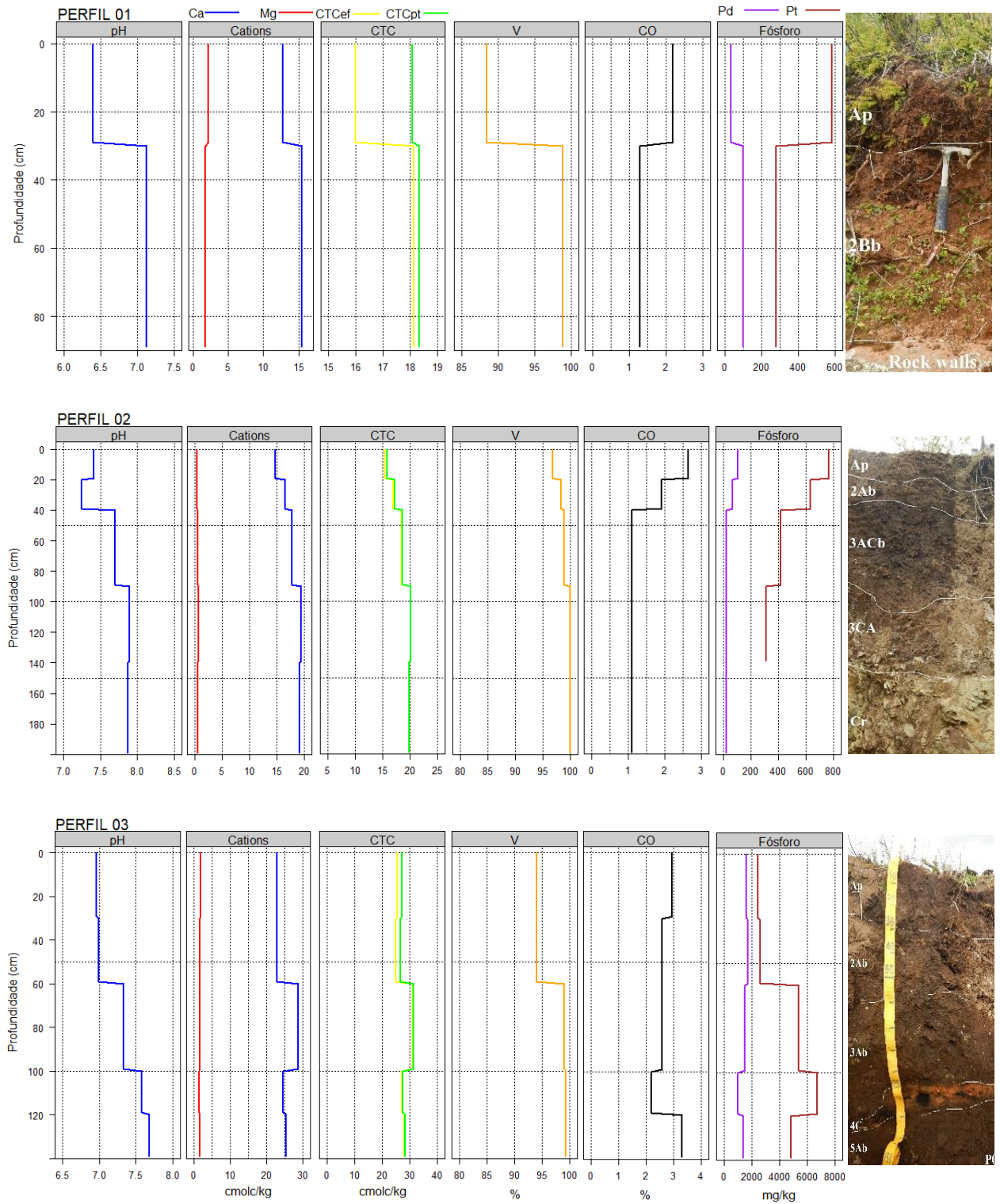


Figura 3. Características químicas dos solos com influência antrópica marcante (P01, P02 e P03)

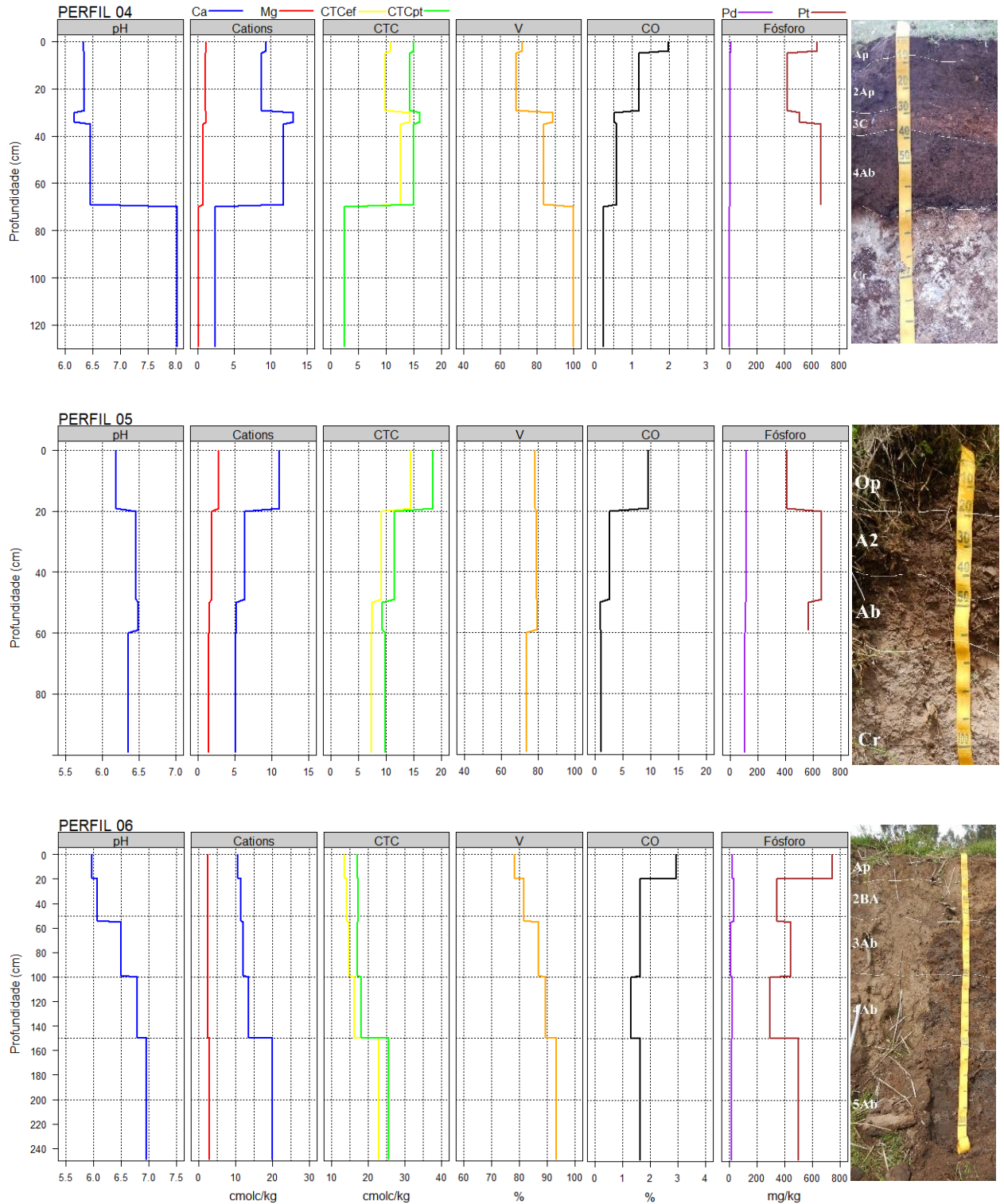


Figura 4. Características químicas dos solos com influência antrópica marcante (P04, P05 e P06).

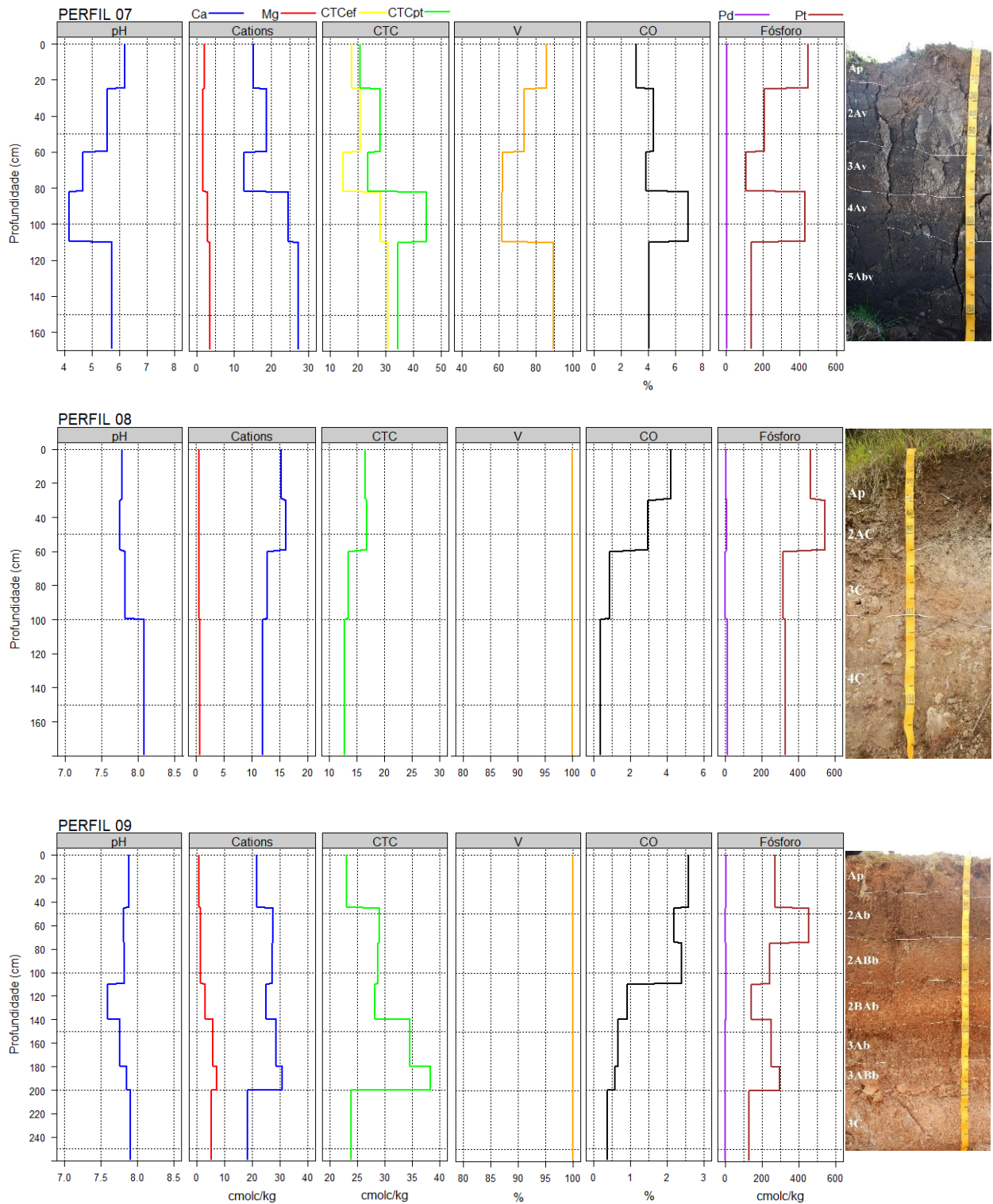


Figura 5. Características químicas dos solos com influência antrópica (P07, P08 e P09)

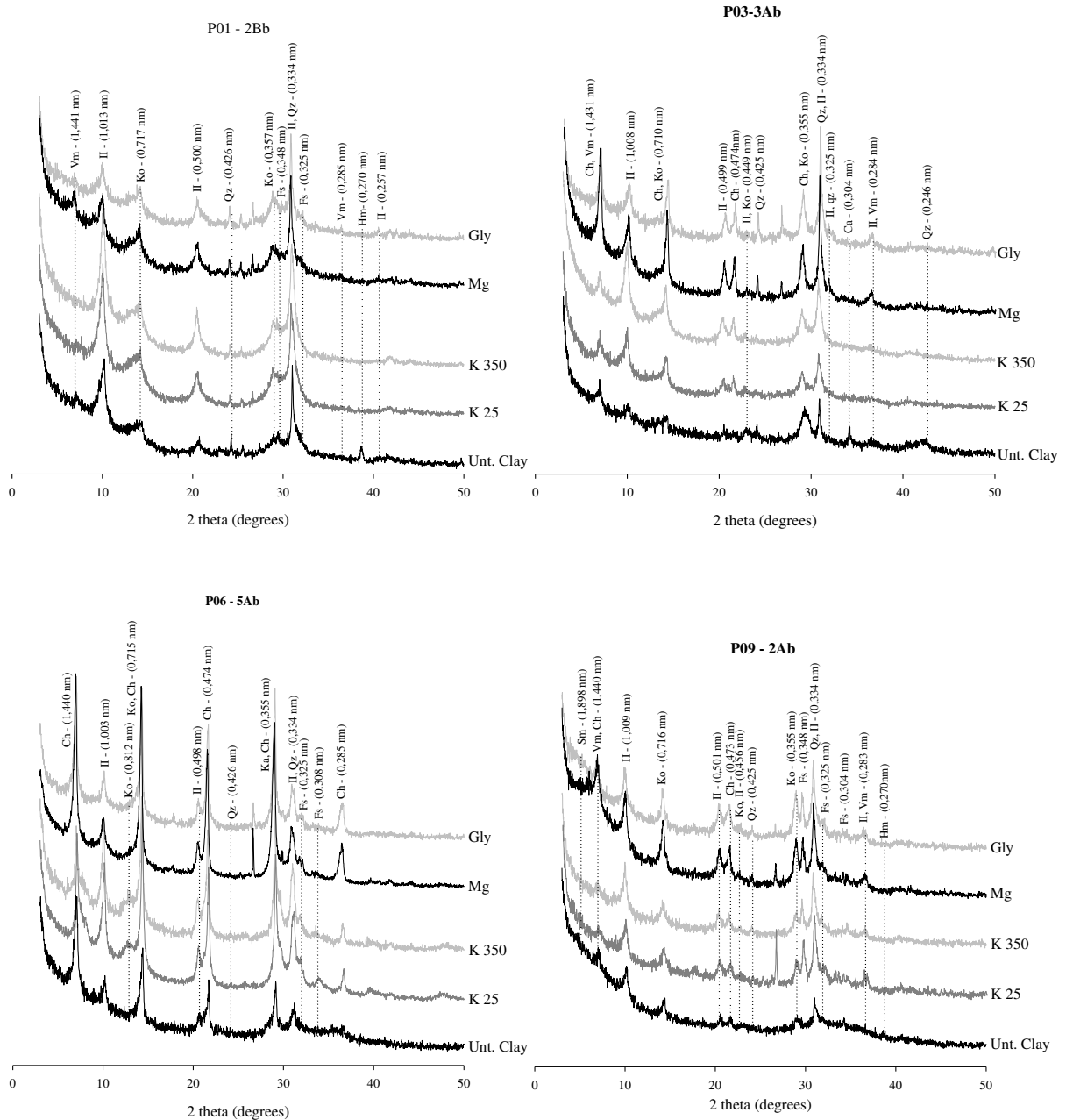


Figura 6. Difração de raio-X da fração argila de horizontes antrópicos. Unt. Clay – Argila natural; K - K+ saturação (tratamento aquecido de K to 25° e 350°); Mg-Mg<sup>2+</sup> saturação; Glycerol – saturado pelo Mg<sup>2+</sup> e solvatado com glycerol (Ko = caulinita; Ch = clorita; II = illita; Fd = feldespato; Py = pirofilita; Qz = quartzo; Hm=hematita; Sm=Esmectita; Vm=vermiculita).

### 3.2. Solos sem influência antrópica marcante

Estes pedons (P10, P11, P12 e P13) foram investigados nas diferentes posições da altipanicie de Cusco (Tabela 1), porém apesar de terem cultivados, não mostram evidências marcantes de influência antrópica antiga, sendo classificados como *Kastanozems*, *Cambisols* e

*Fluvisols* (IUUS Working Group WRB, 2015) (Tabela 1). Horizonte cámbico foi encontrado em P10 e P12, além de horizonte petrocálcico em P13.

Todos os pedons apresentam horizontes superficiais de coloração bruno avermelhado escuro (2.5YR 2.5/3 a 5YR 3/3), com estrutura granular a bloco subangular de grau fraco a moderado. Com respeito ao horizonte Bi (cambico) do P10 e P12, a estrutura é em blocos subangulares (moderado a forte). O pedon P11 não mostra grau de desenvolvimento de estrutura (Tabela 2). Em P10 foi observada precipitação de  $\text{CaCO}_3$  na superfície dos pedos, além de propriedades vérticas (extremamente fendilhado) no Cr, com estrutura prismática de grau forte e presença de cascalhos angulosos ( $< 3\%$ ). Em P12 foi registrado películas de manganês cobrindo a superfície dos agregados em BC do P12. De modo geral, a profundidade dos pedons variam de moderadamente profundo a profundo (75 a 100 cm), com textura variando de franco arenosa a argilosa (Tabela 2).

Em relação as características químicas, registrou-se valores de pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) mais altos do que o pH (KCl), o que implica na formação de cargas líquidas negativas, à semelhança do observado nos pedons com influência antrópica (Apendice A). O pH varia de muito fortemente ácida a moderadamente alcalina, com valores mais altos de  $\text{Ca}^{2+}$  observados no P10 e P13. A maioria dos pedons são eutróficos ( $V > 50\%$ ), com conteúdo de carbono orgânico mais altos em superfície (Tabela 3). Os maiores teores de alumínio mais altos foram observados em P12, no Bi e BC, variando de 0,68 a 1,55  $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$  implicando numa saturação por alumínio de 29,40, 9,90 e 24,90%. Em relação a CTC (t) e CTC (T) observou-se incremento em profundidade em todos os pedons, atingindo até 100,17  $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$  como observado no horizonte Ck2 do P13 (Tabela 3). Valores mais altos de  $P_M$  foi observado em P11, atingindo 81,10  $\text{mg}.\text{kg}^{-1}$ , e valores mais altos de retenção de P ( $P^a$ ) foram encontrados nos horizontes superficiais de P13 (acima de 90%). O teor de fósforo total (Pt) registrou um aumento em profundidade nos pedons P12 e P13, variando desde 172,33 a 520,70  $\text{mg}.\text{kg}^{-1}$  (Tabela 3). A presença de carbonatos foi observada no P10, P11 e P15, confirmado pela reação com HCl (10%). A mineralogia da fração argila do P11 e P13, estão compostas por clorita, vermiculita, illita, caulinita (Figura 8). A hematita foi identificada no P13 (0,270 nm).

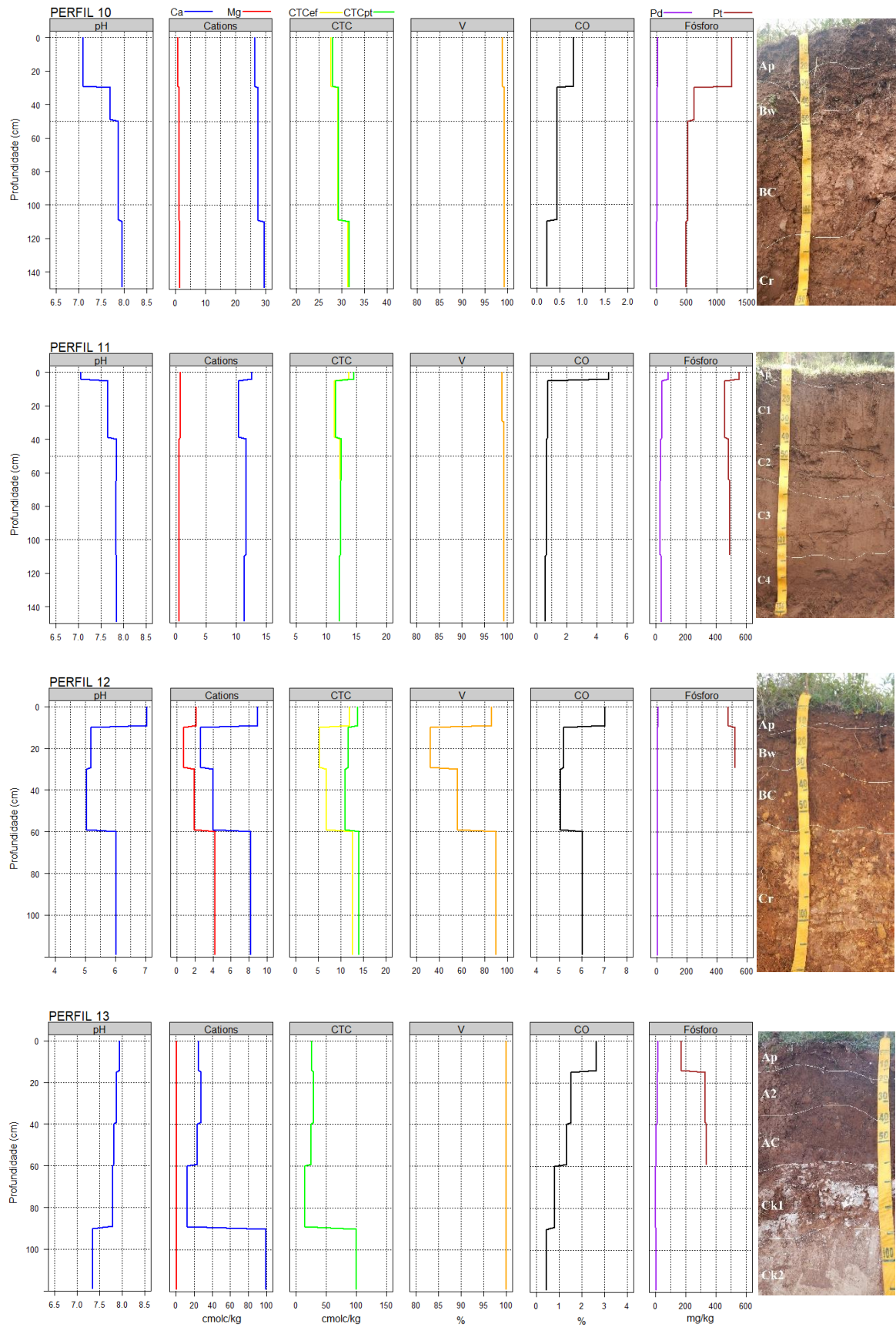


Figura 7. Características químicas dos solos sem influência antrópica marcante

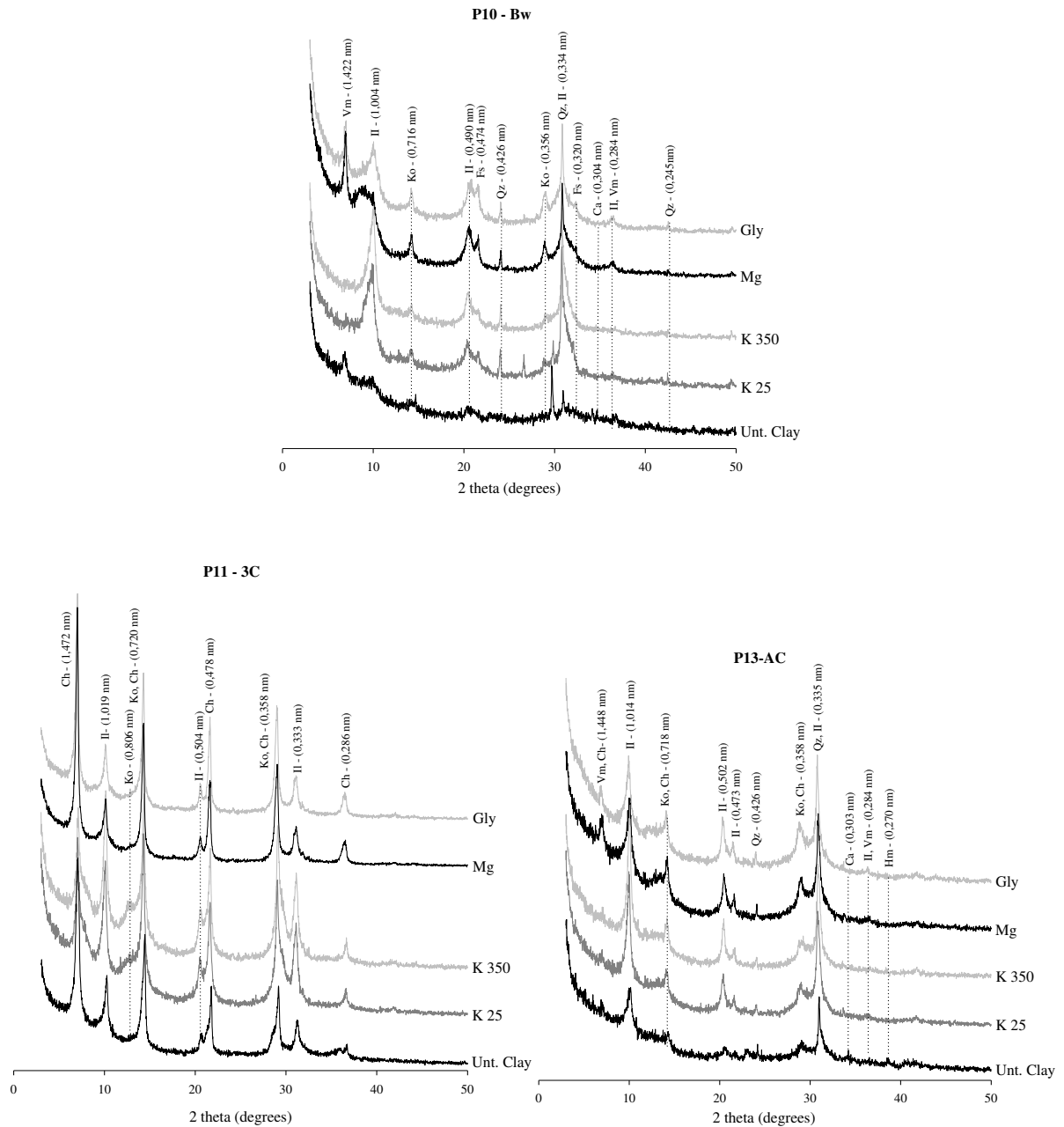


Figura 8. Difração de raios-X da fração argila de alguns horizontes sem influência antrópica. Unt. Clay - Argila natural; K - K<sup>+</sup> saturação (tratamento aquecido de K to 25° e 350°); Mg- Mg<sup>2+</sup> saturação; Glycerol – saturado pelo Mg<sup>2+</sup> e solvatado com glicerol (Ko = caulinita; Ch = clorita; II = illita; Fd = feldespato; Qz = quartzo; Hm=hematita; Sm=Esmeclita; Vm=vermiculita).

### 3.3. Dissolução seletiva

De modo geral para todos os pedons em estudo, valores  $Fe_d > Fe_o > F_p$  (Tabela 4) indicaram a formação preferencial de materiais cristalinos. Valores mais baixos da razão  $Fe_o/Fe_d$  ( $< 0,04$ ) foram encontradas nas posições mais baixas da área de estudo, em P01, P09 e P13, indicando domínio de formas cristalinas de óxidos de Fe (Tabela 4). Valores mais altos da razão  $Fe_o/Fe_d$ , foi detectada em P07, como evidenciado pelos valores mais altos da razão  $Fe_p/Fe_o$  ( $> 0,2$ ) indicando o domínio de complexos orgânicos.

A razão  $Al_p/Al_o$  é usado para identificar a presença de alofana ou imogolita ( $Al_p/Al_o < 0.5$ ) ou complexos de Al - Humus ( $Al_p/Al_o > 0.5$ ) (Nanzyo et al., 1993). A grande maioria dos solos estudados mostraram razão  $Al_p/Al_o < 0.5$  (Tabela 4). A formação de alofana e imogolita predomina em pH ( $H_2O$ ) de 5 a 7 e baixo conteúdo de complexos orgânicos (Ugolini e Dahlgren, 1991), enquanto os complexos de Al e Fe - húmus predominam a pH mais baixo (Shoji and Fujiwara, 1984).

Contudo, propriedades ândicas não se confirmaram, pois o valores obtidos pela soma  $Al + 1/2Fe_o$  são menores que 2% em todos os pedons, sendo esse limite a quantidade mínima requerida para indicar propriedades ândicas (IUUS Working Group WRB, 2015; Soil Survey Staff, 2014)

Tabela 2. Propriedades físicas e morfológicas dos solos em estudo

Perfil	Profundidade (cm)	limite (contraste, topografia)	Color (úmido)	%				Textura	Estrutura (grau, tamanho, tipo)	Consistência (seco, úmido)	Raízes (quantidade, tamanho)	Artefatos (tipo, quantidade)
				Areia grossa	Areia fina	silte	argila					
<b>P01-Pantoterric Anthrosols (Pantohyperetric, Pantoloamic, Pantoescalic)/3192 m.s.l.m</b>												
Ap	0 - 30	C - W	2.5YR 2.5/2	10.5	25.4	33.5	30.5	CL	2, m, gr	SHA, FR	1, F, Vf	-
2Bb	30 - 90	-	2.5YR 3/4	9.8	29.1	39.4	21.7	L	2, m, sbk	SHA, FR	3, M, C	-
<b>P02-Pantoterric Anthrosols (Pantohyperetric, Pantoloamic)/3577 m.s.l.m</b>												
Ap	0 - 20	G - W	7.5YR 3/2	21.1	15.7	37.3	25.9	L	1, p m, sbk	SHA, FR	1, Vf	-
2Ab	20 - 40	G - W	7.5YR 3/2	16.6	15.1	37.5	30.7	CL	2 3, m g, sbk	SHA, FR	2, Vf	-
3ACb	40 - 90	G - W	7.5YR 2.5/2	17.1	17.4	35.4	30.1	CL	3, m g, abk	SHA, FR	2, Vf	-
3CA	90 - 140	C - W	7.5YR 2.5/2	20.3	20.0	37.0	22.7	L	3, g mg, pr, abk	HA, FR	2, Vf	-
Cr	140 - 200	-	7.5YR 2.5/3	18.2	19.4	45.0	17.4	L	-	HA, FR	Absent	-
<b>P03-Pantopetric Anthrosols (Pantohyperetric, Pantoloamic)/3741 m.s.l.m</b>												
Ap	0 - 30	G - W	7.5YR 2.5/1	8.4	12.8	44.2	34.6	CL	2, m, sbk, gr	SHA, FR	1, Vf	-
2Ab	30 - 60	G - W	7.5YR 2.5/1	8.7	12.8	44.8	33.7	CL	2, m, sbk, gr	SHA, FR	1, Vf	Cerâmica, 2 osso, 1
3Ab	60 - 100	A - S	7.5YR 2.5/1	12.5	16.0	46.5	25.0	L	2, m, sbk, gr	SHA, FR	2, Vf	Cerâmica, 1
4C	100 - 120	A - S	5YR 5/8	16.1	16.5	49.2	18.2	L	2, m, sbk, gr	SHA, FR	2, Vf	Charcoal, 3
5Ab	120 - 140	-	7.5YR 2.5/2	14.3	15.1	46.9	23.7	L	2, m, sbk, gr	SHA, FR	3, Vf	-
<b>P04-Pantoterric Endopetrocalcic Kastanozems (Pantoloamic, Endodensic)/3748 m.s.l.m</b>												
Ap	0 - 5	G - S	5YR 3/3	6.4	16.2	46.2	32.2	CL	2, p m, gr	HA, FR	1, Vf	-
2Ap	5 - 30	C - W	5YR 3/2	6.0	14.6	39.5	39.9	CL	2, m g, sbk	SHA, FR	1, Vf	-
3C	30 - 35	C - W	5YR 5/6	14.2	13.6	37.3	34.8	CL	2, mg, sbk	HA, FR	3, Vf	-
4Ab	35 - 70	C - S	5R 3/3	3.7	9.1	34.8	52.4	C	2, m g, sbk	HA, FR	2, Vf	-
Cr	70 - 130	-	7.5YR 8/1	55.9	7.0	25.8	11.3	SL	-	-	Absent	-
<b>P05-“Anthropic” Pantoeutric Regosol (Pantoloamic)/3781 m.s.l.m</b>												
Op	0 - 20	C - S	5YR 3/2	15.4	15.0	45.4	24.2	L	1, p, gr	SO, FR	1, Vf	-
A2	20 - 50	C - S	5YR 3/2	15.5	15.0	48.5	21.0	L	2 3, p m, sbk	SHA, FR	2, Vf	-
Ab	50 - 60	A - W	5YR 3/3	18.5	15.0	46.2	20.3	L	2 3, p m, sbk	SHA, FR	2, Vf	-
C	60 - 100	-	2.5YR 3/3	16.6	14.9	44.8	23.7	L	-	HA, FI	3, Vf	Cerâmica, 1
<b>P06-Pantoterric Anthrosols (Pantohyperetric, Pantoloamic)/3835 m.s.l.m</b>												
Ap	0 - 20	C - W	7.5YR 3/3	15.4	14.6	45.0	25.0	L	2, m, gr	SHA, FR	1, F, Vf	-
2BA	20 - 55	C - W	7.5YR 3/3	17.1	14.3	41.1	27.5	CL	3, m g, sbk	HÁ, FR	1, Vf	Cerâmica, 1
3Ab	55 - 100	G - W	5YR 3/3	11.8	17.2	41.8	29.3	CL	3, m g, sbk	SHA, FR	2, Vf	Cerâmica, 1
4Ab	100 - 150	G - W	5YR 3/3	12.8	16.1	41.7	29.4	CL	3, m g, sbk	SHA, FR	3, Vf	-
5Ab	150 - 250	G - W	5YR 3/3	11.3	13.7	44.5	30.6	CL	3, m g, sbk	SHA, FR	3, F	-
Cr	Rocha	-	2.5Y 7/6	2.8	12.0	58.5	26.7	SiL	-	-	-	-

Continuação...

Perfil	Profundidade (cm)	limite (contraste, topografia)	Color (úmido)	Areia	Areia	silte	argila	Textura	Estrutura (grau, tamanho, tipo)	Consistência (seco, úmido)	Raízes (quantidade, tamanho)	Artefatos (tipo, quantidade)
				grossa	fina							
				%								
<b>P07-Pantoterric Anthrosols (Eutric, Pantoclayic, Pantoveritic)/3729 m.s.l.m</b>												
Ap	0 - 25	C - W	5YR 2.5/2	6.4	12.6	39.7	413	C	1, p m, sbk	SHA, FR	1, Vf	-
2Av	25 - 60	C - W	5YR 2.5/2	4.8	11.6	35.7	479	C	2, m g, abk	SHA, FR	2, Vf	-
3Av	60 - 82	G - S	5YR 3/3	4.0	12.0	35.3	488	C	2, m g, pr	HÁ, FR	1, Vf	-
4Av	82 - 110	C - S	10YR 2/1	3.3	9.1	35.2	524	C	2, m g, pr	HÁ, FR	2, Vf	-
5Abv	100 - 170	-	10YR 2/1	3.3	9.4	39.5	478	C	2, m g, pr	VHA, FI	2, Vf	-
<b>P08-Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic, Pantoescalic)/3772 m.s.l.m</b>												
Ap	0 - 30	A - W	7.5YR 3/2	20.5	7.9	37.6	33.9	CL	1, p m, sbk, gr	SO, FR	1, Vf	-
2AC	30 - 60	A - W	7.5YR 3/2	24.4	5.9	37.4	32.3	CL	2, m, sbk	SHA, FR	2	-
3C	60 - 100	C - W	5YR 4/3	14.5	9.7	49.5	26.3	L	2, m, sbk	SHA, FR	3	-
4C	100 - 180	-	10R 4/3	13.2	8.8	52.4	25.6	SiL	2, m g, sbk	HÁ, FI	Absent	-
<b>P09-Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)/3414 m.s.l.m</b>												
Ap	0 - 45	C - W	5YR 3/3	7.4	12.9	62.7	16.9	SiL	1 2, p m, sbk	SHA, FR	1, Vf	-
2Ab	45 - 75	C - W	5YR 2.5/2	3.1	17.0	66.1	13.8	SiL	2 3, m g, sbk abk	SHA, FR	1, F, Vf	-
2ABb	75 - 110	G - W	5YR 2.5/2	3.0	17.8	64.8	14.5	SiL	3, m g, abk	SHA, FR	3, Vf	-
2BAb	110 - 140	C - S	5YR 3/4	2.6	8.7	61.2	27.5	SiCL	3, m g, abk	SHA, FR	3, Vf	-
3Ab	140 - 180	C - S	5YR 3/3	3.8	8.8	51.7	35.7	SiCL	3, m g, abk	SHA, FR	2, Vf	-
3ABb	180 - 200	C - S	5YR 3/4	2.9	7.8	53.0	36.3	SiCL	3, m g, abk	HÁ, FR	3, Vf	-
3C	200 - 260	-	5YR 7/4	2.4	9.3	55.7	32.6	SiCL	-	HÁ, FR	3, Vf	-
<b>P10-Pantohypereutric Pantorhodic Endoprotovetic Cambisols (Pantoloamic, Ochric)/3602 m.s.l.m</b>												
Ap	0 - 30	G - W	2.5YR 2.5/3	3.4	14.2	50.8	31.5	SiCL	2, p, sbk	HA, FR	1, F, Vf	-
Bi	30 - 50	G - W	2.5YR 2.5/3	2.5	13.4	50.4	33.7	SiCL	3, p m, sbk	HA, FR	2, F, Vf	-
Bc	50 - 110	G - W	2.5YR 3/3	2.4	12.7	51.8	33.2	SiCL	3, m g, pr, sbk	VHA, VFI	3, Vf	-
Cr	110	-	2.5YR 3/3	1.9	10.1	51.2	36.9	SiCL	3, g, pr	VHA, VFI	3, Vf	-
<b>P11-Pantohypereutric Pantofluvic Fluvisols (Pantoloamic, Ochric)/3449 m.s.l.m</b>												
Ap	0 - 5	C - S	5YR 3/2	15.9	42.3	24.4	17.4	SL	2, p m, gr	SHA, VFR	1, Vf, F	-
C1	5 - 40	G - S	5YR 3/3	20.0	45.5	19.7	14.8	SL	0, -, sg	LO, VFR	2, F	-
C2	40 - 65	G - S	5YR 3/3	13.5	42.0	27.2	17.4	SL	0, -, sg	LO, VFR	3, F	-
C3	65 - 100	G - S	5YR 3/3	19.7	50.3	19.1	11.0	SL	0, -, sg	LO, VFR	3, M	-
C4	100 - 150	-	5YR 3/3	18.8	45.9	20.7	14.6	SL	0, -, sg	LO, VFR	Absent	-

Continuação...

Perfil	Profundidade (cm)	limite (contraste, topografia)	Color (úmido)	Areia	Areia	silte	argila	Textura	Estrutura (grau, tamanho, tipo)	Consistencia (seco, úmido)	Raízes (quantidade, tamanho)	Artefatos (tipo, quantidade)
				grossa	fina							
<b>P12-Epidystric Cambisols (Anoclayic, Ochric)/3590 m.s.lm</b>												
Ap	0 - 10	G - S	5YR 4/3	6.3	11.1	43.6	39.1	SiCL	1, m, gr	SHA, FR	1, Vf	-
Bi	10 - 30	C - W	5YR 4/4	4.0	9.3	39.2	47.5	C	2, m g, sbk	SHA, FR	1, F, Vf	-
BC	30 - 60	C - W	5YR 4/4	4.3	8.4	39.9	47.4	C	2, m g, sbk	HA, FR	2, Vf	-
Cr	60 - 120	-	5YR 4/4	3.3	7.5	53.5	35.6	SiCL	0, -, m	VHA, FI	3, Vf	-
<b>P13 - Endopetrocalcic kastanozems (Loamic, Endodensic)/3192 m.s.lm</b>												
Ap	0 - 15	C - W	2.5YR 2.5/3	2.5	19.9	45.8	31.8	CL	1, p, sbk, gr	SHA, FR	1, F, Vf	-
A2	15 - 40	C - W	2.5YR 2.5/3	1.9	16.8	53.0	28.3	SiCL	2, p m, sbk gr	SHA, FR	2, Vf	-
AC	40 - 60	A - W	2.5YR 2.5/3	1.7	16.3	50.2	31.8	SiCL	1, m g, sbk	HÁ, FR	3, Vf	-
Ck1	60 - 90	C - W	5YR 5/6	7.4	6.5	37.3	48.8	C	-	EHA, EFI	3, Vf	-
Ck2	90 - 120	-	5YR 6/6	14.6	14.6	59.6	11.3	SiL	-	HÁ, FR	Absent	-

Distinção: A = abrupto, C = Claro, D = Difuso, G = gradual. Topografia: B = quebrada S = Suave, W = Ondulado. Estrutura: Grau: 0 = sem estrutura, 1 = fraco, 2 = moderada, 3 = forte. Tamanho: co = grosso, f = fina, m = média. Tpo: abk = bloco angular, gr = granular, m = massivo, pr = prismático, sbk = bloco subangular, sg = grão simples. Consistencia: Seco: EH = Extremadamente duro, H = duro, L = suave, S = macia, SH = ligeiramente duro. Moist: EF = extremadamente firme, FI = firme, FR = friável, L = solto, SH = ligeiramente duro. Wetter: s = pegajoso, so = não pegajoso, ss = ligeiramente pegajoso, p = plástico, po = no plástico, ps = ligeiramente plástico, vp = muy plástico, vs = muy pegajoso. Cementação: NC = no-cementado. Raízes e poros: 1 = abundante, 2 = comuns, 3 = poucas, co = gruesa, f = fina, m = media, vf = muy fina

Tabela 3. Teores de Fe e Al nos extratos de ditionito-citrato-bicarbonato (Fe<sub>d</sub> e Al<sub>d</sub>), oxalato ácido de amônio (Fe<sub>o</sub> e Al<sub>o</sub>) nos horizontes dos perfis dos solos estudados.

Perfil	Profundidade (cm)	DCB		Oxalato		Pirofosfato		Feo/Fed	Alo/Ald	Fep/Feo	Alp/Alo	Alo + 1/2Feo	Ferridrita
		Fe <sub>d</sub>	Al <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	Al <sub>o</sub>	Fep	Alp						
<b>P01-Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic, Pantoescalic)/3192 m.s.l.m</b>													
Ap	0 - 30	1,54	0,07	0,10	0,07	0,07	0,03	0,06	1,00	0,70	0,43	0,12	0,17
2Bb	30 - 90	1,47	0,05	0,06	0,06	0,02	0,01	0,04	1,20	0,33	0,17	0,09	0,10
<b>P02-Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)/3577 m.s.l.m</b>													
Ap	0 - 20	1,15	0,05	0,10	0,06	0,02	0,01	0,09	1,20	0,20	0,17	0,11	0,17
2Ab	20 - 40	1,25	0,07	0,12	0,09	0,03	0,02	0,10	1,29	0,25	0,22	0,15	0,20
3ACb	40 - 90	1,29	0,06	0,09	0,06	0,04	0,01	0,07	1,00	0,44	0,17	0,11	0,15
3CA	90 - 140	1,32	0,03	0,18	0,06	0,02	0,01	0,14	2,00	0,11	0,17	0,15	0,31
Cr	120 - 200	1,36	0,08	0,30	0,07	0,02	0,01	0,22	0,88	0,07	0,14	0,22	0,51
<b>P03-Pantopetric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)/3741 m.s.l.m</b>													
Ap	0 - 30	1,98	0,32	0,29	0,17	0,07	0,02	0,15	0,53	0,24	0,12	0,32	0,49
2Ab	30 - 60	2,01	0,34	0,32	0,17	0,10	0,02	0,16	0,50	0,31	0,12	0,33	0,54
3Ab	60 - 100	1,89	0,35	0,24	0,36	0,03	0,01	0,13	1,03	0,13	0,03	0,48	0,41
4C	100 - 120	1,64	0,34	0,27	0,58	0,04	0,01	0,16	1,71	0,15	0,02	0,72	0,46
5Ab	120 - 140	1,87	0,34	0,27	0,34	0,02	0,01	0,14	1,00	0,07	0,03	0,48	0,46
<b>P04-Pantoterric Endopetrocalcic Kastanozems (Pantoloamic, Endodensic)/3748 m.s.l.m</b>													
Ap	0 - 5	1,97	0,14	0,31	0,13	0,09	0,04	0,16	0,93	0,29	0,31	0,29	0,53
2Ap	5 - 30	3,25	0,19	0,34	0,14	0,16	0,04	0,10	0,74	0,47	0,29	0,31	0,58
3C	30 - 35	2,23	0,13	0,16	0,10	0,11	0,02	0,07	0,77	0,69	0,20	0,18	0,27
4Ab	35 - 70	3,37	0,22	0,38	0,20	0,14	0,03	0,11	0,91	0,37	0,15	0,39	0,65
Cr	70 - 130	0,18	0,01	0,01	0,01	-	-	0,06	1,00	-	-	0,02	0,02
<b>P05--"Anthropic" Pantoeutric Regosol (Pantoloamic)/3781 m.s.l.m</b>													
Op	0 - 20	1,60	0,07	0,09	0,05	0,04	0,06	0,06	0,71	0,44	1,20	0,10	0,15
A2	20 - 50	1,72	0,05	0,11	0,05	0,05	0,05	0,06	1,00	0,45	1,00	0,11	0,19
Ab	50 - 60	1,56	0,04	0,12	0,05	0,04	0,04	0,08	1,25	0,33	0,80	0,11	0,20
C	60 - 100	1,44	0,05	0,14	0,06	0,07	0,04	0,10	1,20	0,50	0,67	0,13	0,24
<b>P06-Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)/3835 m.s.l.m</b>													
Ap	0 - 20	1,66	0,11	0,37	0,09	0,13	0,04	0,22	0,82	0,35	0,44	0,28	0,63
2BA	20 - 55	1,51	0,08	0,33	0,08	-	-	0,22	1,00	-	-	0,25	0,56
3Ab	55 - 100	1,95	0,10	0,29	0,07	0,09	0,02	0,15	0,70	0,31	0,29	0,22	0,49
4Ab	100 - 150	1,98	0,11	0,32	0,08	-	-	0,16	0,73	-	-	0,24	0,54
5Ab	150 - 250	1,89	0,09	0,34	0,09	0,08	0,02	0,18	1,00	0,24	0,22	0,26	0,58
<b>P07-Pantoterric Anthrosols (Eutric, Pantoclayic, Pantoveritic)/3729 m.s.l.m</b>													
Ap	0 - 25	1,53	0,18	0,60	0,10	0,21	0,19	0,39	2,17	0,35	1,90	0,40	1,02
2Av	25 - 60	1,08	0,09	0,64	0,10	-	-	0,59	6,56	-	-	0,42	1,09
3Av	60 - 82	0,82	0,09	0,32	0,14	0,17	0,44	0,39	4,33	0,53	3,14	0,30	0,54
4Av	82 - 110	0,85	0,19	0,50	0,30	-	-	0,59	3,11	-	-	0,55	0,85
5Abv	110 - 170	0,86	0,11	0,14	0,12	0,17	0,14	0,16	1,45	1,21	1,17	0,19	0,24
<b>P08-Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic, Pantoescalic)/3772 m.s.l.m</b>													
Ap	0 - 30	0,94	0,06	0,14	0,14	-	-	0,15	2,50	-	-	0,21	0,24
2AC	30 - 60	0,93	0,07	0,10	0,14	0,02	0,04	0,11	1,57	0,20	0,29	0,19	0,17
3C	60 - 100	0,95	0,06	0,06	0,09	0,00	0,01	0,06	1,00	0,00	0,11	0,12	0,10
4C	100 - 180	0,75	0,03	0,03	0,03	-	-	0,04	1,33	-	-	0,05	0,05

Continuação...

Perfil	Profundidade (cm)	DCB		Oxalate		Pirofosfato		Feo/Fed	Alo/Ald	Fep/Feo	Alp/Alo	Alo + 1/2Feo	Ferridrita
		Fe <sub>d</sub>	Al <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	Alo	Fep	Alp						
<b>P09-Pantoterric Anthrosols (Pantohyperetric, Pantoloamic)/3414 m.s.l.m</b>													
Ap	0 - 45	1,24	0,07	0,02	0,1	0,00	0,01	0,02	1,43	0,00	0,10	0,11	0,03
2Ab	45 - 75	1,54	0,08	0,04	0,14	0,00	0,02	0,03	1,75	0,00	0,14	0,16	0,07
2ABb	75 - 110	1,5	0,08	0,04	0,14	0,00	0,02	0,03	1,75	0,00	0,14	0,16	0,07
2BAb	110 - 140	1,61	0,09	0,04	0,17	-	-	0,02	1,89	-	-	0,19	0,07
3Ab	140 - 180	1,42	0,07	0,04	0,14	0,00	0,01	0,03	2,00	0,00	0,07	0,16	0,07
3ABb	180 - 200	1,31	0,06	0,05	0,14	-	-	0,04	2,33	-	-	0,17	0,09
3C	200 - 260	0,7	0,04	0	0,02	-	-	0,00	0,50	-	-	0,02	0,00
<b>P10-Pantohyperetric Pantorhodic Endoprotovetric Cambisols (Pantoloamic, Ochric)/3602 m.s.l.m</b>													
Ap	0 - 30	1,58	0,07	0,11	0,07	0,01	0,01	0,07	0,04	0,09	0,14	0,13	0,19
Bi	30 - 50	1,56	0,08	0,1	0,08	0,00	0,00	0,06	0,05	0,00	0,00	0,13	0,17
BC	50 - 110	1,61	0,08	0,09	0,07	0,00	0,00	0,06	0,04	0,00	0,00	0,12	0,15
Cr	110 - 150	1,64	0,08	0,09	0,08	0,00	0,00	0,05	0,05	0,00	0,00	0,13	0,15
<b>P11-Pantohyperetric Pantofluvic Fluvisols (Pantoloamic, Ochric)/3449 m.s.l.m</b>													
Ap	0 - 5	1,3	0,05	0,1	0,03	0,03	0,03	0,08	0,60	0,30	1,00	0,08	0,17
C1	5 - 40	1,28	0,04	0,1	0,03	0,02	0,00	0,08	0,75	0,20	0,00	0,08	0,17
C2	40 - 65	1,36	0,06	0,15	0,04	0,03	0,01	0,11	0,67	0,20	0,25	0,12	0,26
C3	65 - 110	1,26	0,05	0,11	0,03	0,03	0,00	0,09	0,60	0,27	0,00	0,09	0,19
C4	100 - 150	1,31	0,04	0,11	0,04	0,06	0,01	0,08	1,00	0,55	0,25	0,10	0,19
<b>P12-Epidystric Cambisols (Anoclayic, Ochric)/3590 m.s.l.m</b>													
A	0 - 10	2,86	0,29	0,21	0,11	0,11	0,03	0,07	0,38	0,52	0,27	0,22	0,36
Bi	10 - 30	3,01	0,4	0,44	0,19	0,36	0,09	0,15	0,48	0,82	0,47	0,41	0,75
BC	30 - 60	2,54	0,35	0,24	0,14	0,13	0,05	0,09	0,40	0,54	0,36	0,26	0,41
Cr	60 - 120	3,55	0,22	0,07	0,06	0,03	0,01	0,02	0,27	0,43	0,17	0,1	0,12
<b>P13 - Endopetrocalcic kastanozems (Loamic, Endodensic)/3192 m.s.l.m</b>													
Ap	0 - 15	1,77	0,07	0,04	0,12	0,00	0,01	0,02	1,71	0,00	0,08	0,14	0,07
A2	15 - 45	1,92	0,08	0,05	0,13	0,00	0,01	0,03	1,63	0,00	0,08	0,16	0,09
AC	45 - 55	1,97	0,07	0,05	0,13	0,01	0,01	0,03	1,86	0,20	0,08	0,16	0,09
Ck1	55 - 90	0,44	0,04	0,01	0,01	-	-	0,02	-	-	-	0,02	0,02
Ck2	90 - 120	0,16	0,03	0,01	0,01	-	-	0,06	-	-	-	0,02	0,02

#### 4. Discussão

##### 4.1. Influência dos terraços na paisagem e propriedades físicas do solo

Os terraços agrícolas tradicionalmente chamados de andenes observados na área de estúdio, mostram registros humanos evidentes na paisagem, transformando as características dos solos (Figura 2), modificando a topografia (BORISOV et al., 2016; LONDOÑO et al., 2017; Sandor & Eash, 1995), o microclima (DENEVAN, 1995) e provendo o funcionamento sustentável dos ecossistemas e da sociedade, até os dias atuais (SPENCER & HALE, 1961).

Em Cuzco, extensas áreas de encostas íngremes foram terraceadas, domesticando e construindo uma nova paisagem, criando um ambiente topográfico mais estável e propício ao cultivo e trato agrícola. O tipo de terraço construído depende da topografia, textura do solo e a técnica de construção empregada (STANCHI et al., 2012), o que influencia no grau de conservação do solo e da água (CHEN et al., 2017), além de facilitar o trabalho para o homem criando um ambiente mais confortável para o trabalho agrícola (TAROLLI et al., 2014).

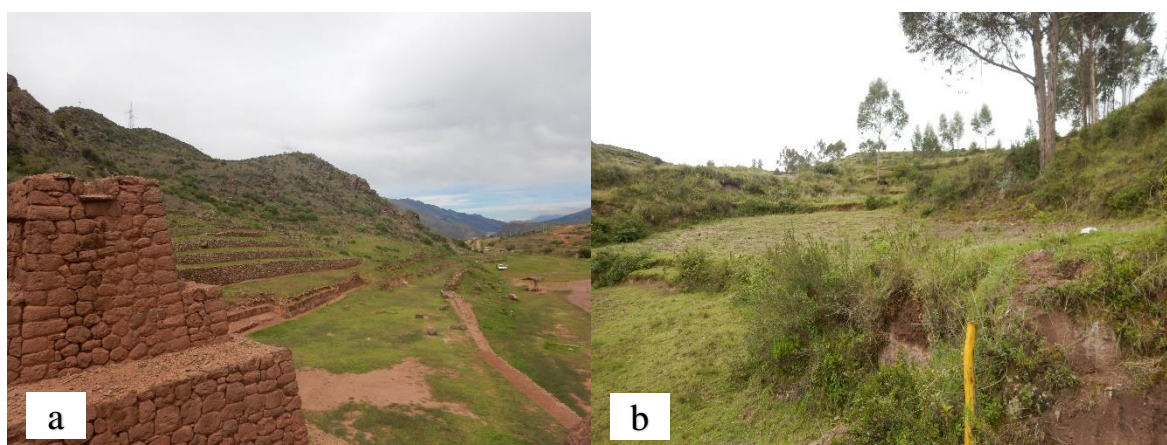


Figura 9. Tipos de terraços: a) Bench terraces e b) sloping-field terraces

Os diferentes terraços encontrados possuem dimensões e formas variáveis. Alguns terraços possuem muros de contenção de pedras (Bench Terraces), em outros as paredes são de terra (Sloping- field terraces) (Figura 9). Os terraços tipo bench terraces são do antigo Império Inca, construídas durante o Horizonte tardio (1438-1533 AD) (LUMBRERAS, 1981), enquanto os terraços tipo sloping-field terraces (sem irrigação) mais comuns usados em todas as épocas pré-hispanicas são anteriores ao império Inca, e serviram como ponto de partida para a construção dos terraços tipo bench (bancadas) (KENDALL E RODRIGUEZ, 2015).

Os materiais usados para a construção dos terraços agrícolas dependem dos substratos locais, disponibilidade de pedras e solo adequado (Arnáez et al., 2015) como por exemplo, o P01 (terraço tipo Bench Terraces), os muros de contenção são de blocos de rochas tipo Andesíticas locais. A maioria dos terraços na área em estudo não apresentam muros de contenção de pedras, possuem taludes suavizados de pouca altura, originados pelo próprio cultivo do solo. O objetivo da construção dos terraços agrícolas é reduzir do ângulo de inclinação e do comprimento (SANDOR & EASH, 1995) diminuindo assim a quantidade, velocidade de escorrência da superfície e prevenindo o transporte de sedimentos (CHEN et al.,

2017), perdas de nutrientes ocasionadas pela erosão (NI & ZHANG, 2007) e expandir a fronteira agrícola.

Pelas características pedológicas reveladas neste estudo, em muitos terraços da região de Cuzco, há evidências claras de aumento da espessura do *topsoil* (Horizonte A) como um dos maiores efeitos do terraceamento assim como encontrado por Denevan (1995), Guillet (1987), Homburg & Sandor (2011), Sandor & Eash (1995), com horizontes antrópicos variando de 20 a 140 cm, o que proporciona aumento da produção das culturas, pelo do aumento de volume de solo fértil explorado pelas raízes (SANDOR & HOMBURG, 2017). Resultado semelhante foi encontrado por Sandor & Eash, (1995) no vale de Colca, onde os horizontes A observou horizontes A apresentam espessuras de 30-130 cm, exibindo horizontes superficiais enriquecidos com matéria orgânica. Nos terraços agrícolas de *Viejo Sangayaico*, em Ica, Nanavati et al. (2016) estudou 28 perfis de solo, e registrou que estes raramente exibem horizontes A excessivamente espessos, variando de 25-75 cm. Há, portanto, ampla variação na espessura dos horizontes antrópicos, entre e dentro das regiões.

Os terraços agrícolas da região de Cuzco, construídas ao longo das encostas são compostos de solos redistribuídos localmente como evidenciado pela similaridade mineralógica (Apêndice B), preenchidos de baixo para cima e cima para abaixo (LONDOÑO, 2008; SANDOR & EASH, 1995). Horizontes enterrados, enriquecidos com matéria orgânica são comuns em terraços andinos (BRANCH et al., 2007; KEMP et al., 2006; NANAVATI et al., 2016; SANDOR & EASH, 1995) podendo indicar a presença de horizontes A original (P03: 120-140 cm; P06:150-250 cm; P07:82-170 cm). Horizontes A enterrados diretamente sobre B ou C representam *horizontes A original* pré-existente antes do terraceado (P02: 20-40 cm; P04: 35-70 cm; P05: 50-60 cm; P06: 150 - 250; P08: 30-60 cm; P09: 140-180 cm). Respeito a P01, não foi possível observar a medição exata da espessura de enchimento e possível horizonte enterrado, devido a que as paredes se estendem abaixo da superfície do solo original.

A maioria dos terraços em estudo (sem irrigação), estão compostas por materiais de textura franco a franco argiloso, sem evidências de iluviação de argila, como for registrado nos terraços de Vale de Chicha-Soras no Perú (BRANCH et al., 2007; KEMP et al., 2006). Sandor & Eash, (1995) observaram a presença de revestimentos sobre materiais de textura mais grossa nos solos de terraços, originados de materiais suspensos na água de irrigação. Em alguns casos, a presença de carbonatos na superfície dos pedos dos terraços agrícolas (P02 e P09), refletem a proximidade com rochas calcárias, favorecidas também pelo pH ligeira, a moderadamente alcalina, e condições climáticas, onde evapotranspiração potencial excede a precipitação pluvial

(INRENA, 1995). O Incremento da fração da argila em profundidade no horizonte antrópico em P09 pode indicar a translocação per descensum continua dessas partículas, ocasionados pela precipitação de ions solúveis de  $\text{Ca}^{2+}$  (Tabela 3) como carbonato de cálcio (PAL et al., 2003; PEREIRA et al., 2013), provavelmente em fases mais úmidas.

#### 4.2. Terraceamento e propriedades químicas do solo

Uma das características químicas mais relevantes em solos antrópicos de terraços agrícolas nos Andes peruanos é o alto teor de P (BRANCH et al., 2007; DICK et al., 1994; SANDOR & EASH, 1991, 1995; SANDOR & HOMBURG, 2017), como observado nos pedons P01, P02, P03, P05 e P06 nos horizontes superficiais (Figura 3 e 4). De acordo com Holliday & Gartner (2007), o fósforo é um indicador arqueológico bastante significativo da atividade humana entre as sociedades agrícolas e pré-hispânicas.

O prolongado período de cultivo dos solos com práticas agrícolas que incluíam rotação de culturas e adições de adubos orgânicos (LONDOÑO et al., 2017; KENDALL & RODRIGUEZ, 2015) em combinação com o clima frio, alternância de períodos secos e úmidos, ao longo dos séculos, devem ter favorecido a formação de solos com valores mais altos de P, bem como CO. Características semelhantes de solos e clima foram reportados nos estudos anteriores em terraços agrícolas na região andina no sul do Perú (BRANCH et al., 2007 e SANDOR & EASH, 1995) e em terraços agrícolas do México (SANDOR et al., 1986, 1990).

Em P03, observou-se os valores  $P_M$  altíssimo (Figura 3) em comparação aos níveis registrados nos outros terraços em estudo, ou outros estudos realizados em terraços agrícolas do Vale de Colca (SANDOR & EASH, 1991, 1995) e Chicha-Soras (BRANCH et al., 2007) no Perú. Os níveis altíssimos de  $P_M$  e  $P_t$  observados em todo o perfil do P06 (Figura 3) refletem séculos de fertilização com adubos orgânicos, podendo estar associado ao uso anteriormente intensivo do esterco de llamas ou alpacas (SANDOR & EASH, 1991, 1995), que vem sendo domesticados desde 4200 BC nos andes centrais (LUMBRERAS, 1999; WHEELER et al., 1977) com a finalidade de manter a produção agrícola. Ferro-Vázquez et al. (2017) indica que o aumento de fósforo nos horizontes enterrados, sugere que houve adições para manter a produção agrícola. Mas adições de ossos, ou enterramentos, são igualmente postulados para justificar esses valores.

A idade por radiocarbono de amostras de carvão do horizonte 4C do P03, com idade de 4110 +/- 30 BP (2161 BC) dá suporte à noção de que houve queimadas *in situ* e durante o início da ocupação agrícola no período Pré-cerâmico (5000-1800 BC) (LUMBRERAS, 1981). Evidências de agricultura pré-cerâmica ao redor de 2000 BC foram levantadas por Chepstow-lusty et al. (1998) na lagoa Marcacocha, na mesma região. É bem evidente que este terraço foi construído em diferentes momentos, como evidenciado pela presença de cerâmicas e ossos em horizontes enterrados, antigas superfícies (2Ab e 3Ab), sugerindo assim a aplicação repetida de resíduos domésticos ao longo do tempo.

Solos que não apresentam influência antrópica marcante, apresentaram altos níveis de P em superfície (Figura 7), com valores baixos em carbono orgânico (P10, P11 e P13) sugerindo assim o uso de fertilizantes inorgânicos (GOODMAN-ELGAR, 2008). Alguns terraços apresentam baixos teores de P e carbono orgânico, talvez por nunca terem sido fertilizados extensivamente com adubação, com baixas produtividades que levaram ao abandono e degradação (P09), além da expansão das áreas urbanas (P07). Isso devido a mudanças da posse da terra, falta de melhoria das infraestruturas durante o período colonial (1533 – 1826) (GADE, 2016), além de doenças como a varíola e sarampo que afetaram grande parte da população andina entre os anos 1585 a 1586 e 1590 (COOK, 2000) ocasionando o despovoamento das comunidades provocando o abandono de suas terras. Outro fator que poderia afetar a baixa fertilidade dos terraços agrícolas é a mudança em relação as práticas tradicionais de plantio a longo prazo, ou seja, sua substituição por uma economia de trabalho e produção agrícola orientada para o mercado (INBAR & LLERENA, 2000).

A ligeira acidez nos horizontes superficiais dos solos antrópicos (P03, P04, P05, P06) é bem evidente em solos cultivados na atualidade, e provavelmente está relacionado a adições de matéria orgânica (aplicação de adubos) que promovem a redução do pH (SANDOR & EASH, 1995). A diminuição do pH pode ser ainda devido a nitrificação que ocorre após a adição de adubos ricos em amônio, produzindo ions  $H^+$ .

#### 4.3. Análises de dissolução seletiva dos solos em estudo

A baixa intensidade dos picos observados nos difratograma da argila natural em horizontes indica baixa cristalinidade dos minerais (Figura suplementar, Figura S.1). Provavelmente esse baixo grau de cristalinidade seja associada a altos níveis de pH, P, Ca e

MO (Figura 3, 4, 5 e 6). Características similares foram observados por Souza et al (2020) estudando Archaeoantrosols no semiárido do Brasil.

A razão  $Fe_o/Fe_d < 0.04$  sugere a predominância de formas cristalinas de óxidos de Fe, como por exemplo, hematita, encontradas no P01, P09 e P13, verificados nos difratograma de raios-X (Figura 6 e 8) localizados atualmente em ambiente semiárido temperado (INRENA, 1995). A presença de hematita também foi registrado por Cerón, et al. (2014), Cerón, et al. (2011) no sitio arqueológico de Moray, Cuzco sob condições subúmidas de acordo a INRENA (1995). Sabe-se que a hematita é mais frequente em ambientes de altas temperaturas que favorece a sua formação, pH baixo, alta umidade (CORNELL & SCHWERTMANN, 2008), pois de acordo a Chepstow-Lusty et al., (2003), entre 8000 e 5000 anos BP o clima nos andes centrais foi geralmente quente, estável e relativamente árido, provavelmente essas condições favoreceram a formação da hematita no passado, além de serem solos bem drenados. Esses pedons, principalmente P09 e P13 apresentaram os maiores teores de retenção de fósforo (Apendice A) que pode ser justificado pela presença de hematita, além da presença de carbonatos que foi corroborado pela reação com HCl (10%).

Valores mais altos da razão  $Fe_o/Fe_d$  foram encontrados nas posições mais altas (acima de 3600 m.s.l.m) que sugere a dominância de formas de Fe não cristalino como a ferridrita (Tabela 4), ocasionado pelas baixas temperaturas a maior altitude, além da maior umidade, dificultando a cristalização dos óxidos (KLEBER ET AL., 2015; SCHWERTMANN, 1985), em clima frio, úmido a subúmido (Tabela 1).

A Razão  $Al_p/Al_o < 0,5$  (Tabela 4) encontrada em alguns pedons sugerem a presença de materiais amorfos (alofana/imogolita). Por outro lado, pH acima de 7 não favorece a formação e manutenção desses materiais. Ugolini e Dahlgren, (1991) sugere que a formação de alofana e imogolita é favorecido a pH ( $H_2O$ ) de 5 a 7. Mesmo assim, solos com pH variando de 5 a 7 estudados, não estariam favorecendo a formação de alofana/imogolita devido a presença de minerais 2:1 (Figura 6 e 8, material suplementar Figura S.1). Estudos realizados por Dahlgren et al., (1993) e Shoji e Fujiwara (1984) em solos vulcânicos, reportaram que a presença de silicatos 2:1 não favorece a formação de alofana/imogolita. A Razão  $Al_p/Al_o > 0,5$  foi nos horizontes 3Av (Tabela 3), indicando a dominância de complexos de Al-Húmus, favorecido pelo pH  $< 4,9$  e alto teor em matéria orgânica (Figura 5)

Valores acima de 0,8 para as razões de  $Fe_p/Fe_o$  e  $Al_p/Al_o$  (Tabela 3) extraídas por oxalato de amônio, podem estar ligadas a compostos orgânicos. Loveland e Bullock (1976) indica que

o oxalato de amônio não é eficiente na extração de Fe e Al associado com ácidos húmicos porque em pH próximo de 3, esta fração da matéria orgânica é ligeiramente solúvel.

Por outro lado, valores da razão  $Al_o/Al_d$  acima de 1 foi observado na maioria dos pedons (Tabela 4), assim como reportado por Portes et al (2016) na Cordilheira ocidental peruana. Wada (1978) sugere que a extração de formas cristalinas de Al por DCB não representa o total do Al pedogenético.

## 5. Conclusões

A influência antrópica prolongada em solos na região Andina em Cuzco, desde épocas pré-hispânicas, alterou fortemente as propriedades físicas e químicas dos solos naturais. Essas alterações resultam principalmente na técnica de construção de terraços associada a diferentes práticas de manejo do solo tais como a aplicação de adubos orgânicos, cultivos intercalados (intercropping) e rotação de culturas a longo prazo.

Os terraços agrícolas causaram extensa modificação das propriedades físicas e químicas do solo, tais como o aumento da espessura do *Top Soil*, alteração da estrutura pedológica, porosidade, e pelos valores altíssimos de P. Valores baixos de C e P encontrados em alguns terraços são relacionados ao abandono destes, pela migração da população das áreas rurais para áreas urbanas, alguns dos quais podem estar abandonados desde a época da conquista espanhola.

A datação de  $^{14}C$  de amostra de carvão no P03, indica que os terraços agrícolas se formaram durante o período Pré-Cerâmico Arcaico tardio (2698 - 2486 BC), com níveis altíssimos de  $P_M$  e  $P_t$ , sugerindo efeitos acumulativos seculares de adubação. A presença de hematita encontrada nos pedons do semiárido, sugere uma herança do clima quente no passado.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Este trabalho é a contribuição do Instituto de Ciência e Tecnologia da Criosfera - grupo TERRANTAR.

## Referencias

- ALVAREZ, V.V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. *B. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo*. V. 52, p.27-32, 2000
- ARNÁEZ, J.; LANA-RENAULT, N.; LASANTA, T.; RUIZ-FLAÑO, P.; CASTROVIEJO, J. Effects of farming terraces on hydrological and geomorphological processes. A review. *Catena*, v. 128, p. 122–134, 2015.
- BORISOV, A.V.; CHERNYSHEVA, E.V.; KOROBOV, D.S. Buried Paleoanthrosols of the Bronze Age agricultural terraces in the Kislovodsk basin (Northern Caucasus, Russia). *Quaternary International*, v. 418, p. 28–36, 2016.
- BOWMAN, R.A. A Rapid Method to Determine Total Phosphorus in Soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 52, n. 5, p. 1301–1304, 1988.
- BRANCH, N.P.; KEMP, R.A.; SILVA, B.; MEDDENS, F.M.; WILLIAMS, A.; KENDALL, A.; POMACANCHARI, C.V. Testing the sustainability and sensitivity to climatic change of terrace agricultural systems in the Peruvian Andes: a pilot study. *Journal of Archaeological Science*, v. 34, n. 1, p. 1–9, 2007.
- CARLOTTO, V.C.; GIL, W.; CÁRDENAS, J.; CHÁVEZ, R. Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca, Hoja: 27r y 27s- 1:100 000 **INGEMMET**, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 65,245p., 2 mapas, 1996
- CARLOTTO, V.C.; CÁRDENAS, R.J.; CARLIER, G. Geología del cuadrángulo de Cusco, Hoja: 28s - 1:50 000. **INGEMMET**, Boletín, Série A: 138, 258p., 6 mapas, 2011.
- CERON LOAYZA, M.L.; AURELIO, B.C.J.; REYES NAVARRO, F.A.; ASCUNA ARCONDO, R. Structural characterization of iron oxides and hydroxides in the clay fraction of soil from the Inca civilization Moray terraces. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, v. 24, n. 2, p. 41–48, 2014.
- CERÓN LOAYZA, M.L.; BRAVO CABREJOS, J.A.; MEJÍA SANTILLÁN, M.E. Mineralogy of the clay fraction of soils from the moray cusco archaeological site: A study by energy dispersive X-ray fluorescence, X-ray diffractometry and Mössbauer spectroscopy. *Hyperfine Interactions*, v. 203, n. 1–3, p. 133–141, 2011.
- CHEN, D.; WEI, W.; CHEN, L. Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis. *Earth-Science Reviews*, v. 173, p. 109–121, 2017.

CHEN, P. Y. Table of key lines in x ray powder diffraction patterns of minerals in clays and associated rocks. **Department of Natural Resources Geological Survey Occasional Paper**, 21, v. 21, p. 77, 1977.

CHEPSTOW-LUSTY, A.; FROGLEY, M.R.; BAUER, B.S.; BUSH, M. B.; HERRERA, A. T. A late Holocene record of arid events from the Cuzco region, Peru. **Journal of Quaternary Science**, v. 18, n. 6, p. 491–502, 2003.

CHEPSTOW-LUSTY, A. A. J., BENNETT, K. D., FJELDSA, J., KENDALL, A., & GALIANO, W. Tracing of Environmental in the Cuzco From the Pollen Record. **Environmental History**, v. 18, n. 2, p. 159–172, 1998

CHILDS, C.W.; MATSUE, N.; YOSHINAGA, N. Ferrihydrite in volcanic ash soils of Japan. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 37, n. 2, p. 299–311, 1991

COOK, N. **El impacto de las enfermedades en el mundo antiguo andino del siglo XVI. Revista Historica**, v. 24 n. 2, p. 341–365, 2000

CORRÊA, R.G.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MELO, V.F.; SOUZA, K.W.; KER., J.C., RODRIGUES, I.M.; SENRA, E.O. Physical and Chemical attributes of archaeological soil developed from shell middens in the região dos Lagos, Rio de Janeiro, **Brazil. R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, p. 1100-1111, 2011.

DAHLGREN, R.; SHOJI, S.; NANZYU, M. Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. In: SHOJI, S.; NANZYU, M.; DAHLGREN, R.A. **Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization**, 1st ed. **Developments in Soil Science**, vol. 21 Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1993.

DENEVAN, W.M. Prehistoric agricultural methods as models for sustainability. **Advances in Plant Pathology**, v. 11, n. C, p. 21–43, 1995.

DICK, R. P.; SANDOR, J.A.; EASH, N.S. Soil enzyme activities after 1500 years of terrace agriculture in the Colca Valley, Peru. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 50, n. 2, p. 123–131, 1994

EMBRAPA. **Manual de metodos de analises**. [S.l: s.n.], 2017.

FERRO-VÁZQUEZ, C.; LANG, C.; KAAL, J.; STUMP, D. When is a terrace not a terrace? The importance of understanding landscape evolution in studies of terraced agriculture. **Journal of Environmental Management**, v. 202, p. 500–513, 2017.

GADE, D.W. Spell of the Urubamba: Anthropogeographical Essays on na Andean Valley in Space and Time. **Springer**, 2016.

GOODMAN-ELGAR, M. Evaluating soil resilience in long-term cultivation: a study of pre-Columbian terraces from the Paca Valley, Peru. **Journal of Archaeological Science**, v. 35, n. 12, p. 3072–3086, 2008

GUILLET, D. Terracing and irrigation in the Peruvian highlands. **Current Anthropology**, v. 28, n. 4, p. 409–430, 1987.

HOGG, A. G.; HUA, Q.; BLACKWELL, P.G.; NIU, M.; BUCK, C.E.; GUILDERSON, T.P.; ZIMMERMAN, S.R.H. SHCal13 Southern Hemisphere Calibration, 0–50,000 Years cal BP. **Radiocarbon**, v. 55, n. 4, p. 1889–1903, 2013

HOLLIDAY, V. T.; GARTNER, W. G. Methods of soil P analysis in archaeology. **Journal of Archaeological Science**, v. 34, n. 2, p. 301–333, 2007.

HOMBURG, J.A.; SANDOR, J. A. Anthropogenic effects on soil quality of ancient agricultural systems of the American Southwest. **Catena**, v. 85, n. 2, p. 144–154, 2011.

IMA (Instituto de Manejo de Agua y Medio Ambiente), Zonificación Ecologica Economica de la Región Cusco. PER - IMA. Cusco, Perú, 2009.

INBAR, M.; LLERENA, C. A. Erosion Processes in High Mountain Agricultural Terraces in Peru. **Mountain Research and Development**, v. 20, n. 1, p. 72–79, 2000..

INRENA. Mapa Ecologico del Perú – Guía Explicativa. Ministerio de Agricultura. Lima – Perú, 1995.

IUUS Working Group WRB. Base Referencial mundial del recurso suelo 2014, actualización 2015. [S.l: s.n.], 2015.

KEMP, R.; BRANCH, N.; SILVA, B.; MEDDENS, F.; WILLIAMS, A.; KENDALL, A.; VIVANCO, C. Pedosedimentary, cultural and environmental significance of paleosols within pre-hispanic agricultural terraces in the southern Peruvian Andes. **Quaternary International**, v. 158, n. 1, p. 13–22, 2006

KENDALL, A.; RODRÍGUEZ, A. Desarrollo y perspectivas de los sistemas de andeneria de los Andes centrales del Perú. Cuzco: institud français d'études andines, 2009 Doi:10.4000/books.ifea.6114.

KLEBER, M.; EUSTERHUES, K.; KEILUWEIT, M.; MIKUTTA, C.; MIKUTTA, R.; NICO,

P.S. Mineral-Organic Associations: Formation, Properties, and Relevance in Soil Environments. [S.l.]: **Elsevier** Ltd, 2015. v. 130.

LONDOÑO, A.C. Pattern and rate of erosion inferred from Inca agricultural terraces in arid southern Peru. **Geomorphology**, v. 99, n. 1–4, p. 13–25, 2008

LONDOÑO, A.C.; WILLIAMS, P.R.; HART, M.L.A change in landscape: Lessons learned from abandonment of ancient Wari agricultural terraces in Southern Peru. **Journal of Environmental Management**, v. 202, p. 532–542, 2017.

LOVELAND, P.J.; BULLOCK, P. Chemical and mineralogical properties of brown podzolic soils in comparison with soils of other groups. *Journal of Soil Science*, v. 27, p. 52–56, 1976

Lumbreras, L.G. 1981. *Arqueología de la América Andina*. 1ª ed. Lima: Editorial Milla Batres.

Lumbreras, L.G. 1999. Formación de las sociedades urbanas. In: Lumbreras, L.G (Ed). *Historia de América Andina*. Vol. 1: Las Sociedades Aborígenes. Universidad Andina Simón Bolívar. pp 223-265.

MCKEAGUE, J. A.; DAY, J. H. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 46, n. 1, p. 13–22, 1966.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron Oxide Removal from Soils and Clays by a Dithionite-Citrate System Buffered with Sodium Bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, v. 7, n. 1, p. 317–327, 1958

MUNSELL SOIL COLOR COMPANY. *Munsell Soil Color Charts*, Baltimore, 2012

NANAVATI, W.P.; FRENCH, C.; LANE, K.; OROS, O.H.; BERESFORD-JONES, D. Testing soil fertility of Prehispanic terraces at Viejo Sangayaico in the upper Ica catchment of south-central highland Peru. **Catena**, v. 142, p. 139–152, 2016. Disponible em:

NANZYO, M.; DAHLGREN, R.; SHOJI, S. Chapter 6 Chemical Characteristics of Volcanic Ash Soils. **Developments in Soil Science**, v. 21, n. C, p. 145–187, 1993.

NI, S.J.; ZHANG, J.H. Variation of chemical properties as affected by soil erosion on hillslopes and terraces. *European Journal of Soil Science*, v. 58, n. 6, p. 1285–1292, 2007.

OIM. *Migraciones Internas en el Perú*. Lima, Perú, 2015

ONERN. Inventario y evaluación de los recursos naturales de la zona Altoandina del Peru. (suelos, uso actual, agrostologia). Semidetallado Departamento del Cusco. Oficina Nacional de Evaluación de los Recursos Naturales. Lima, Perú. p. 178, 1988

PAL, D.K.; SRIVASTAVA, P.; BHATTACHARYYA, T. Clay illuviation in calcareous soils of the semiarid part of the Indo-Gangetic Plains, India. **Geoderma**, v. 115, n. 3–4, p. 177–192, 2003

PEARSALL, D.M. Plant Domestication and the Shift to Agriculture in the Andes. In: Silverman, H and Isbell, W.H (eds). *The Handbook of South American Archaeology*, New York: **Springer**, pp. 105–120, 2008.

PEREIRA, M.G.; SCHIAVO, J.A.; FONTANA, A.; NETO, A.H.D.; DE MIRANDA, L.P.M. Caracterização e classificação de solos em uma toposequência sobre calcário na Serra da Bodoquena, MS. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, n. 1, p. 25–36, 2013.

CORNELL, R.M.; SCHWERTMANN, U. Iron oxides. In *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 2008.

RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Rev. Bras. Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 297–300, 2005.

SÁNCHEZ, A.F.; ZAPATA, A.M. Memoria Descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de río Picha (25-p), Timpia (25-q), Chuanquiri (26-p), Quillabamba (26-q) Quebrada Honda (26-r), Parobamba (26-s), Pacaypata (27-p), Machupicchu (27-q), Urubamba (27-r), Calca (27-s), Chontachaca (27-t), Quincemil (27-u), Ocongate (28-t), Corani (28-u) y Ayapata (28-v). Escala 1:100 000. Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalurgico - INGEMMET, 2003.

SANDOR, J.A.; EASH, N.S. Significance of Ancient Agricultural Soils for Long-Term Agronomic Studies and Sustainable Agriculture Research. **Agronomy Journal**, v. 83, n. 1, p. 29–37, 1991.

SANDOR, J.A.; EASH, N.S. Ancient Agricultural Soils in the Andes of Southern Peru. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, n. 1, p. 170–179, 1995.

SANDOR, J.A.; GERSPER, P.L.; HAWLEY, J.W. Soils at Prehistoric Agricultural Terracing Sites in New Mexico: I. Site Placement, Soil Morphology, and Classification. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 1, p. 177–180, 1986.

- SANDOR, J.A.; GERSPER, P.L.; HAWLEY, J.W. Prehistoric agricultural terraces and soils in the Mimbres area, New Mexico. **World Archaeology**, v. 22, n. 1, p. 70–86, 1990
- SANDOR, J.A.; HOMBURG, J.A. Anthropogenic Soil Change in Ancient and Traditional Agricultural Fields in Arid to Semiarid Regions of the Americas. **Journal of Ethnobiology**, v. 37, n. 2, p. 196, 2017.
- SCHWERTMANN, U. The Effect of Pedogenic Environments on Iron Oxide Minerals. v. 1, p. 171–200, 1985.
- SHOJI, S.; FUJIWARA, Y. Active aluminum and iron in the humus horizons of andosols from northeastern Japan: Their forms, properties, and significance in clay weathering. **Soil Science**, v. 137, p. 216–226, 1984.
- SOUZA, J. J. L. L.; DE SOUZA, B. I.; XAVIER, R. A.; PACHECO, A. A.; PESSENDA, L. C. R.; DOS SANTOS BRITO, E. Archaeoanthrosol formation in the Brazilian semiarid. **Catena**, v. 193, 2020
- SOIL SURVEY STAFF. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. **Change**, v. 12, p. 372, 2014.
- SOIL SURVEY STAFF. Soil Survey Manual Agriculture. Handbook 18. **USDA, Natural Resources Conservation Service**, v. 18, n. 18, p. 483, 2017
- SPENCER, J.E.; HALE, G. Origin, nature, and Distribution of Agricultural terracing. **Pacific Viewpoint**, v. 2, n. 1, p. 1–40, 1961.
- STANCHI, S.; FREPPAZ, M.; AGNELLI, A.; REINSCH, T.; ZANINI, E. Properties, best management practices and conservation of terraced soils in Southern Europe (from Mediterranean areas to the Alps): A review. **Quaternary International**, v. 265, p. 90–100, 2012.
- SUBLETTE MOSBLECH, N.A.; CHEPSTOW-LUSTY, A.; VALENCIA, B.G.; BUSH, M. B. Anthropogenic control of late-Holocene landscapes in the Cuzco region, Peru. **Holocene**, v. 22, n. 12, p. 1361–1372, 2012.
- TAROLLI, P.; PRETI, F.; ROMANO, N. Terraced landscapes: From an old best practice to a potential hazard for soil degradation due to land abandonment. **Anthropocene**, v. 6, p. 10–25, 2014
- THOMPSON, L.G.; MOSLEY-THOMPSON, E.; DANSGAARD, W.; GROOTES, P.M.. The Little Ice Age as Recorded in the Stratigraphy of the Tropical Quelccaya Ice Cap. **Science** v.

234, n. 4774, p.361–364, 1986

THOMPSON, L.G.; MOSLEY-THOMPSON, E.; BOLZAN, J.F.; KOCI, B.R. A 1500-Year Record of Tropical Precipitation in Ice Cores from the Quelccaya Ice Cap, Perú. **Science** v. 229, n. 4717, p. 971–973, 1985.

UGOLINI, F.C.; DAHLGREN, R.A. Weathering Environments and Occurrence of Imogolite/Allophane in Selected Andisols and Spodosols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n. 4, p. 1166–1171, 1991

WADA, K. Chapter 4 Allophane and imogolite. **Developments in Sedimentology**, v. 26, n. 1926, p.147–187, 1978.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, p. 29–38, 1934.

## APÉNDICE

Apêndice A. Características químicas dos pedons estudados

Perfil	Depth cm	pH		ΔpH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	SB <sup>a</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al <sup>b</sup>	CTC (t)	CTC	V	m	CO	P <sub>M</sub>	Pt	P <sup>a</sup>
		H <sub>2</sub> O	KCl																
		cmol.c.kg <sup>-1</sup>										-----%-----	% <sup>1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>		%			
<b>P01-Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic, Pantoescalic)/3192 m.s.l.m</b>																			
Ap	0 - 30	6,39	5,66	-0,73	12,79	2,16	0,97	0,06	15,99	0,00	2,10	15,99	18,09	88,40	0,00	2,20	34,30	586,11	40,00
2Bb	30 - 90	7,13	6,60	-0,53	15,48	1,79	0,72	0,16	18,14	0,00	0,20	18,14	18,34	98,90	0,00	1,29	97,80	281,15	42,00
<b>P02-Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)/3577 m.s.l.m</b>																			
Ap	0 - 20	7,41	6,59	-0,82	14,73	0,43	0,15	0,06	15,37	0,00	0,50	15,37	15,87	96,80	0,00	2,65	102,00	768,00	40,33
2Ab	20 - 40	7,24	6,49	-0,75	16,50	0,32	0,10	0,05	16,97	0,00	0,30	16,97	17,27	98,30	0,00	1,91	66,80	632,30	42,33
3ACb	40 - 90	7,70	6,46	-1,24	17,82	0,49	0,07	0,04	18,43	0,00	0,20	18,43	18,63	98,90	0,00	1,10	22,50	417,99	53,50
3CA	90 - 140	7,89	6,85	-1,04	19,45	0,65	0,05	0,06	20,21	0,00	0,00	20,21	20,21	100,00	0,00	1,10	18,30	312,00	62,00
Cr	140 - 200	7,87	6,94	-0,93	19,22	0,59	0,05	0,05	19,91	0,00	0,00	19,91	19,91	100,00	0,00	1,10	20,40	-	60,00
<b>P03-Pantopetric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)/3741 m.s.l.m</b>																			
Ap	0 - 30	6,96	6,04	-0,92	23,02	1,82	0,45	0,23	25,52	0,00	1,60	25,52	27,12	94,10	0,00	2,94	1631,40	2415,82	52,83
2Ab	30 - 60	6,99	6,07	-0,92	22,88	1,72	0,18	0,23	25,03	0,00	1,60	25,03	26,63	94,00	0,00	2,58	1717,60	2611,61	48,83
3Ab	60 - 100	7,33	6,50	-0,83	28,75	1,58	0,39	0,37	31,09	0,00	0,30	31,09	31,39	99,00	0,00	2,58	1503,90	5412,76	49,00
4C	100 - 120	7,58	6,57	-1,01	24,53	1,46	0,72	0,52	27,23	0,00	0,20	27,23	27,43	99,30	0,00	2,20	978,30	6724,59	44,00
5Ab	120 - 140	7,68	6,69	-0,99	25,43	1,66	0,72	0,32	28,13	0,00	0,20	28,13	28,33	99,30	0,00	3,31	1380,50	4860,77	52,50
<b>P04-Pantoterric Endopetrocalcic Kastanozems (Pantoloamic, Endodensic)/3748 m.s.l.m</b>																			
Ap	0 - 5	6,33	5,02	-1,31	9,42	1,13	0,13	0,10	10,78	0,00	4,20	10,78	14,98	72,00	0,00	1,98	8,70	638,58	64,50
2Ap	5 - 30	6,34	4,59	-1,75	8,75	0,98	0,08	0,06	9,87	0,00	4,50	9,87	14,37	68,70	0,00	1,18	2,70	420,10	68,83
3C	30 - 35	6,16	4,81	-1,35	13,10	1,11	0,06	0,09	14,36	0,00	1,80	14,36	16,16	88,90	0,00	0,52	5,00	509,27	68,33
4Ab	35 - 70	6,46	4,97	-1,49	11,77	0,68	0,08	0,08	12,61	0,00	2,40	12,61	15,01	84,00	0,00	0,59	4,00	667,88	75,33
Cr	70 - 130	8,03	8,19	0,16	2,35	0,03	0,01	0,07	2,45	0,00	0,00	2,45	2,45	100,00	0,00	0,22	0,70	-	74,50
<b>P05--"Anthropic" Pantoeutric Regosol (Pantoloamic)/3781 m.s.l.m</b>																			
Op	0 - 20	6,19	5,56	-0,63	11,05	2,76	0,56	0,12	14,50	0,00	4,00	14,50	18,50	78,40	0,00	9,56	118,10	409,43	24,50
A2	20 - 50	6,46	5,49	-0,97	6,38	1,89	0,82	0,07	9,16	0,00	2,40	9,16	11,56	79,20	0,00	2,58	114,10	663,24	36,17
Ab	50 - 60	6,49	5,29	-1,20	5,19	1,51	0,72	0,05	7,47	0,00	1,90	7,47	9,37	79,70	0,00	0,96	109,30	566,59	41,00
C	60 - 100	6,35	4,94	-1,41	5,09	1,49	0,67	0,06	7,31	0,00	2,60	7,31	9,91	73,80	0,00	1,03	104,30	-	39,00

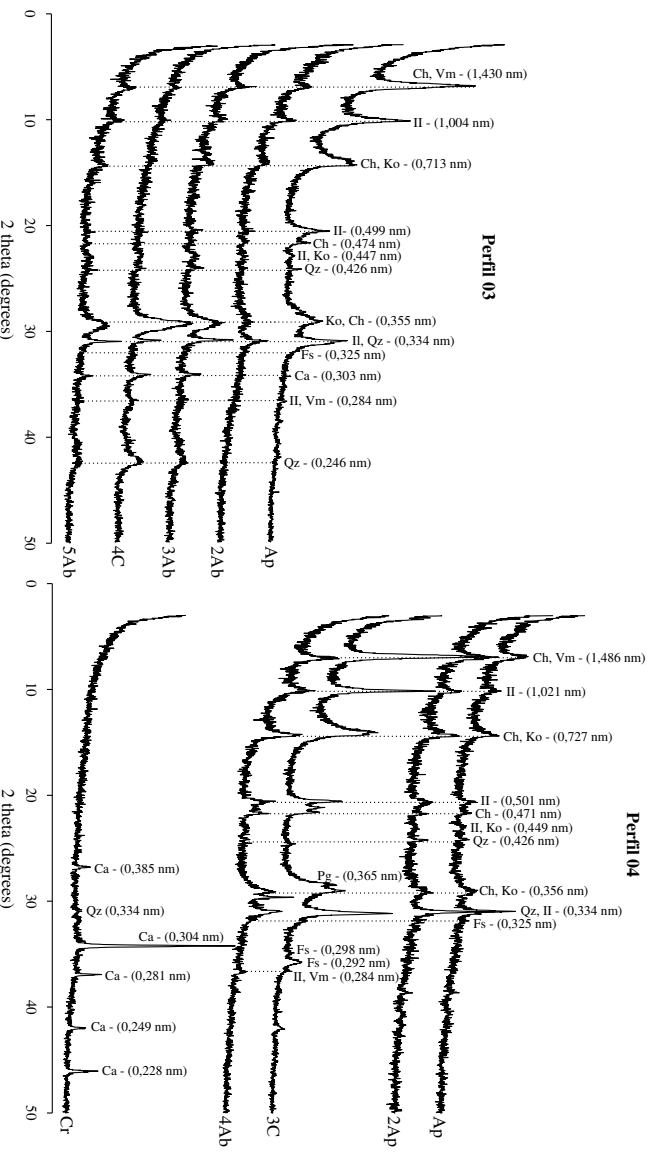
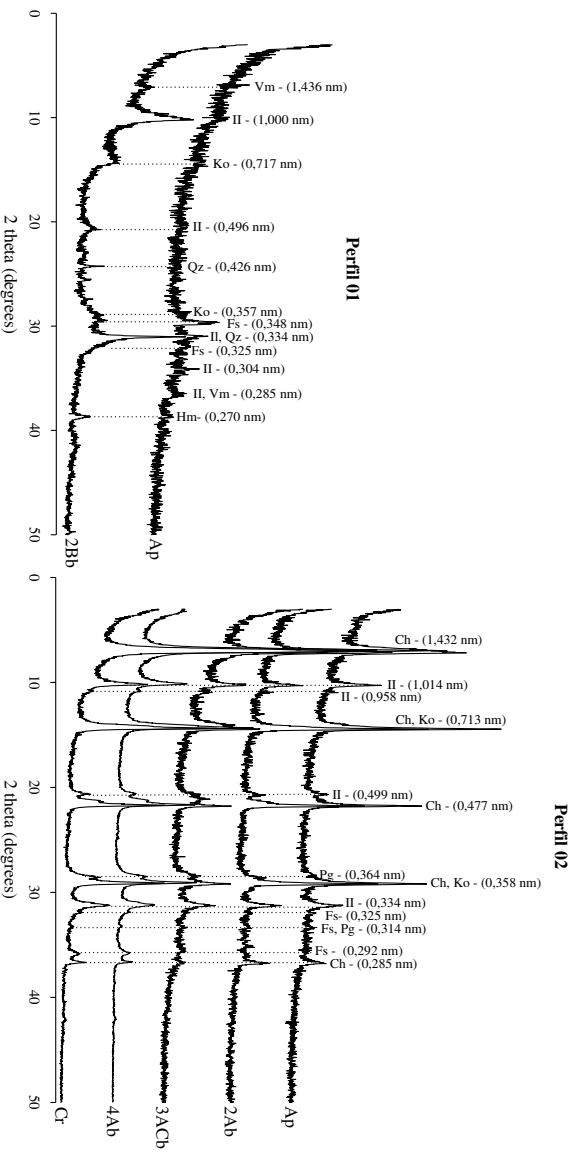
Continuação...

Perfil	Depth cm	pH		$\Delta$ pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	SB <sup>a</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al <sup>b</sup>	CTCef	CTCpt	V	m	CO	P <sub>M</sub>	Pt	P <sup>a</sup>
		H <sub>2</sub> O	KCl																
<b>P06-Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)/3835 m.s.l.m</b>																			
Ap	0 - 20	5,97	5,10	-0,87	10,64	2,48	0,21	0,10	13,42	0,00	3,70	13,42	17,12	78,40	0,00	2,94	22,10	744,01	46,50
2BA	20 - 55	6,07	4,90	-1,17	11,52	2,48	0,09	0,08	14,17	0,00	3,20	14,17	17,37	81,60	0,00	1,65	30,50	346,52	49,00
3Ab	55 - 100	6,50	5,23	-1,27	12,12	2,50	0,06	0,10	14,78	0,00	2,20	14,78	16,98	87,00	0,00	1,65	11,80	442,80	55,83
4Ab	100 - 150	6,79	5,45	-1,34	13,56	2,42	0,07	0,10	16,14	0,00	1,90	16,14	18,04	89,50	0,00	1,29	21,70	294,34	59,00
5Ab	150 - 250	6,96	5,73	-1,23	20,07	2,80	0,07	0,07	23,01	0,00	1,60	23,01	24,61	93,50	0,00	1,65	16,90	499,28	61,83
Cr	rocha	7,63	6,37	-1,26	28,04	2,62	0,07	0,11	30,84	0,00	0,20	30,84	31,04	99,40	0,00	0,52	136,10	-	61,17
<b>P07-Pantoterric Anthrosols (Eutric, Pantoclayic, Pantoveritic)/3729 m.s.l.m</b>																			
Ap	0 - 25	6,20	5,88	-0,32	15,25	2,12	0,17	0,29	17,83	0,00	2,90	17,83	20,73	86,00	0,00	3,13	5,30	445,49	60,67
2Av	25 - 60	5,55	4,67	-0,88	18,86	1,57	0,06	0,20	20,69	0,00	7,40	20,69	28,09	73,70	0,00	4,41	2,10	206,44	63,50
3Av	60 - 82	4,65	3,78	-0,87	12,76	1,63	0,05	0,16	14,60	0,00	9,00	14,60	23,60	61,90	0,00	3,86	2,20	109,26	60,17
4Av	82 - 110	4,16	3,83	-0,33	24,63	2,85	0,08	0,13	27,69	0,29	17,20	27,98	44,89	61,70	1,00	6,98	2,80	430,17	84,33
5Abv	110 - 170	5,72	5,32	-0,40	27,26	3,43	0,16	0,11	30,96	0,00	3,50	30,96	34,46	89,80	0,00	4,04	2,00	138,27	68,17
<b>P08-Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic, Pantoescalic)/3772 m.s.l.m</b>																			
Ap	0 - 30	7,78	7,38	-0,40	15,30	0,54	0,56	0,05	16,46	0,00	0,00	16,46	16,46	100,00	0,00	4,23	4,50	468,73	57,17
2AC	30 - 60	7,75	7,35	-0,40	16,16	0,47	0,16	0,04	16,84	0,00	0,00	16,84	16,84	100,00	0,00	2,94	9,30	544,66	60,50
3C	60 - 100	7,82	7,44	-0,38	12,82	0,46	0,07	0,07	13,42	0,00	0,00	13,42	13,42	100,00	0,00	0,88	1,00	317,58	54,00
4C	100 - 180	8,08	7,04	-1,04	12,02	0,62	0,02	0,10	12,76	0,00	0,00	12,76	12,76	100,00	0,00	0,37	12,10	330,17	32,33
<b>P09-Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)/3414 m.s.l.m</b>																			
Ap	0 - 45	7,89	7,07	-0,82	21,74	0,70	0,55	0,07	23,06	0,00	0,00	23,06	23,06	100,00	0,00	2,58	2,10	271,24	68,50
2Ab	45 - 75	7,81	7,05	-0,76	27,40	1,43	0,12	0,12	29,07	0,00	0,00	29,07	29,07	100,00	0,00	2,20	0,30	455,44	73,33
2ABb	75 - 110	7,82	7,10	-0,72	27,25	1,29	0,10	0,09	28,73	0,00	0,00	28,73	28,73	100,00	0,00	2,39	1,30	241,42	72,33
2BAb	110 - 140	7,59	6,91	-0,68	25,11	2,90	0,10	0,16	28,17	0,00	0,00	28,17	28,17	100,00	0,00	0,92	1,40	141,24	97,08
3Ab	140 - 180	7,76	6,93	-0,83	28,64	5,69	0,09	0,15	34,57	0,00	0,00	34,57	34,57	100,00	0,00	0,66	0,50	251,11	96,83
3ABb	180 - 200	7,85	6,98	-0,87	30,99	7,19	0,08	0,17	38,42	0,00	0,00	38,42	38,42	100,00	0,00	0,59	1,10	294,22	96,92
3C	200 - 260	7,91	7,23	-0,68	18,42	5,25	0,06	0,16	23,89	0,00	0,00	23,89	23,89	100,00	0,00	0,37	1,10	129,86	97,28
<b>P10-Pantohypereutric Pantorhodic Endoprotovertic Cambisols (Pantoloamic, Ochric)/3602 m.s.l.m</b>																			
Ap	0 - 30	7,10	6,33	-0,77	26,56	0,87	0,14	0,11	27,68	0,00	0,30	27,68	27,98	98,90	0,00	0,81	22,20	1248,66	52,50
Bi	30 - 50	7,69	6,54	-1,15	27,64	1,21	0,11	0,15	29,11	0,00	0,20	29,11	29,31	99,30	0,00	0,44	5,80	621,29	62,17
BC	50 - 110	7,88	6,64	-1,24	27,63	1,24	0,10	0,17	29,14	0,00	0,20	29,14	29,34	99,30	0,00	0,44	5,40	518,66	69,67
Cr	110 - 150	7,96	6,70	-1,26	29,61	1,49	0,13	0,19	31,42	0,00	0,20	31,42	31,62	99,40	0,00	0,22	1,70	486,53	74,67

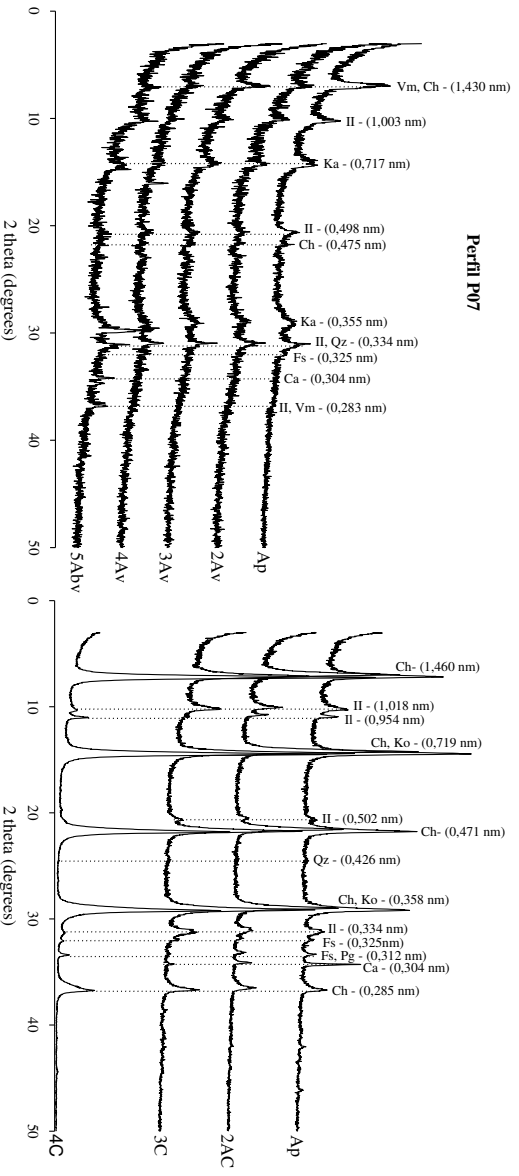
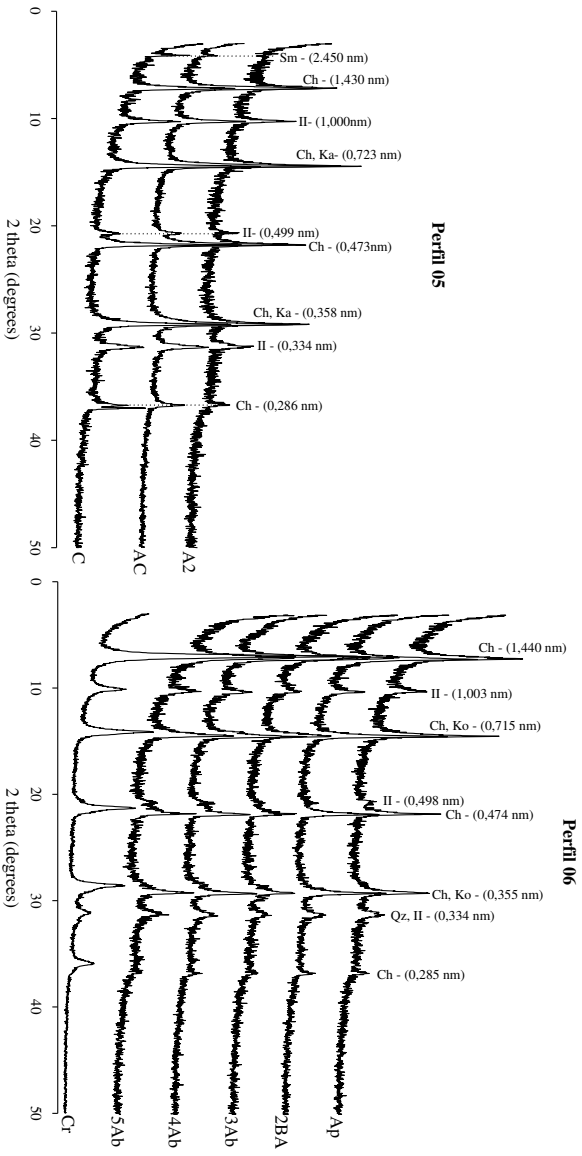
Continuação...

Perfil	Depth cm	pH		$\Delta$ pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	SB <sup>a</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al <sup>b</sup>	CTC (t)	CTC	V	m	CO	P <sub>M</sub>	Pt	P <sup>a</sup>
		H <sub>2</sub> O	KCl																
					cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>							-----%-----		%		mg.kg <sup>-1</sup>		%	
<b>P11-Pantohypereutric Pantofluvic Fluvisols (Pantoloamic, Ochric)/3449 m.s.l.m</b>																			
Ap	0 - 5	7,06	6,74	-0,32	12,60	0,72	0,35	0,13	13,80	0,00	0,80	13,80	14,60	94,50	0,00	4,78	81,10	553,94	32,50
C1	5 - 40	7,66	6,98	-0,68	10,38	0,66	0,25	0,10	11,39	0,00	0,20	11,39	11,59	98,30	0,00	0,74	41,50	457,44	41,00
C2	40 - 65	7,85	7,09	-0,76	11,64	0,46	0,13	0,10	12,34	0,00	0,20	12,34	12,54	98,40	0,00	0,66	31,30	483,45	48,83
C3	65 - 110	7,84	7,18	-0,66	11,71	0,47	0,09	0,16	12,43	0,00	0,00	12,43	12,43	100,00	0,00	0,66	27,20	492,82	45,83
C4	110 - 150	7,85	7,33	-0,52	11,37	0,53	0,06	0,18	12,14	0,00	0,00	12,14	12,14	100,00	0,00	0,59	36,30	-	52,50
<b>P12-Epidystric Cambisols (Anoclayic, Ochric)/3590 m.s.l.m</b>																			
A	0 - 10	7,04	6,19	-0,85	8,94	2,11	0,82	0,05	11,92	0,00	1,90	11,92	13,82	86,30	0,00	3,86	5,80	475,20	55,67
Bw	10 - 30	5,19	3,81	-1,38	2,66	0,74	0,28	0,03	3,72	1,55	7,90	5,27	11,62	32,00	29,40	1,91	2,20	520,70	83,83
BC	30 - 60	5,04	3,92	-1,12	4,02	1,94	0,12	0,08	6,16	0,68	4,80	6,84	10,96	56,20	9,90	0,66	4,50	-	84,17
Cr	60 - 120	6,03	5,06	-0,97	8,22	4,23	0,11	0,10	12,66	0,00	1,40	12,66	14,06	90,00	0,00	0,15	1,30	-	73,17
<b>P13 - Endopetrocalcic kastanozems (Loamic, Endodensic)/3192 m.s.l.m</b>																			
Ap	0 - 15	7,95	6,98	-0,97	24,70	0,74	0,28	0,20	25,92	0,00	0,00	25,92	25,92	100,00	0,00	2,65	14,30	172,33	96,82
A2	15 - 40	7,87	6,91	-0,96	27,93	0,63	0,11	0,16	28,83	0,00	0,00	28,83	28,83	100,00	0,00	1,54	9,90	328,35	96,50
AC	40 - 60	7,82	6,99	-0,83	23,65	0,53	0,07	0,18	24,43	0,00	0,00	24,43	24,43	100,00	0,00	1,32	1,90	335,98	96,38
Ck1	60 - 90	7,79	7,39	-0,40	12,68	0,39	0,03	0,85	13,95	0,00	0,00	13,95	13,95	100,00	0,00	0,81	0,10	-	77,50
Ck2	90 - 120	7,35	7,15	-0,20	99,41	0,54	0,04	0,18	100,17	0,00	0,00	100,17	100,17	100,00	0,00	0,44	1,70	-	66,00

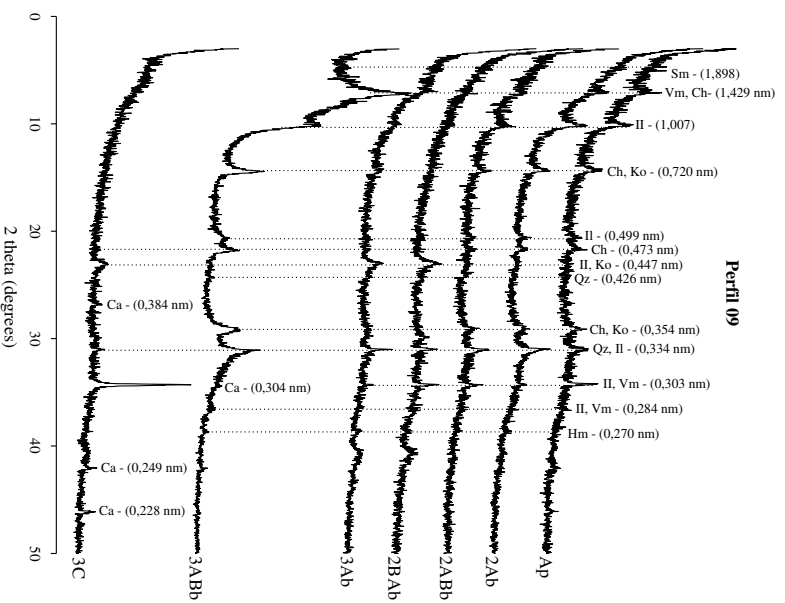
Apêndice B



Difração de raios-X da fração argila (Ko = caulinita; Ch = clorita; II = illita; Fd = Feldspato; Pg=Plagioclasa; Qz = quartzo; Hm=hematita; Vm=vermiculite; Ca=Calcita)



Difração de raios-X da fração argila (Ko = caulinita; Ch = clorita; Il = illita; Fd = feldespato; Pg=Plagioclase; Qz = quartzo; Hm=hematita; Sm=Esmeclita; Vm=vermiculite; Ca=Calcita)



Difração de raios-X da fração argila (Ko = caulinita; Ch = clorita; Il = illita; Qz = quartzo;  
Hm=hematita; Sm=Esmectita; Vm=vermiculite; Ca=Calcita)

## **CAPÍTULO III**

### **SOLOS DO VALE SAGRADO DOS INCAS, CUZCO**

## RESUMO

O Vale Sagrado dos Incas, apresenta uma agricultura bastante antiga, que vem sendo desenvolvida desde a Ocupação Inca no vale, com sistemas de terraços construídas paralelo ao vale do rio Urubamba. Ao longo do tempo os sistemas tradicionais do solo sofreram diversas mudanças que afetaram grandemente as características dos solos e paisagem, além de limitar ao aumento da disponibilidade de fósforo e carbono orgânico. O objetivo do presente trabalho foi investigar os solos do Vale Sagrado e os efeitos da atividade antrópica nas propriedades físicas, químicas e mineralógicas de 5 perfis dos solos. Dos 5 perfis em estudo, 4 são considerados antrópicos, restante, solo que não apresenta influência antrópica marcante. Os horizontes antrópicos variam de 20 a 100 cm de espessura, observando-se horizontes enterrados baixos em carbono orgânico e fósforo em relação aos horizontes antrópicos. Estes solos variam de ligeiramente ácido a ligeiramente alcalino, com saturação de bases acima de 50% em todos os horizontes. Os altos valores de fósforo encontradas nos solos antrópicos indica as diferentes práticas de manejo que estes solos sofreram ao longo de tempo, principalmente no P02 e P04. A agricultura moderna que atualmente vem sendo desenvolvida, vem aumentando os níveis de fósforo, mas os níveis de carbono orgânicos são bem mais baixos. A mineralogia da fração argila dos solos em geral, esta composta principalmente por filosilicatos 2:1. As análises de FRX, indicam descontinuidades litológicas principalmente no P02 e P04.

**Palavras-chave:** Anthrosols. Agricultura antiga. Fósforo do solo. Mineralogia. Inca.

## ABSTRACT

The Sacred Valley of the Incas presents a very old agriculture, which has been developed since the Inca Occupation in the valley, with terrace systems built parallel to the Urubamba river valley. Over time the traditional soil systems have undergone several changes that have greatly affected the characteristics of the soils and landscape, as well as limiting the increase in phosphorus and organic carbon availability. The objective of the present work was to investigate the soils of the Sacred Valley and the effects of anthropogenic activity on the physical, chemical and mineralogical properties of 5 soil profiles. Of the 5 profiles under study, are considered anthropic, and one does not present marked anthropic influence. The anthropic horizons vary from 20 to 100 cm thick, observing buried horizons low in organic carbon and phosphorus in relation to the anthropic horizons. These soils range from slightly acidic to slightly alkaline, with base saturation above 50% in all horizons. The high values of phosphorus found in the anthropic soils indicate the different management practices that these soils have suffered over time, especially in P02 and P04. Modern agriculture which is currently being developed has increased the levels of phosphorus, but the levels of organic carbon are much lower. The mineralogy of the clay fraction of the soils, in general, is composed mainly of phyllosilicates 2:1. XRF analyses indicate lithological discontinuities mainly in P02 and P04.

**Keywords:** Anthrosols. Ancient agriculture. Soil phosphorus. Mineralogy. Inka.

## 1. Introdução

O Vale Sagrado dos Incas, é considerado um dos vales mais importantes dos Andes Peruanos, caracterizado por apresentar solos férteis, além de um clima favorável para a agricultura. Nos seus inícios, o Vale, era ocupado por diferentes grupos étnicos até a chegada dos Incas (GADE, 1975; GADE, 2016). No entanto, com a consolidação do Império, inumeráveis terraços agrícolas foram construídos (ELORRIETA, E.F. & ELORRIETA, E.E., 2009), modificando a paisagem e características dos solos, produzindo alimentos de maneira intensiva, principalmente milho, para sustentar ao vasto império Inca.

Estes terraços foram cultivados pelos Incas de maneira extensiva durante seu império, a chegada dos espanhóis em 1532 marca um período de mudanças laborais, do uso da terra e da socioeconômica local (KOSIBA & HUNTER, 2017). A colonização do Império, implicou uma diminuição considerável da população Inca (COOK, 2000; KLAREN, 2000; TORRES, 2016), ocasionando o abandono de muitas áreas terraceadas, e conseqüentemente uma diminuição de mão de obra disponível para a sua manutenção. Recentemente houve esforços de restauração dessa tecnologia ancestral (GOODMAN-ELGAR, 2008).

O Vale Sagrado representa um impacto antrópico profundo (GADE, 1975), com uma grandíssima importância cultural, agrícola e turística, mas os estudos pedológicos nesta área são inexistentes, apesar dos inumeráveis sistemas de terraços agrícolas encontrados nos andes peruanos. Estima-se que meio a um milhão de hectares de campos cultivados sob esse sistema de terraços existiram (MASON, 1980; DENEVAN, 2005), representando verdadeiros solos antrópicos, com coloração escura e presença de artefatos arqueológicos e carvão (GOODMAN-ELGAR, 2008; BAUER; FONSECA & ARAÓZ, 2015; KEMP et al., 2006; NANAVATI et al., 2016; SANDOR & EASH, 1995) com elevados teores de fósforo disponível (BRANCH et al., 2007; DICK; SANDOR & EASH., 1994; SANDOR & EASH, 1995).

Na atualidade, a agricultura no Vale, vem sendo intensificada, com uma grande variedade de cultivos. A agricultura de subsistência tradicional, vem sendo substituída por uma economia de trabalho e produção agrícola orientada para mercado (GADE, 2016; INBAR & LLERENA, 2000). Por outro lado, com o progressivo aumento da população (KRUGGELER, 1998; OIM, 2015; GADE, 2016) como resultado da atividade turística e comercial, muitas dessas áreas vem sofrendo um processo de intensar urbanização, afetando as áreas agriculturáveis.

De modo geral, de acordo à publicação mais recentes no Atlas de solos de latino-américa e o Caribe (GARDI et al., 2014) o Vale sagrado encontra-se associado a Regosols. No entanto, pela intensa atividade antrópica há mais de 500 anos, e a um nível mais detalhado, estes solos são reconhecidos a nível categórico de ordem Anthrosols (IUUS WORKING GROUP WRB, 2015).

O objetivo deste estudo, foi investigar os solos em terraços agrícolas antigos e os efeitos da atividade antrópicas nas propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos

## 2. Materiais e Metodos

### 2.1. Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) compreende parte do Vale Sagrado dos Incas, localizado num vale interandino entre a zona intermedia Altiplano-Cordilheira Oriental, na Província de Urubamba a 15 km ao nordeste da cidade de Cusco. Esta região é amplamente dominada pela atividade agrícola até a atualidade, com extensos terraços agrícolas desenvolvidas durante o Império Inca (1430-1532).

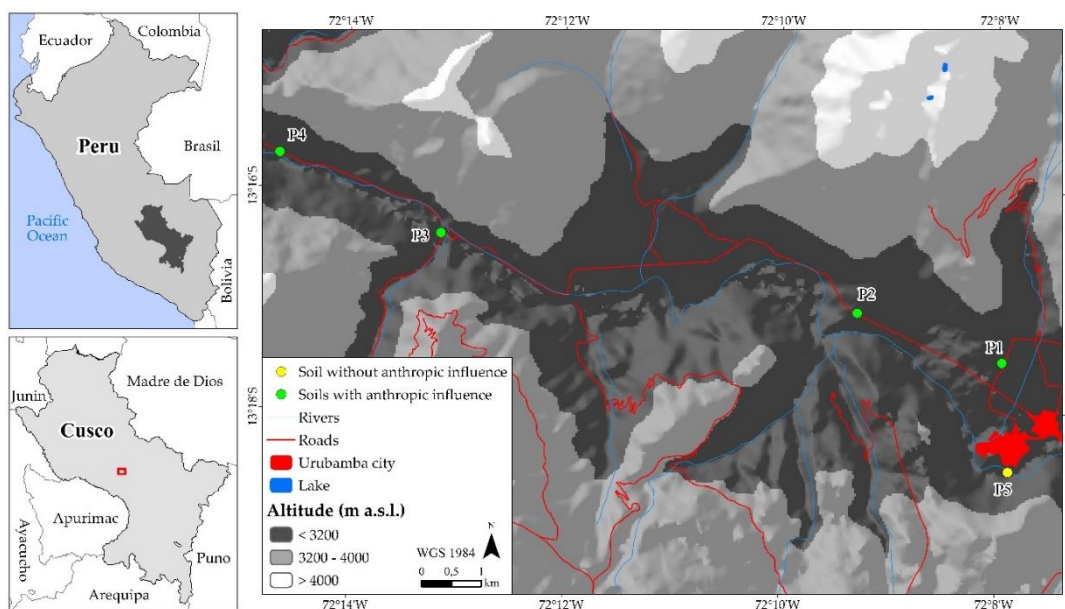


Figura 1. Área de estudo

De acordo a Gade (1975; 2016) a área de estudo encontra-se numa seção mesotérmica, localizada entre os 2400 a 3200 m.a.s.l, com períodos mais quentes entre outubro e novembro

quando a temperatura sobe para 22 °C. O clima é temperado, com outono e inverno seco (SENAMHI, 2020), regime de umidade variando de úmido a sub úmido (INRENA, 2005), com uma precipitação pluvial variando de 200 a 500 mm, com temperatura média anual de 12 a 14 °C. Os meses de maior precipitação são e dezembro a março, com período seco nos meses de maio a julho (IMA, 2009). Ao longo da história, o regime da precipitação variou muito durante os últimos séculos, como indica os registros climáticos na bacia de Marcacocha, localizado a 12 km de Ollantaytambo.

Períodos secos foram registrados em torno de 900BC, 500BC, 100AD e 550 AD, com longos períodos secos de 900 a 1800 AD (CHEPSTOW-LUSTY et al., 2003). Estudos realizados por (SUBLETTE MOSBLECH et al., 2012) na lagoa Huaypo, a 20 km de Cuzco, indicam condições climáticas mais úmidas ao redor de 650-750 AD. Períodos mais úmidos também foram registradas nos estudos por (THOMPSON et al., 1986) no mando de gelo de Quelccaya, nos períodos 610-650, 760-1040, 1500-1720 e 1970-1984 AD.

A geologia da área de estudo, está composta principalmente de uma série de depósitos aluviais e fluviais, encontrando-se também depósitos coluviais (Figura 2). O P01 e P02, encontra-se localizada em depósitos aluviais, que foram transportados das partes altas das montanhas que correspondem à Cordilheira de Urubamba (Figura 2). Por outro lado, o P03 corresponde a á um deposito aluvial, enquanto o P05 originado a partir de materiais coluviais. Tanto o P03 e P05 são originados a partir do transporte de materiais da Altiplanicie de Cusco (Figura 2), ricos em Calcário. Respeito ao P04, este é originado a partir de materiais fluviais, também ricos em calcário.

## 2.2. Amostragem e classificação

Cinco perfis de solos foram selecionados, dos quais 4 foram selecionadas em áreas com evidência de ocupação humana antiga. Os horizontes foram descritos e coletadas seguindo os procedimentos da Soil Survey Staff (2017) e classificados de acordo a WRB/FAO (IUUS WORKING GROUP WRB, 2015). As cores úmidas foram obtidas de acordo com a caderneta de Munsell (Munsell Color 2012).

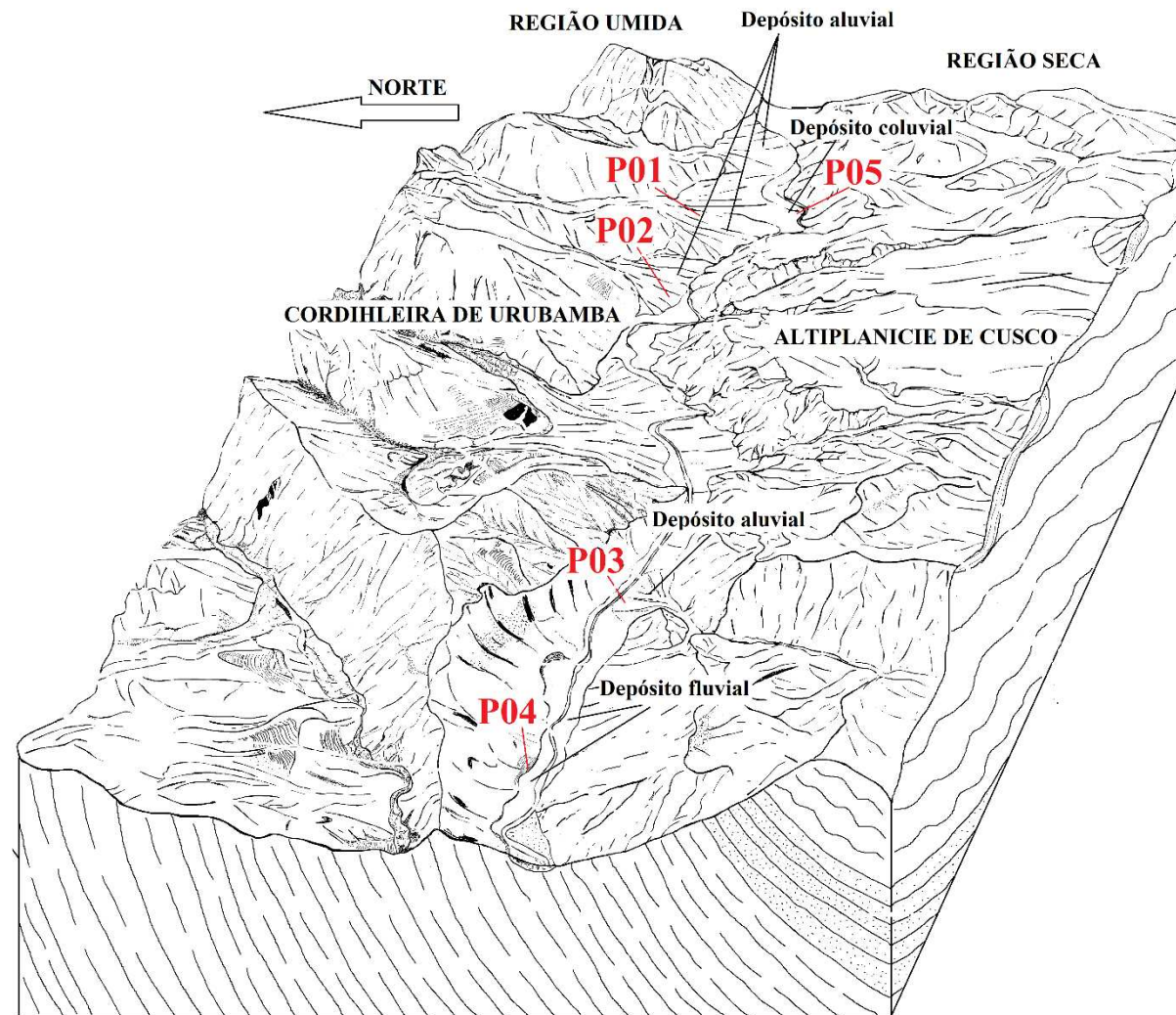


Figura 2. Bloco diagrama representando o relevo da área de estudo (Desenho: Lama, D.)

### 2.3. Análises físicas e químicas

Realizou-se análises granulométricas pelo método da pipeta adaptado por (RUIZ, 2005). Determinou-se o pH em água e em solução de KCl 1,0 mol.L<sup>-1</sup>, em suspensão solo/solução 1:2,5 devidamente calibrado com soluções padrão de pH 4,0 e 7,0. Quantificou-se Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>, via extração com KCl 1,0 mol.L<sup>-1</sup>, sendo o Ca e Mg por espectrometria de absorção atômica e o Al por titulação com solução de NaOH 0,025 mol.L<sup>-1</sup>. Extraiu-se Na, K e P disponíveis com Mehlich-1 (HCL 0,05 mol.L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol.L<sup>-1</sup>), onde o Na e K foram determinados por fotometria de chama e o P por colorimetria utilizando ácido ascórbico como redutor (EMBRAPA, 2017). Determinou-se carbono orgânico (CO) conforme a (WALKLEY e BLACK, 1934). Quantificou-se a fosforo adsorvido a partir do fosforo remanescente (P-rem) após agitação durante 1 h da TFSA com solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol.L<sup>-1</sup>, contendo 60 mg.L<sup>-1</sup> de P, na relação 1:10 (Alvarez et al., 2000). Com base nos resultados obtidos, foram calculados: Soma de bases (SB = Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup>); Capacidade de troca de cátions (T = S + Al + H); saturação por bases (V % = 100 S/T); saturação por alumínio (m % = 100 x Al<sup>3+</sup>/(S + Al<sup>3+</sup>)). O teor de fósforo total (P<sub>T</sub>) foi determinado de acordo a (BOWMAN, 1988).

Para a obtenção dos teores totais de Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Si, Ti, P, S, Zn, Cu, Co e Mn, foi pesado, aproximadamente, 1 g da fração areia do solo, em seguida, essas amostras foram trituradas e passadas em peneira de 200 mesh para, então, serem confeccionadas pastilhas de 2mm de altura utilizando prensa hidráulica ajustada a uma pressão de 3 t cm<sup>-2</sup> por 2 min. Essas pastilhas foram levadas para análise química semi-quantitativa (método dos parâmetros fundamentais) no espectrômetro de Microfluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (μ-FRXED) modelo Shimadzu 1300.

### 2.4. Análises mineralógicas

Realizou-se análises mineralógicas com uso de técnicas de difração de raios X (DRX) (EMBRAPA, 2017). Previamente removeu-se a matéria orgânica com uso de hipocloreto de sódio 10% (p/v) a pH 9,5 (ANDERSON, 1961). Montou-se lâminas orientadas de argila natural (método do esfregaço). Realizou-se tratamentos na fração argila: remoção de óxidos de Fe e Al com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (Mehra & Jackson, 1958) saturação com 1 mol.L<sup>-1</sup> MgCl<sub>2</sub>; solvatação com glicerol; saturação com 1 mol.L<sup>-1</sup> de KCl sob diferentes temperaturas (25 e 350 °C). As amostras foram submetidas a análise por difratometria de raios X (DRX) no

aparelho Panalytical X'Pert PRO (radiação de Co  $\alpha$ ) com configuração de 4° a 70° 2 $\Theta$ , a uma velocidade de varredura de 1° 2 $\Theta$  min<sup>-1</sup>, com um potencial gerador de 40kV e um gerador de corrente de 40 mA. Os difratogramas foram interpretadas pelo uso das tabelas de (CHEN, 1977).

### 3. Resultados

#### 3.1. Solos com influência antrópica

Estes pedons foram escavadas em áreas influenciadas grandemente pela agricultura, com níveis altos em fósforo, evidenciando atividade antrópica. Os pedons P01 e P03 foram classificados como Regosols com características antrópicas. Os pedons P02 e P04 foram classificados como Anthrosols de acordo a IUUS Working Group WRB (2015). A mineralogia dominante na fração argila está composta por filosilicatos 2:1 (Figura 3). Em geral, os seguintes critérios de horizonte Terrico são cumpridos: (i) cor relacionado ao material de origem, (ii) %V  $\geq$  50, (iv) aparece em superfícies localmente levantadas e (v) espessura  $\geq$  20 cm.

De modo geral a textura varia de franco arenoso a franco argiloso. Os valores de pH (H<sub>2</sub>O) mais altos do que o pH (KCl), o que implica na formação de cargas líquidas negativas, como se infere nos resultados dos valores negativos de  $\Delta$ pH (Tabela 3). O pH do solo varia de ligeiramente ácido a ligeiramente alcalino, com %V  $\geq$  50% em todos os horizontes, observando-se a presença de carbonatos pela reação com HCl (10%), principalmente no P03 e P04. O Ca<sup>2+</sup> é o cátion dominante no complexo de troca. Valores mais altos de CO e P foram observados nos horizontes superficiais do solo (Tabela 3).

O pedon P01, foi classificado como “Anthropic” Eutric Regosols (Loamic), descrito num depósito aluvial a 2918 m.s.l.s (Figura 2). O solo é bem drenado, com evidências de erosão ligeira, pedregosa e moderadamente rochosa em superfície, de relevo ondulado (8-20%). Na área ocorre a presença de cultivos agrícolas, principalmente milho. A textura do solo é franco arenosa, com horizonte A de estrutura granular, de tamanho pequeno a médio, fraco, muito friável. A coloração varia de bruno muito escuro a bruno escuro (7.5YR 2.5/2 a 7.5YR 3/2). As raízes variam de muitas a comuns, com canais biológicos (Tabela 2). Os valores de pH variam 6.43 a 6.64 (Tabela 3) indicando ligeira acidez em superfície a neutro em profundidade, sem evidências de carbonato, corroborado pela não reação com HCl (10%). Os valores de Ca<sup>2+</sup>, CO e P foram mais altos no horizonte A, respeito a saturação por bases foi maior em profundidade (Tabela 3).

O pedon P02, foi classificado como Pantoterric Anthrosols (Pantoeutric, Pantoloamic, Escalic), descrito sobre uma superfície levantada (Broad-field Terraces) a 2871 m.s.l.s. O horizonte antrópico atinge até uma profundidade de 80 cm, apresenta textura de franco argilo arenosa, com estrutura granular a bloco subangular, pequeno a grande, fraco, muito friável em úmido. A coloração é bruno (7.5YR 4/2 a 7.5YR 4/3), sendo mais escuro em superfície. As raízes variam de abundantes a muitas, com canais de minhocas e formigas abundantes (Tabela 2). Os valores de pH variam de 6.10 a 6.76, sem evidências de carbonatos, corroborado pela não reação com HCl (10%). O  $\text{Ca}^{2+}$  é o cátion dominante, implicando em valores altos de SB. O %V varia de 71,80 a 88,40%, sendo mais alto em superfície, mesmo comportamento foi observado no CO e P (Tabela 3).

O horizonte antrópico encontra-se assentado sobre sedimentos aluviais bastante seixoso (Regosol), de textura franco argilo arenosa de coloração bruno avermelhado (5YR 5/3), sem desenvolvimento de estrutura (Tabela 2). Os valores de pH em  $\text{H}_2\text{O}$  indica ligeira acidez, sem evidência de carbonatos pelo HCl (10%). Os valores de  $\text{Ca}^{2+}$ , SB, CTC(t), CTC(T), CO e P foram menores em relação ao horizonte antrópico (Tabela 3).

O pedon P03, classificado como “Anthropic” Hypereutric Regosol (Loamic), descrito numa planície aluvial a 2818 m.s.l.s. O solo é moderadamente drenado, com evidência de erosão ligeira, moderadamente pedregosa e ligeiramente rochosa em superfície, de relevo plano (2%). Na área ocorre a presença de cultivos agrícolas, principalmente milho. A textura do solo varia de franco argiloso a franca, de coloração bruno avermelhado escuro (5YR 3/3), com presença de cascalho (10%) de grau subarredondada a bem arredondada. As raízes variam de muita a comuns, com evidência de minhocas (Tabela 2). Os valores altos de pH em  $\text{H}_2\text{O}$  sugerem a presença de carbonatos, corroborados pela reação com HCl (10%). O  $\text{Ca}^{2+}$  é cátion dominante, implicando em valores altos de SB e %V. Valores mais altos de CO e P foi observado no horizonte superficial (Tabela 3).

O perfil P04 foi classificado como Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic, Escalic, Endofluvic), descrito sobre uma superfície levantada (Broad-field Terraces) a 2807 m.s.l.s. O horizonte antrópico atinge até uma profundidade de 100 cm, de textura franca, estrutura granular a bloco subangular, de tamanho pequeno a grande, fraco, de consistência friável a firme. A coloração é mais escura nos horizontes superficiais variando de bruno a (7.5YR 4/3) a bruno avermelhado (2.5YR 5/4) com presença de cascalhos de 10% de grau subangular a arredondada. As raízes variam de comuns a poucas, com evidência de canais biológicos de minhocas (Tabela 2). Os valores altos de pH sugerem a presença de carbonatos,

observando-se reação com HCl (10%) no horizonte 2C. O  $\text{Ca}^{2+}$  é o cátion dominante, implicando em valores altos de SB trocáveis e %V de 98,5 a 100%, com valores mais altos de CTC(t), CTC(T), CO e  $P_d$  em superfície, diminuído em profundidade (Tabela 3).

O horizonte antrópico encontra-se assentado sobre um depósito fluvial (Fluvisols) de textura franco arenosa, bruno a bruno avermelhado (7.5YR 5/3 a 5YR 5/3), sem desenvolvimento de estrutura, muito seixoso, de grau arredondada a bem arredondada (Tabela 2). Foram evidenciadas raízes a nível de poucas. Os valores de pH em  $\text{H}_2\text{O}$  indica moderada alcalinidade (SOIL SURVEY STAFF, 2017), com presença de carbonatos observados pela reação com HCl (10%). Os valores de  $\text{Ca}^{2+}$ , SB, CTC(t), CTC(T), CO e  $P_d$ , foram menores em relação ao horizonte Antrópico (Tabela 3).

### 3.2. Solo sem influência antrópica

O pedon P05 localizado num depósito coluvial a 2853 m.s.l.s. foi classificado como Pantohypereutric Pantocolluvic Regosol (Pantoloamic, Ochric). O solo é bem drenado, com evidências de erosão de forte a muito forte, muito pedregosa e rochosa em superfície, com presença de carste com material de enxurrada ocasionais preenchendo fraturas de dissolução do calcário (superfície toda com lapiás) (Figura 4). A estrutura bloco subangular pequeno a médio, fraco, friável. O horizonte CR apresenta rochas fragmentadas. A coloração varia de bruno avermelhado (2.5YR 5/3) no horizonte A a bruno avermelhado claro (2.5YR 6/4) no horizonte CR. As raízes variam de muitas a comum em profundidade, com registro de canais de minhocas no horizonte A. A textura do solo é franca siltosa em todo o perfil.

Em termos de propriedades químicas, o pH em água ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) foram mais altos do que o pH (KCl), indicando a predominância de cargas negativas. Mesmo assim, os valores tão elevados do pH sugerem a presença de carbonatos, reagindo com o HCl (10%). O  $\text{Ca}^{2+}$  é o cátion trocável dominante com valores de 33,85 a 97,08  $\text{cmolc.kg}^{-1}$ , implicando em valores altos de SB trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ ) e saturação por bases de 100%. Valores mais altos de CO e P foram mais altos em superfície, diminuindo em profundidade (Tabela 3).





Figura 4. Superfície com lapiás na rocha, encontrado ao redor do P01 na localidade de Urubamba.

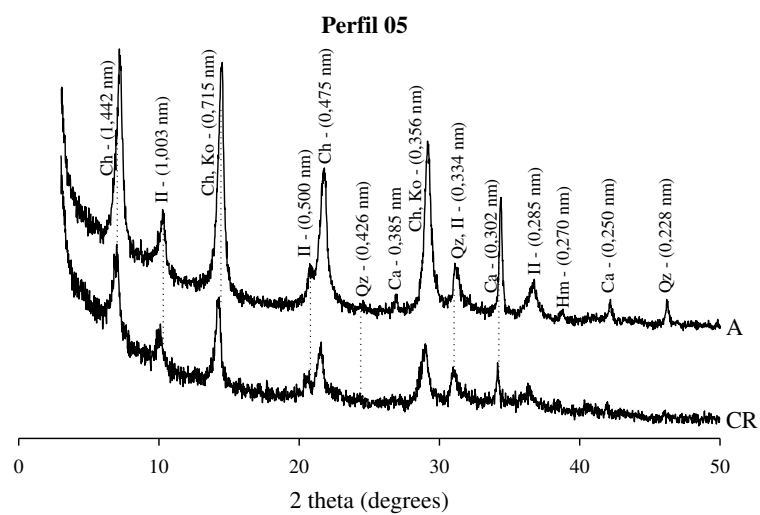


Figura 5. Difração de raios-X da fração argila (Ko = caulinita; Ch = clorita; II = illita; Fd = Feldspato; Pg=Plagioclase; Py=Phyrophyllite; Qz = quartzo; Hm=hematita; Vm=vermiculite; Ca=Calcita)

Tabela 1. Descrição geral dos pedons

Localidad	Perfil	Coordenadas	Altitude (m.s.l.s)	Classificação de solo (WRB, 2015)	Descrição
Solos com influência antrópica					
Maras	P01	13°17'32"S	2918	"Anthropic" Eutric Regosols (Loamic)	Solo descrito num depósito aluvial, bem drenado, ligeira erosão. Atualmente com presença de cultivos. A vegetação clímax é floresta úmida - Montano Subtropical, província de umidade úmido (INRENA, 1995). Horizonte antrópico (WRB) foi identificado
		72° 7'57"W			
Urubamba	P02	13°17'5"S	2871	Pantoterric Anthrosols (Pantoeutric, Pantoloamic, Escalic)	Solo descrito field terraces, num depósito aluvial, bem drenado, erosão moderada a forte. Atualmente com presença de cultivos, principalmente milho. A vegetação clímax é floresta úmida - Montano Subtropical, província de umidade úmido (INRENA, 1995). Horizonte Terrico (WRB) foi identificado
		72° 9'17"W			
Ollantaytambo	P03	13°16'24"S	2818	"Anthropic" Hypereutric Regosol (Loamic)	Solo descrito num depósito aluvial, moderadamente drenado, erosão forte. Atualmente com presença de cultivos. A vegetação clímax é floresta seca - Montano Baixo Subtropical, província de umidade sub úmido (INRENA, 1995). Horizonte antrópico (WRB) foi identificado
		72°13'9"W			
	P04	13°15'41"S	2807	Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric Pantoloamic, Escalic, Endofluvic)	Solo descrito no terraço agrícola tipo "Broad-field terraces" no footslope, bem drenado, erosão moderada. Atualmente com presença de cultura, principalmente milho. A vegetação climax é floresta úmida - Montano Subtropical, província de umidade úmido (INRENA, 1995). Horizonte Terric (WRB) foi identificado
		72°14'38"W			
Solos sem influencia antrópica					
Maras	P05	13°18'31"S	2853	Pantohypereutric Pantocolluvic Regosol (Pantoloamic, Ochric)	Solo descrito num depósito coluvial, bem drenado, com erosão forte a muito forte. A vegetação climax é de estepa Montano Subtropical (e-MS), província de umidade sub úmido (INRENA, 1995). Horizonte A Ochric foi identificado
		72° 7'53"W			

Tabela 2. Propriedades físicas e morfológicas dos solos em estudo

Horizonte	Profundidade (cm)	Boundary (distinctness, topography)	Color (seco)	Arena	Arena	Silte	Argila	Textura	Estrutura (grau, tamanho, tipo)	Consistência (seco, úmido)	Raízes (quantidade, tamanho)
				gruesa	fina						
Solos com influência antropica											
Perfil 01 - "Anthropic" Eutric Regosols (Loamic)											
A	0 - 25	C - S	7.5YR 5/3	47.3	23.0	15.9	13.7	SL	1, p m, gr	SO, SO	1, F, Vf
C	25 - 40+	-	7.5YR 4/2	59.0	17.9	13.3	9.9	SL	-	SO, SO	2, Vf
Perfil 02 - Pantoterric Anthrosols (Pantoeutric, Pantoloamic, Escalic)											
Ap	0 - 15	C - W	7.5YR 4/2	26.8	18.9	26.4	27.9	SCL	2, p m, sbk gr	SHA, VFR	1, Vf
AC	15 - 40	C - W	7.5YR 4/3	32.3	17.5	25.5	24.7	SCL	2, m, sbk	SO, VFR	2, Vf
2C	40 - 80	C - W	7.5YR 4/3	38.4	18.8	19.1	23.7	SCL	1, m, sbk	SO, VFR	3, Vf
3C	80 - 180	-	5YR 5/3	45.6	15.5	15.1	23.8	SCL	-	-	Ausente
Perfil 03 - "Anthropic" Hypereutric Regosol (Loamic)											
Ap	0 - 20	G - W	5YR 4/3	20.7	12.4	32.2	34.8	CL	1, p, gr	SO, FR	1, F, Vf
AC	20 - 30+	-	5YR 4/3	25.5	17.1	30.4	26.9	L	1, m g, sbk	SHA, FR	2, Vf
Perfil 04 - Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic, Escalic, Endofluvic)											
Ap	0 - 15	C - W	7.5YR 4/3	11.2	31.0	34.8	23.0	L	1, p, gr	SHA, FR	2, Vf
A2	15 - 55	C - W	7.5YR 4/3	11.6	25.2	38.5	24.7	L	1, m g, abk sbk	SO, VFR	2, Vf
2C	55 - 100	C - W	5YR 6/4	14.3	37.1	32.8	15.8	L	1, m g, abk sbk	SHA, FI	1, Vf
3C2	100 - 165	A - W	7.5YR 5/3	3.0	57.2	33.9	5.9	SL	0, -, gs	SO, SO	3, Vf
3C3	165 - 200+	-	7.5YR 5/3	5.1	65.4	24.0	5.4	SL	0, -, gs	SO, SO	3, Vf
Solo sem influência antropica											
Perfil 05 - Pantohypereutric Pantocolluvic Regosol (Pantoloamic, Ochric)											
A	0 - 25	C - W	2.5YR 3/3	9.8	13.1	72.5	4.6	SiL	1, p m, sbk	SHA, VFR	1, F, Vf
C/R	25 +	-	2.5YR 6/4	18.5	11.9	56.7	13.0	SiL	-	LO, LO	2, Vf

Distinção: A = abrupto, C = Claro, D = Difuso, G = gradual. Topografia: B = quebrada S = Suave, W = Ondulado. Estrutura: Grau: 0 = sem estrutura, 1 = fraco, 2 = moderada, 3 = forte. Tamanho: co = grosso, f = fina, m = média. Tpo: abk = bloco angular, gr = granular, m = massivo, pr = prismático, sbk = bloco subangular, sg = grão simples. Consistência: Seco: EH = Extremadamente duro, H = duro, L = suave, S = macia, SH = ligeiramente duro. Úmido: EF = extremadamente firme, FI = firme, FR = friável, L = solto, SH = ligeiramente duro. Molhado: s = pegajoso, so = não pegajoso, ss = ligeiramente pegajoso, p = plástico, po = no plástico, ps = ligeiramente plástico, vp = muy plástico, vs = muy pegajoso. Cementação: NC = no-cementado. Raízes e poros: 1 = abundante, 2 = comuns, 3 = poucas, co = grossa, f = fina, m = média, vf = muy fina. Artifacts: Roundness: AN = angular, VA = muy angular. Shape: E = alongada, I = irregular.

Tabela 3. Características químicas dos pedons estudados

Horiz.	Depth	pH		$\Delta$ pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	SB	H+Al	CTC	CTC	V	CO	P <sub>M</sub>	P Total	P <sup>a</sup>
		H <sub>2</sub> O	KCl														
cm														mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	%	
<b>Solo com influência antrópica</b>																	
<b>P01 - Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)</b>																	
A	0 - 25	6,43	5,85	-0,58	6,62	1,43	1,13	0,10	9,28	2,60	9,28	11,88	78,10	2,02	255,00	565,56	28,50
C1	25 - 40 +	6,64	5,41	-1,23	3,70	0,73	0,12	0,07	4,62	0,80	4,62	5,42	85,20	0,81	30,50	292,80	24,50
<b>P02 - Pantoterric Anthrosols (Eutric, Pantoloamic, Endofluvic)</b>																	
Ap	0 - 15	6,76	6,16	-0,60	11,81	4,23	0,47	0,20	16,71	2,20	16,71	18,91	88,40	4,78	164,10	1497,65	46,33
AC	15 - 40	6,33	5,24	-1,09	8,51	3,03	0,14	0,13	11,81	4,20	11,81	16,01	73,80	2,58	64,20	1017,153	44,33
2C	40 - 80	6,10	4,67	-1,43	7,20	1,48	0,09	0,13	8,90	3,50	8,90	12,40	71,80	1,10	56,80	781,731	49,00
3C	80 - 150	6,31	4,99	-1,32	5,78	1,14	0,09	0,14	7,15	1,80	7,15	8,95	79,90	0,74	145,90	473,39	48,17
<b>P03 - Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic)</b>																	
Ap	0 - 20	7,63	7,01	-0,62	17,02	1,50	0,77	0,26	19,55	0,00	19,55	19,55	100,00	2,76	53,60	894,40	45,33
AC	20 - 30+	7,93	7,05	-0,88	16,98	1,60	0,22	0,36	19,15	0,00	19,15	19,15	100,00	1,47	47,20	850,83	50,67
<b>P04 - Pantoterric Anthrosols (Pantohypereutric, Pantoloamic, Pantoescalic, Endofuvic)</b>																	
Ap	0 - 15	7,46	6,76	-0,70	9,88	1,91	1,28	0,14	13,21	0,20	13,21	13,41	98,50	3,86	138,70	882,82	37,33
A2	15 - 55	7,93	7,60	-0,33	8,22	1,76	1,69	0,27	11,94	0,00	11,94	11,94	100,00	1,47	117,30	905,87	49,00
2C	55 - 100	7,69	7,40	-0,29	9,11	1,93	0,07	0,51	11,62	0,00	11,62	11,62	100,00	0,37	3,80	817,69	42,67
3C2	100 - 165	7,96	7,50	-0,46	5,58	1,05	0,07	1,04	7,74	0,00	7,74	7,74	100,00	0,08	33,90	-	40,33
3C3	165 - 200+	7,90	7,69	-0,21	4,87	2,04	0,12	1,57	8,60	0,00	8,60	8,60	100,00	0,37	37,50	-	34,00
<b>Solo sem influência antrópica</b>																	
<b>P05 - Pantohypereutric Pantocolluvic Regosol (Pantoloamic, Ochric)</b>																	
A	0 - 25	7,47	7,39	-0,08	33,85	0,78	0,09	0,10	34,82	0,00	34,82	34,82	100,00	2,39	4,60	470,25	63,33
CR	25 -	7,60	7,35	-0,25	97,08	0,53	0,08	0,10	97,79	0,00	97,79	97,79	100,00	0,81	9,30	378,40	51,00

#### 4. Discussão

##### 4.1. Influência da atividade antrópica na paisagem e propriedades dos solos

O Vale Sagrado dos Incas, constituído por uma série de depósitos aluviais e fluviais, apresenta solos com bastante atividade antrópica, principalmente agricultura. Nestas áreas foi possível observar evidências de ocupação antrópica antiga, assim como a construção de terraços agrícolas tipo “Broad-field Terraces” (DENEVAN, 2005), encontradas no fundo do vale, modificando sua paisagem (Figura 6) e características do solo, como observado no P02 e P04 (Figura 7). Apesar que os terraços agrícolas têm sido interpretados por muitos cientistas como um meio de prevenção da erosão dos solos (FERRO-VÁZQUEZ et al., 2014; GOODMAN-ELGAR, 2008; INBAR & LLERENA, 2000; NANAVATI et al., 2016; SANDOR & EASH, 1995; TAROLLI et al., 2014), de acordo com (GADE, 2016), estes terraços agrícolas construídos pelos Incas tinham a finalidade de criar uma superfície plana em uma topografia bastante inclinada, necessário para fornecer uma distribuição uniforme das águas sobre a superfície do cultivo advindas das partes mais altas das montanhas.

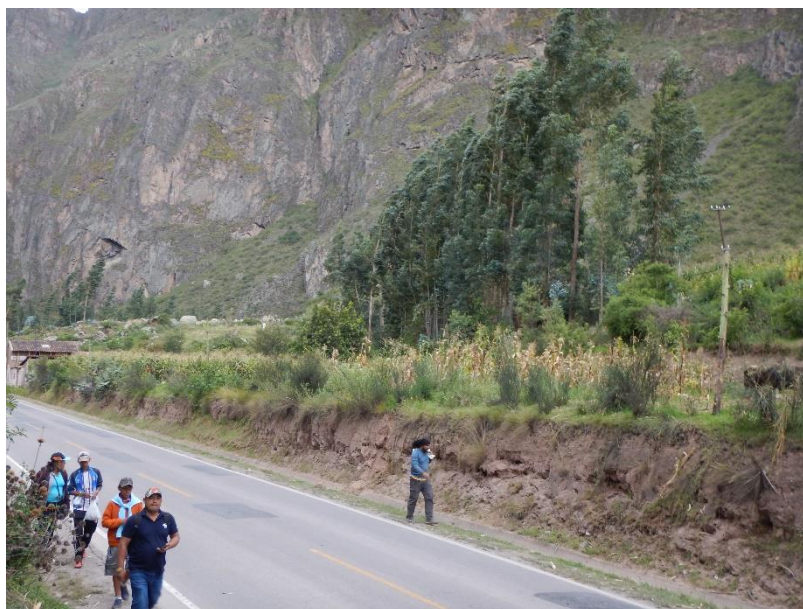


Figura 6. Terraços agrícola tipo “Broad -field Terraces” em Ollantaytambo

O aumento da espessura do horizonte superficial, horizonte antrópico, identificados nos solos em estudo variam de 20 a 100 cm (Tabela 1). Os horizontes antrópicos mais espessos foram encontrados no P02 e P04, variam de 80 a 100 cm (Figura 7). A textura desses horizontes

varia de franco a franco argilo-arenosa (Tabela 2), sem características de iluviação de argila como registrado nos terraços do vale Chicha-Soras (BRANCH et al., 2007; KEMP et al., 2006) na região de Ayacucho, no Perú. De modo geral, estes horizontes antrópicos encontram-se assentados sobre depósitos aluviais e fluviais (Regosols e Fluvisols) que existiram antes do terraceo, com ocorrência de uma forte descontinuidade litológica no P04, evidenciado pela granulometria, relações da fração areia (Tabela 1), FRX (Apêndice A), indicando a deposição deste horizonte antrópico sobre um perfil já existente.

Por outro lado, esse aumento da espessura do horizonte superficial originado pelo terraceo, poderia ser devido à abundância de materiais grosseiros observadas nos depósitos aluviais, transportadas das partes mais altas das cadeias montanhosas da Cordilheira Oriental (Figura 2), formando solos com  $\text{pH} < 7$  (Tabela 3). Outro argumento plausível, é a presença alta presença de carbonatos, produto da erosão e transporte de sedimentos advindas da Altiplanície (Figura 2) ricos em calcáreos (Capítulo 2) além de serem favorecidas pelo clima da região, que varia de subúmido a semiárido (INRENA, 1995) originando solos com  $\text{pH} > 7$ , com altíssima saturação por bases (Tabela 3). No caso do P04, observa-se claramente que o horizonte A antrópico, mostra diferente assembleia mineralógica em relação ao horizonte original (Figura 3) com alta presença de carbonatos, levando a sugerir que este terraço foi construído de um material diferente. Tais motivos então, levaram ao aumento da espessura do topsoil dos solos originais, com a finalidade de oferecer uma maior exploração das raízes das plantas e aumentar a sua produtividade agrícola.

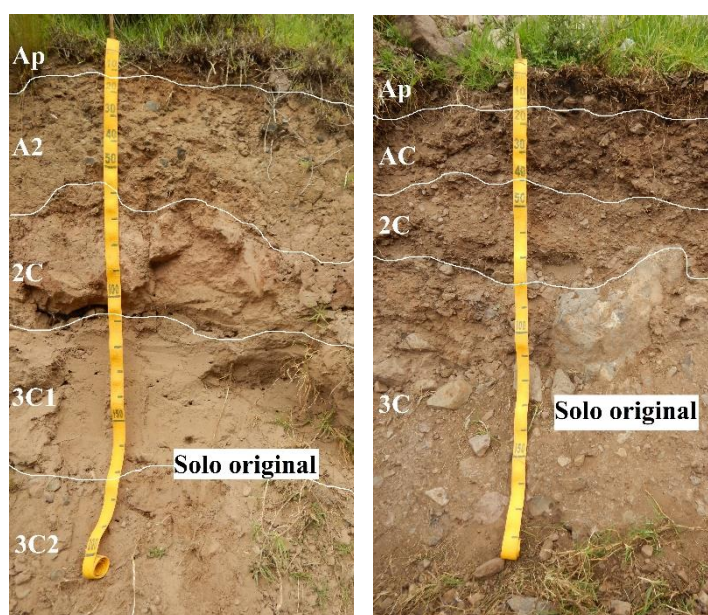


Figura 7. Terraços agrícola tipo “Broad -field Terraces”

#### 4.2. Influência da atividade antrópica no conteúdo de P e matéria orgânica do solo

Uma das características químicas mais relevantes dos terraços agrícolas em estudo, é o alto teor de fósforo (Tabela 3) comparado ao solo sem influência antrópica. Resultados similares foram reportados por vários autores (BRANCH et al., 2007; DICK; SANDOR & EASH, 1994; SANDOR & EASH, 1991, 1995) estudando terraços agrícolas no Peru. Estes valores de fósforo alto, provavelmente é devido ao prolongado período de cultivo desde a formação do Imperio Inca (1438 AD), com adição de esterco de lhama. Outras fontes de adubação usado pelos Incas durante seu vasto império de acordo a De La Vega (1609) na sua publicação “*Comentarios Reales de los Incas*” era o esterco humano, além do esterco dos pássaros (Guano de isla), embora, este último foi grande importância para a fertilização dos terraços, principalmente para a cultura de milho.

O guano de isla usado pelos incas, já era também usado pelas civilizações, mas antigas, há aproximadamente 2000 anos (LUMBRERAS, 1999; CORTÉZ E AUSEJO, 2012), devido a sua riqueza em fosfatos e nitratos (BROOKS; KENT & WILLETT, 2004; SZPAK et al., 2012) se comparado com ao esterco dos camelídeos (ALVAREZ; VILLCA; LIDÉN, 2006; ALVAREZ & LIDÉN, 2008, 2009), levando aos Incas, a usar esse fertilizante como de primeira qualidade (KUBLER, 1948; RODRIGUES & MICAEL, 2021). Porém, essa experiência ancestral sobre o grande potencial do guano, foi aproveitado pelos Incas durante o apogeu do Império, aumentando a fertilidade do solo do Vale, sobretudo os níveis de fósforo e carbono orgânico dos horizontes superficiais (Tabela 3). Sua importância era tão grande, que este fertilizante natural era extraído das ilhas de Chincha (KUBLER, 1948; KENDALL & RODRIGUEZ, 2009; RODRIGUES & MICAEL, 2021) localizada a 21 km da costa sudoeste do Peru, para logo ser transportadas nas costas das lhamas até Cusco (PEASE, 1992; GADE, 2016).

Valores altos de fósforo em superfície observados no P01 e P03, mostram valores baixos de carbono orgânico (Tabela 3), sugerindo o uso de fertilizantes inorgânicos (GOODMAN-ELGAR, 2008), porém, é muito provável que estes solos nunca foram fertilizados extensivamente com adubação orgânica. De acordo ao relato de um agricultor local da comunidade de Palccaraqui, indica que vem fazendo uso de fertilizantes acrescido de NPK mais matéria orgânica, isto com a finalidade de aumentar a produtividade das culturas, especialmente milho (*Zea mays*). Segundo Kendall e Rodriguez (2009), reportou que os agricultores de Ollantaytambo vem usando baixas quantidades de fertilizantes artificiais, dependendo da

quantidade do esterco a disposição, em contraste com as observações feitas por Nanavati et al. (2016) nos terraços do Viejo Sangayaico.

De modo geral, os teores de fósforo e carbono orgânico encontradas nos terraços agrícolas do Vale Sagrado, não são tão altos como encontradas em alguns terraços localizadas nas partes altas de Cusco (Capítulo 2), sugerindo que estes terraços agrícolas não receberam uma adubação extensiva por longo tempo, apesar da instauração do Império Inca há 600 anos aproximadamente. Isto pode ser justificado pelo declínio da população Inca, devido a introdução de novas doenças trazidas pelos europeus durante a conquista (KLARÉN, 2012) que afetaram grandemente durante o início do período da colonização (COOK, 2000; GADE, 2016) seguido da destruição da estrutura social no mesmo período (MASON, 1968; RUBIO, 1988; DENEVAN, 2005; KLARÉN, 2012), levando ao abandono de muitos terraços agrícolas. De acordo a alguns trabalhos, a população Inca no Cuzco, antes da conquista era entre 200-300 mil habitantes (GASPARINI & MARGOLIES, 1980; FARRINGTON, 2013; VALCÁRCEL, 2015) declinando a 32 mil habitantes durante o período colonial (KRUGGELER, 1998).

4.3. Que aspectos limitaram ao aumento do conteúdo de fósforo disponível e matéria orgânica?

Antes da conquista espanhola, a economia Inca era baseado na agricultura, onde o arado do solo era feito de forma manual, utilizando a *chaquitacla* (MASON, 1968; GADE & RIOS, 1972; GADE, 1975; NANAVATI et al., 2016) com aplicação de esterco de lhama e guano de isla, ano após ano, principalmente para milho (*Zea mays*) associado a quinoa (*Chenopodium quinoa*), sem técnicas de rotação de culturas, nem descanso (DE LA VEGA, 1609; GADE, 2016). Com a conquista do Império, pelos espanhóis em 1533, deu-se início a colonização tomando as terras do Vale Sagrado em possessão, expropriando as terras da população, outorgando-se as *encomendas* (controle do povo conquistado) (PRESCOTT, 1862; KLARÉN, 2012; GADE, 2016; COVEY, 2020), induzindo a uma forma de economia do tipo mercantilista (GLAVE, 2020), ou seja, baseado na mineração e agricultura (RUBIO, 1988; KLARÉN, 2012). No entanto, a agricultura nunca chegou atingir aos níveis de produção dos Incas, pois a mão de obra disponível das *encomendas* era transferida para a mineração (GLAVE, 2020; KENDALL & RODRIGUEZ, 2009), levando aos sistemas de terraços ao abandono, ainda encontradas em algumas áreas do vale (Figura 8).



Figura 8. Terraços agrícola Inca tipo “Broad -Terraces”, com abandono nas posições mais altas, em Ollantaytambo

Com a colonização, houve uma grande mudança das técnicas tradicionais da agricultura introduzindo novas variedades de plantas e animais. Praticamente foi adotado a técnica da tração animal pelo gado bovino, que em conjunto com o esterco, contribuíram para a manutenção da fertilidade do solo (MASON, 1968; DENEVAN, 2005; KENDALL & RODRIGUEZ, 2009) usados nos terraços de plataforma mais ampla (Figura 5) e fundo de vale (Figura 9b). Por outro lado, com a pecuária extensiva, os danos às estruturas dos sistemas de terraços aumentaram, ocasionando efeitos devastadores para a agricultura tradicional. (KLARÉN, 2012). No mesmo período, muitas terras agrícolas do Vale foram abandonadas devido ao declínio drástico da população por diversos fatores (KLARÉN, 2012; TORRES, 2016), as terras abandonadas passaram a formar parte das colônias espanholas, ou seja, uma propriedade privada retratando a consolidação das *haciendas* (GLAVE, 2020). Embora, o uso das terras se intensificou, mesmo assim, as infraestruturas do Vale nunca foram melhoradas (GADE, 2016).

Atualmente, o vale é intensamente cultivado, principalmente com milho (Figura 9), com o uso de maquinarias agrícolas para o preparo do solo e manutenção dos canais de irrigação (Foto 9a), embora, a tração animal ainda é usada em algumas áreas do vale (GADE, 1975). Como como já mencionado anteriormente, vem-se usando os fertilizantes químicos em conjunto com o guano de corral, sem rotação de cultura, além de uso de pesticidas (PDRC, 2013).

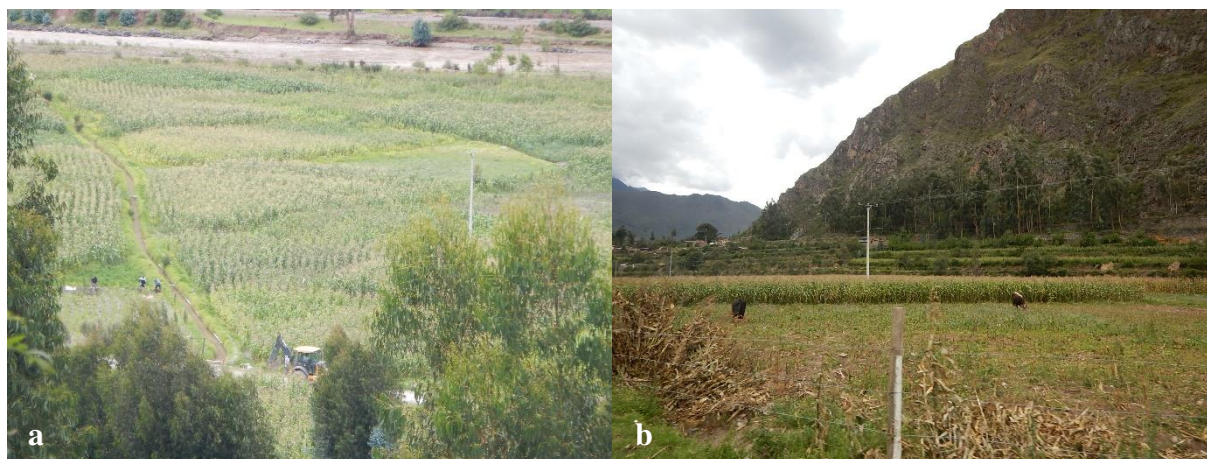


Figura 9 - Cultivo de milho (*Zea mays*) e animais bovinos usados para o arado do solo, na planície fluvial do Vale, em Ollantaytambo.

Por outro lado, nos inícios do século XX, o descobrimento de Machupicchu, em 1911, coincide com o aumento da população em Cusco (Kruggeler, 1988), muitas pessoas das áreas rurais começaram migrar para às capitais dos distritos que compreende o Vale Sagrado, devido as oportunidades econômicas ligadas ao turismo (Gade, 2016). Esta migração, ocasionou o abandono das terras agricultáveis, principalmente terraços, e a conseqüente expansão das áreas urbanas.

## 5. Conclusão

A influência antrópica prolongada em solos do Vale Sagrado, desde a ocupação Inca, alterou grandemente as propriedades físicas e químicas dos solos naturais. Essas alterações resultam principalmente na técnica de construção de terraços associadas a diferentes práticas de manejo do solo, tais como a aplicação de adubos orgânicos e fontes enriquecidas com fósforo.

Os terraços agrícolas, causaram extensa modificação da paisagem, além propriedades físicas, químicas e mineralógicas, tais como o aumento da espessura do *Top Soil*, alteração da estrutura do solo, porosidade e valores altos de P. Valores altos de fósforo e baixo em carbono orgânico foram encontrados em alguns terraços, relacionados ao uso de fertilizantes químicos dos solos.

O aumento de P e carbono orgânico solos não foi tão expressivo, devido a chegada dos espanhóis, ocasionando mudanças das práticas tradicionais, poses da terra e o abandono de muitas áreas terraceadas.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Este trabalho é a contribuição do Instituto de Ciência e Tecnologia da Criosfera - grupo TERRANTAR.

## Referências bibliográficas

ALVAREZ, V.V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fosforo remanescente. **B. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo.** 52:27-32, 2000.

ALVAREZ, R.; VILLCA, S.; LIDÉN, G. Biogas production from llama and cow manure at high altitude. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 1, p. 66–75, 2006.

ALVAREZ, R.; LIDÉN, G. Anaerobic co-digestion of aquatic flora and quinoa with manures from Bolivian Altiplano. **Waste Management**, v. 28, n. 10, p. 1933-1940, 2008.

ALVAREZ, R.; LIDÉN, G. Low temperature anaerobic digestion of mixtures of llama, cow and sheep manure for improved methane production. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 527–533, 2009.

ANDERSON, J.U. An Improved Pretreatment for Mineralogical analysis of Samples Containing Organic Matter. **Clays Clay Miner.** 10, 380–388, 1961.

BAUTISTA, L.J. 2000. Reinvestigando Ñawinpukyo: Nuevos aportes al estudio de la cultura Huarpa y del Periodo Intermedio Temprano em el Valle de Ayacucho. **Boletín de Arqueologia PUCP.** 4:631-640

BOWMAN, R.A. A Rapid Method to Determine Total Phosphorus in Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 5, p. 1301–1304, 1988.

BRANCH, N.P.; KEMP, R.A.; SILVA, B.; MEDDENS, F.M.; WILLIAMS, A.; KENDALL, A., VIVANCO, C.P. Testing the sustainability and sensitivity to climatic change of terrace agricultural systems in the Peruvian Andes: a pilot study. **Journal of Archaeological Science**, v. 34, n. 1, p. 1-9, 2007.

BROOKS, W.E.; KENT, J.D.; WILLET, J.C. Mineral energy, and fertilizer resources of the north coast of Peru, Perspective from the Santa Rita B Archaeological site. U.S. **Geological Survey Open File Report** 2004-1024, 2004.

CHEN, P Y. Table of key lines in x ray powder diffraction patterns of minerals in clays and associated rocks. **Department of Natural Resources Geological Survey Occasional Paper**, 21, v. 21, p. 77, 1977. Disponível em: <internal-pdf://op21-1614768640/OP21.pdf>.

CHEPSTOW-LUSTY, A.; FROGLEY, M.R.; BAUER, B.S.; BUSH, M.B.; HERRERA, A.T., A late Holocene record of arid events from the Cuzco region, Peru. **Journal of Quaternary Science**, v. 18, n. 6, p. 491-502, 2003.

COOK, N. El impacto de las enfermedades en el mundo antiguo andino del siglo XVI. **Revista Historica**, v. 24, n. 2, p. 341-365, 2000.

CORTÉZ BILLET, V.; AUSEJO CASTILLO, C. Más allá del litoral: el papel de las islas en el paisaje cultural marítimo del Perú. **Allpanchis**, n. 80, p. 11-49, 2012.

COVEY, A.L. INCA APOCALYPSE: The Spanish conquest and the transformation of the andean world. **Oxford University Press**, 2020.

DE LA VEGA, G. Comentarios reales. Livro I. **Lisboa**, 1609.

DENEVAN, W.M. Cultivated landscapes of Amazonia and the Andes. Oxford University Press, New York, 2005.

DICK, R. P.; SANDOR, J. A.; EASH, N. S. Soil enzyme activities after 1500 years of terrace agriculture in the Colca Valley, Peru. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 50, n. 2, p. 123–131, 1994.

ELORRIETA, F.E.S.; ELORRIETA, E.S. Cusco and the Sacred Valley of the Incas. **ALKAMARI E.I.R.L**, 2009.

EMBRAPA. Manual de metodos de analises. Rio de Janeiro: **CNPS/EMBRAPA**, 2017.

FARRINGTON, I. Cusco: Urbanism and Archaeology in the Inka World. University Press of Florida, 2013.

FERRO-VÁZQUEZ, C.; MARTÍNEZ-CORTIZAS, A.; NOVOA-MUÑOZ, J.C.; BALLESTEROS-ARIAS, P.; CRIADO-BOADO, F. 1500 Years of Soil Use Reconstructed From the Chemical Properties of a Terraced Soil Sequence. **Quaternary International**, v. 346, p. 28-40, 2014.

GADE, D.; RIOS, R. Chaquitacla: The native footplough and its persistence in central Andean agriculture. **Tools and Tillage** 2, 3-15, 1972

GADE, D.W. Plants, man and the land in the Vilcanota valley of Perú. Dr. W. Junk B.V.

Publishers, The Hague, 1975

GADE, D. W. **Spell of the Urubamba**: Anthropogeographical Essays on an Andean Valley in Space and Time. **Springer**, 2016.

Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça-Santos, M.L., Montanarella, L., Muniz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I. & Vargas, R. (eds). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Luxembourg, Comisión Europea, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995, 2014.

GLAVE, L.M. Propiedad de la tierra, agricultura y comercio, 1570-1700: EL gran despojo. In: Noejovich, H.O; Salazar-Soler, C., Suarez, M., Glave, L.M., Salas, M. Compendio de historia económica del Perú. Tomo 2: Economía del Periodo Colonial Temprano. **Banco Central de Reserva del Perú**, 2020.

GOODMAN-ELGAR, M. Evaluating soil resilience in long-term cultivation: a study of pre-Columbian terraces from the Paca Valley, Peru. **Journal of Archaeological Science**, v. 35, n. 12, p. 3072-3086, 2008.

HASTORF, C.A.; Melanie, F.W. Interpreting Wild Seeds from Archaeological Sites: A Dung Charring Experiment from the Andes. *Journal of Ethnobiology* 18(2):211-227, 1998.

INRENA. Mapa Ecológico del Perú - Guía Explicativa. Ministerio de Agricultura. Lima, 1995

INBAR, M.; LLERENA, C. Erosion Processes in High Mountain Agricultural Terraces in Peru. **Mountain Research and Development**, v. 20, n. 1, p. 72-79, 2000.

IUUS WORKING GROUP WRB. **Base Referencial mundial del recurso suelo 2014, actualización 2015**. Disponible em: <<http://www.fao.org/3/i3794es/I3794es.pdf>>.

KENDALL, A.; RODRÍGUEZ, A. 2009. Desarrollo y perspectivas de los sistemas de andenería de los Andes centrales del Perú. **Cuzco: institud français d'études andines**, 2009.

KEMP, R.; BRANCH, N.; SILVA, B.; MEDDENS, F.; WILLIAMS, A.; KENDALL, A.; VIVANCO, C. Pedosedimentary, cultural and environmental significance of paleosols within pre-hispanic agricultural terraces in the southern Peruvian Andes. **Quaternary International**, v. 158, n. 1, p. 13-22, 2006.

KLARÉN, P. **Nación y sociedad en la historia del Perú**. Estudios H ed. Oxford: IEP, 2012.

KRÜGGELER, T. El mito de la "despoblación": apuntes para una historia demográfica del Cuzco (1971-1940). Em: **Revista Andina Nro. 31**. Cuzco, 1998.

KOSIBA, S.; HUNTER, R. Alexander. Fields of conflict: A political ecology approach to land and social transformation in the colonial Andes (Cuzco, Peru). **Journal of Archaeological Science**, v. 84, p. 40-53, 2017.

KUBLER, G. Towards Absolute Time: Guano Archaeology. **Memoirs of the Society for American Archaeology**, v. 4, p. 29–50, 1948.

LUMBRERAS, L.G. Formación de las sociedades urbanas. In: Lumbreras, L.G (Ed). *História de America Andina*. Vol. 1: Las Sociedades Aborígenes. Universidad Andina Simón Bolívar. pp 223-265, 1999.

MARGOLIES, L. *Inca Architecture* Indiana University Press, 1980.

MASSON, M.L. Rehabilitación de andenes em la comunidade de San Pedro de Casta, Lima. In Torre, C., & Burga, M. (Eds). *Andenes y camellones em el Perú Andino: Historia presente y futuro* (pp. 207-216), Lima: Consejo Nacional de Ciencia y tecnologia, 1986

MASON, J.A. *The ancient civilizations of Peru*. London: Penguin Books, 1991

MCKEAGUE, J. A.; DAY, J. H. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as AIDS in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 46, n. 1, p. 13-22, 1966.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M.L. Iron Oxide Removal from Soils and Clays by a Dithionite-Citrate System Buffered with Sodium Bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, v. 7, n. 1, p. 317-327, 1958.

NANAVATI, W.P.; FRENCH, C.; LANE, K.; OROS, OH.; BERESFORD-JONES, D. Testing soil fertility of Prehispanic terraces at Viejo Sangayaico in the upper Ica catchment of south-central highland Peru. **Catena**, v. 142, p. 139-152, 2016.

OIM. *Migraciones internas em el Perú*. Lima, Perú, 2015

PROGRAMA DE DESARROLLO REGIONAL CUSCO (PDRC). *Evaluación social Valle Sagrado de los Incas*. 2013.

PEASE, G.Y.F. *Los Inkas una introducción*. Fondo editorial de la pontificia Universidad Católica del Perú, 1992

POZORSKI, S.; POZORSKI, T. Early Cultural Complezity on the Coast of Perú. In: Silverman, H., Isbell, W.H. (Eds). *Handbook of South American Archaeology* (pp. 607-632), Springer Science, 2008.

- PRESCOTT, W. The conquest of Peru. London: Routledge, 1874
- RODRIGUES, P.; MICAEL, J. The importance of guano birds to the Inca Empire and the first conservation measures implemented by humans. **Ibis**, v. 163, n. 1, p. 283-291, 2021.
- RUBIO, P. Peru. Madrid: Anaya, 1988.
- RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Rev. Bras. Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 297–300, 2005.
- SANDOR, J. A.; EASH, N. S. Ancient Agricultural Soils in the Andes of Southern Peru. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, n. 1, p. 170–179, 1995.
- SANDOR, J. A.; EASH, N. S. Significance of Ancient Agricultural Soils for Long-Term Agronomic Studies and Sustainable Agriculture Research. **Agronomy Journal**, v. 83, n. 1, p. 29–37, 1991.
- SOIL SURVEY STAFF. Soil Survey Manual Agriculture. Handbook 18. **USDA, Natural Resources Conservation Service**, v. 18, n. 18, p. 483, 2017. Disponível em: <[https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2\\_054262](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054262)>.
- SUBLETTE MOSBLECH, N.A.; CHEPSTOW-LUSTY, A.; VALENCIA, B.G; BUSH, M.B. Anthropogenic control of late-Holocene landscapes in the Cuzco region, Peru. **Holocene**, v. 22, n. 12, p. 1361–1372, 2012.
- SZPAK, P.; MILLAIRE, J-F.; WHITE, C.D.; LONGSTAFFE, F.J. Influence of seabird guano and camelid dung fertilization on the nitrogen isotopic composition of field-grown maize (*Zea mays*). **Journal of Archaeological Science**, v. 39, n. 12, p. 3721–3740, 2012.
- TAROLLI, P.; PRETI, F.; ROMANO, N. Terraced landscapes: From an old best practice to a potential hazard for soil degradation due to land abandonment. **Anthropocene**, v. 6, p. 10–25, 2014.
- THOMPSON, L.G.; MOSLEY-THOMPSON, E.; DANSGAARD, W.; GROOTES, P.M. The Little Ice Age as Recorded in the Stratigraphy of the Tropical Quelccaya Ice Cap. **Science**, p. 361-364, 1986.
- TORRE, E.A. La violencia en los Andes. História de un concepto, siglos XVI y XVII, Lima: Instituto Riva-Agüero del Perú, 2016.
- WALKLEY, A.; BLACK, I. Armstrong. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration

method. **Soil Science**. v.37, 1934.

VALCARCEL, L.E. Historia del Peru antiguo, tomo I a través de la fuente escrita. Historiadores de los siglos XVI, XVII, XVIII, 2015.

**APENDICE**

## Apéndice A. Análise semiquantitativa de elementos químicos estudados.

Hoz.	Prof.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZrO <sub>2</sub>
%										
Perfil 02										
Ap	0 - 25	11.62	0.62	4.31	3.25	1.18	61.50	0.8	0.10	0.03
AC	25 - 55	11.4473	0.63	4.45	3.30	1.10	63.85	0.8	0.13	0.03
2C1	55 - 70	11.47	0.53	4.39	3.33	1.44	61.03	0.84	0.10	0.03
3C	70 - 120	11.74	0.63	4.71	3.45	1.11	57.60	0.91	0.14	0.03
Perfil 04										
Ap	0 - 15	8.31	1.31	2.25	1.83	1.34	56.85	0.39	0.09	0.02
A2	15 - 55	11.9	1.10	3.61	2.85	1.33	68.99	0.57	0.07	0.02
2C	55 - 100	8.07	6.62	3.05	1.80	1.30	53.21	0.45	0.31	0.02
3C2	100 - 165	9.32	2.20	2.94	1.88	1.12	55.48	0.41	0.12	0.02
3C3	165 - 200	9.27	2.42	3.59	1.92	1.25	59.89	0.53	0.17	0.02