

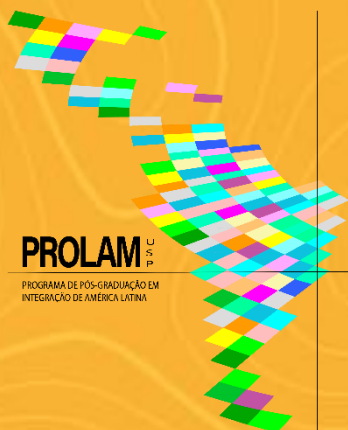
EXPERIÊNCIAS E REFLEXÕES PARA UMA GEOGRAFIA DE SOLOS NA AMÉRICA LATINA

ORGANIZADORES

Carlos Enrique Castro Méndez

Júlio César Suzuki

Wladimir Mejía Ayala



fflch

FACULDADE DE FILOSOFIA,
LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ISBN: 978-85-7506-461-0

DOI: 10.11606/9788575064610

CARLOS ENRIQUE CASTRO MÉNDEZ

JÚLIO CÉSAR SUZUKI

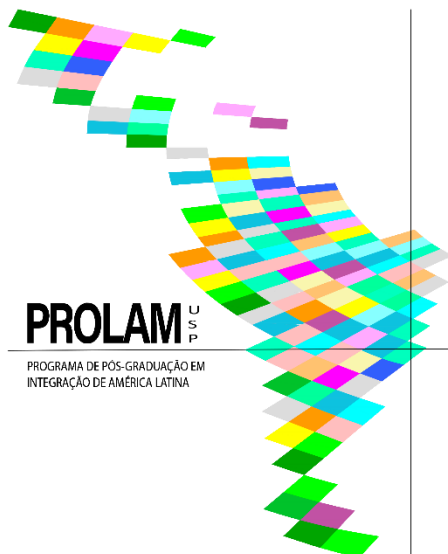
WLADIMIR MEJÍA AYALA

(ORGANIZADORES)

**EXPERIÊNCIAS E REFLEXÕES PARA UMA
GEOGRAFIA DE SOLOS NA AMÉRICA LATINA**

**FFLCH-USP
PROLAM-USP**

2023



PROLAM P. U. C.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
INTEGRAÇÃO DE AMÉRICA LATINA



fflch

FACULDADE DE FILOSOFIA,
LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP

Reitor: Prof. Dr. Carlos Gilberto Carlotti Junior

Vice-reitora: Profa. Dra. Maria Armanda do Nascimento Arruda

FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS - FFLCH

Diretor: Prof. Dr. Paulo Martins

Vice-diretora: Profa. Dra. Ana Paula Torres Megiani

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRAÇÃO DA AMÉRICA LATINA

Presidente da CPG: Profa. Dra. Marilene Proença Rebello de Souza

Vice-presidente da CPG: Prof. Dr. Júlio César Suzuki

COMITÉ EDITORIAL

Darío Martín Rodríguez
Ingeniero agrónomo. Investigador en suelos Instituto Nacional de Tecnología
Agropecuaria – INTA. Argentina

Héctor Jaime López Salgado
Agrólogo Magíster. Asesor en suelos Instituto
Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. Colombia

José Samuel Botón Jiménez
Agrólogo Magíster. Experto en levantamiento de suelos
Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. Colombia

Jairo Alfredo Veloza Franco
Hidrogeólogo
Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. Colombia

Javier Otero García
Agrólogo, Agrónomo Doctor (C). Asesor en suelos ambientales
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Colombia

Néstor Javier Martínez Ardila
Geólogo. Magíster. Director del grupo de investigación Suelos y Ecología
Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. Colombia

Patricia Fragoso Servon
Geógrafa, pHD. Investigadora principal
Universidad de Quintana Roo. México

Pedro Karin Serrato Álvarez
Agrólogo, Magíster y docente en geografía física
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC. Colombia

Pedro Méndez Guardado
Docente investigador
Universidad de Guadalajara, México

Miriam Vázquez
Geógrafa investigadora de la
Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Argentina

E96 Experiências e reflexões para uma geografia de solos na América Latina [recurso eletrônico] / Organizadores: Carlos Enrique Castro Méndez, Júlio César Suzuki, Wladimir Mejía Ayala. -- São Paulo: FFLCH/USP, PROLAM/USP, 2023.
7.300 Kb ; PDF.

Textos em Português e Espanhol.
Vários autores

ISBN 978-85-7506-461-0
DOI 10.11606/9788575064610

1. Geografia de solos - América Latina. 2. Pedologia – América Latina. I. Castro Méndez, Carlos Enrique, *coord.* II. Suzuki, Júlio César, *coord.* III. Mejía Ayala, Wladimir, *coord.*

CDD 342.0872

Elaborada por Elizabeth Barbosa dos Santos, CRA-8/6638



Esta obra é de acesso aberto. É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e a autoria e respeitando a Licença *Creative Commons* indicada

Capa: arte de autoria de Carlos Enrique Castro Méndez
Editoração: Rita de Cássia Marques Lima de Castro

A exatidão das informações, conceitos e opiniões é de exclusiva responsabilidade dos autores, os quais também se responsabilizam pelas imagens utilizadas.

SUMARIO

PRÓLOGO	8
Geografía de solos na América Latina: entre sonho e realidade	10
<i>Carlos Enrique Castro Méndez, Júlio César Suzuki y Wladimir Mejía Ayala</i>	
Geografía del suelo en América Latina: entre el sueño y la realidad.....	16
<i>Carlos Enrique Castro Méndez, Júlio César Suzuki y Wladimir Mejía Ayala</i>	
CAPÍTULO I.....	22
Degradación inducida por cosecha de papa. Análisis histórico-geográfico	
<i>Carlos Enrique Castro Méndez, Júlio César Suzuki y Wladimir Mejía Ayala</i>	
CAPÍTULO II	64
Procesos hidrogeoquímicos en la evolución de los paisajes de sabana en la altillanura de Colombia	
<i>Sergio Gaviria Melo</i>	
CAPÍTULO III	95
Estudio del impacto del cultivo de soja en tierras desmontadas de la Provincia del Chaco, Argentina	
<i>Astor Emilio López, María Florencia Roldán, Laura Itatí Giménez y Sergio Montico</i>	
CAPÍTULO IV	140
Identificación de los servicios ecosistémicos de regulación, clave para el entendimiento de la geografía del suelo en el Parque Nacional Natural Sumapaz, COLOMBIA	
<i>Grace Andrea Montoya-Rojas, Natalia Forero Patiño y Brian Sandoval Montaña</i>	

CAPÍTULO V	173
Suelos poligenéticos: la dimensión histórica en la interpretación de la aptitud y el uso de las tierras	173
<i>Jorge Alberto Sánchez Espinosa</i>	
CAPÍTULO VI	210
ANÁLISIS FISIAGRÁFICO Y ZONIFICACIÓN DE TIERRAS BASES PARA LA PLANEACIÓN DEL USO DEL TERRITORIO. CUENCA DEL RÍO USUMACINTA MÉXICO.....	210
<i>Aristides Saavedra Guerrero y Daniel M. López López</i>	
SOBRE OS ORGANIZADORES.....	243
SOBRE LOS AUTORES.....	245



PRÓLOGO

La sociedad contemporánea debería cambiar su concepción del suelo como un recurso natural no renovable a la de un bien natural renovable. También debería aceptar, y es tiempo ya de hacerlo, que el suelo no es un componente aislado del acto agropecuario sino una variable estructural de la sostenibilidad ambiental de las sociedades nacionales. Para esto último, también debería comprender que, incluso, el concepto de desarrollo sostenible no alcanza para cubrir las aspiraciones de la humanidad en sus propósitos de habitar la tierra con dignidad y justicia social y ecosistémica.

Suelo como bien natural renovable, profundamente articulado a los agroecosistemas y presente en los debates al concepto unidimensional del desarrollo, son tres ideas que ameritan explicaciones amplias alrededor de lo que se considera la variable ambiental y su interrelación con el concepto de desarrollo.

Aunque este no es el espacio para una reflexión extensa sobre esos temas, baste con señalar que el suelo es un bien, si se acepta que los humanos no se involucraron en su génesis (con excepción, quizás de las Terras Pretas dos Indios o de otros cuerpos de contenido pedológico antrópico) y de esta manera se aparta de la idea del suelo como recurso, que es funcional y se adapta bien a la visión reduccionista de acumulación de capital, propia de esta época.

En este sentido, el suelo como bien natural se renueva a diario con las prácticas ecológicas que le protegen y restauran, aunque también es necesario aceptar que sus pérdidas físicas por erosión o sus procesos degradativos de compactación o contaminación, se constituyen, bajo modelos de revolución verde, en eventos de muy difícil recuperación.

De esta concepción del suelo como bien natural renovable a entenderlo como la base del manejo agroecológico ya no hay mucha distancia. La agroecología viene proponiendo desde hace muchos años, que el medio edáfico debería ser el centro y origen de todas las prácticas de manejo del agroecosistema mayor (la finca), porque de él dependen sus múltiples funciones de producción agropecuaria, resiliencia, estabilidad, asimilación de carbono, soberanía y seguridad alimentarias o protección contra fenómenos degradativos.

Y de allí, también resulta fácil entender que la humanidad ya no debería centrar sus esfuerzos solamente en producir y acumular (desarrollo), así esta acumulación se mimetice con otros adjetivos (sostenibilidad), sino que los fines éticos de los habitantes del mundo deberían girar sobre muchos más factores simbólicos, organizacionales o tecnológicos como por ejemplo, garantizar la conservación de otros bienes naturales; sostener la equidad en la repartición de excedentes; mantener diálogos entre la ciencia y los saberes populares; educar permanentemente sobre valores; aplanar las relaciones de poder y las jerarquías sociales; conservar, preservar y restaurar la base de sustentación ecosistémica; impulsar tecnologías acordes con las características de

los territorios y ajustar continuamente las políticas y las normas a las exigencias de otros ideales de habitar el planeta, todo lo cual se ha denominado como la sostenibilidad ambiental de las sociedades, concepto distinto al mero desarrollo sostenible.

En esta búsqueda y en la afirmación de las ideas anteriores, cobra un valor profundo el hecho de contar con especialistas de suelo que comprendan los retos implícitos en la complejidad de los fenómenos a estudiar. Ya no se trata de estudiar al suelo solamente desde el punto de vista mineralógico, biológico o físico químico, sino de entenderlo y vivirlo en la dificultad de sus relaciones permanentes, profundas, complejas, de distintas direcciones, intensidades, sentidos y orientaciones, con las sociedades humanas: el suelo atravesado por discusiones políticas, porque el ambientalismo actual es profundamente político. El suelo, inmerso en las discusiones del cambio climático y de sus condicionantes socioeconómicos. El suelo en las encrucijadas de una educación integral. El suelo y las orientaciones bidireccionales u holísticas de la ciencia. El suelo y las tecnologías de base agroecológicas. En una palabra, el suelo y la monumental experiencia de la vida sobre el planeta tierra.

Estas concepciones ambientales sobre el medio edáfico no son nuevas. En su momento fueron expuestas por el maestro Abdón Cortés Lombana, en su filosofía de la quinta dimensión del suelo y retomadas ahora por el pensamiento ambiental latinoamericano. Es deber de las nuevas generaciones de edafólogos seguir estas huellas, las del maestro y las de los discípulos que en su conjunto escriben las notas de este libro, para que el suelo deje de ser el gran desconocido de la dimensión ambiental y se valore en lo que realmente es: un teatro de la vida.

Tomás Enrique León Sicard

<https://orcid.org/0000-0001-6771-9253>

Agrólogo PhD.

Agosto 19 de 2022

.



Geografia de solos na América Latina: entre sonho e realidade

A geografia dos solos permite abordar a relação entre a política econômica da globalização que está sendo realizada nos países da América Latina com os conflitos de ocupação, posse e uso da terra, produtividade agrícola e sustentabilidade ambiental em cada um desses territórios. Com esta abordagem, a ciência do solo levanta questões em diferentes níveis ou escalas, de modo a compreender várias das razões que o avanço da ciência geográfica exige, tais como: O conhecimento do princípio evolutivo dos solos e das terras se constitui em informação suficiente para a construção de um desenvolvimento territorial? É preciso envolver a sociedade e incluir na análise do solo o grau de influência das decisões políticas sobre o uso da terra e a formação de paisagens culturalizadas? A resiliência às mudanças no uso da terra é um elemento que pode ser trabalhado a partir das diferentes visões que os especialistas têm a esse respeito?

Para responder a essas questões, em um primeiro momento foi realizada uma análise geográfica do uso agrícola dos solos em savanas naturais do Brasil, Argentina, Equador, México, Paraguai e Colômbia, para o período entre 1950 e 2019, e se constatou um aumento na área de terras agrícolas que ultrapassa uma média de 50.000 hectares por ano. Também foi identificado que uma alta porcentagem desses espaços corresponde a savanas naturais. Tais espaços foram estudados com uma abordagem descritivo-classificativa e estimaram-se altas possibilidades agrícolas, com base em aspectos climáticos, proximidade de corpos d'água, terras mecanizadas, presença de comunidades ancestrais evangelizadas no período colonial e que foram definidas como áreas estratégicas para o progresso local.

Para complementar o exercício anterior, um grupo de dezoito pesquisadores latino-americanos de diferentes áreas do conhecimento foi convidado a participar da primeira versão do Encontro Internacional de Especialistas em Solos (EIES I, 2021), que aconteceu no dia 18 de junho de 2021¹. O objetivo deste encontro foi socializar as propostas de pesquisa em solos de savana natural no âmbito das políticas de desenvolvimento territorial, que foram focadas nas linhas de produtividade, meio ambiente e sociedade. Exemplos de países como Argentina, Brasil, Equador, México e Honduras foram tomados para enfrentar as questões que são tratadas na Colômbia em termos de produtividade e meio ambiente. Dessa forma, o evento possibilitou compreender a função dos solos e sua relação com as atividades humanas, incluindo qualidade de vida, aumento da produtividade agrícola e gestão ambiental, bem como a consequente formação de sociedades sustentáveis.

¹ Pesquisadores reconhecidos em geografia de solos vinculados à Universidade de Quintana Roo no México, à Universidade Nacional da Colômbia e à Universidade Pan-Americana de Zamorano em Honduras atuaram como observadores externos ao processo para que, com sua experiência, pudessem identificar questões relevantes e propor novos métodos, procedimentos e interpretações, a fim de inspirar a criação de conceitos que possam ser abordados com maior profundidade.

Durante o evento, as abordagens levantadas foram agrupadas em duas visões que se complementam: produtividade agrícola do solo e função do ecossistema. Foram abordados temas relacionados com ameaças e riscos naturais, agricultura intensiva, permacultura, serviços ambientais, ecologia e geografia. Da mesma forma, foram identificados novos problemas e metodologias alternativas voltadas para a organização da informação e sua sistematização, e foram expostas novas formas de análise baseadas em dados de solo. Os pesquisadores consideraram os temas e ofereceram uma visão de como abordar a análise das informações do solo a partir de sua experiência nas aulas da universidade, na direção de projetos de pesquisa e na aplicação de novos conhecimentos.

Com relação ao exposto, é importante ressaltar que as informações construídas pelos especialistas em solos são baseadas em grandes áreas do conhecimento, como climatologia, geologia, química, entre outras. Estes campos integram-se na representação cartográfica temática, a uma determinada escala, que permite transferir informação da caracterização do solo, ou seja, do ponto de referência para a representação corológica. Desta forma, os dados espaciais e temporais que são trabalhados na Colômbia durante as fases de pré-campo, campo e pós-campo de levantamentos de solo são integrados.

Assim, o encontro permitiu a identificação de temas inéditos e a formação de uma rede acadêmica, por meio da qual se buscou complementar as temáticas do solo com outras relacionados às ciências sociais e, assim, fortalecer a linha de pesquisa na Subdireção de Agrologia do Instituto Geográfico Agustín Codazzi, na Colômbia. No caminho para uma geografia dos solos, o encontro realizado conseguiu mostrar a versatilidade que existe na aplicação da informação espacial sobre os solos e demonstrar que, por meio do trabalho diário dos especialistas, outras possibilidades são encontradas para a realização de pesquisas. Uma delas está relacionada à estrutura conceitual conhecida no Instituto Geográfico Agustín Codazzi como "marco pedológico", ou seja, o desenho teórico que permite identificar e classificar os solos a partir da combinação de fatores formadores, clima, relevo e material original do solo, geologicamente inalterado.

O clima, por ser o mais abrangente, é o primeiro fator que se aplica e é aquele que determina a condição global do solo. Esse fator inspirou os primeiros geógrafos físicos interessados em conhecer o potencial agrícola das savanas naturais do mundo; A tendência atual é investigar a variabilidade climática e as longas temporalidades que se refletem na gênese dos solos, como expressam os pesquisadores que participam deste trabalho acadêmico. O segundo fator considerado foi o relevo, que, analisado em conjunto com o clima, gerou novas unidades conceituais e novas questões geográficas, enquanto o material original é o fator menos estudado e que completa suas informações a partir da escala cartográfica mais geral.



O clima, o relevo e a matéria prima são a confluência de várias escalas que vão do geral ao específico e com níveis de conhecimento variáveis, no início desta aventura de conhecimento em que clima e relevo estiveram unidos. Assim como também o clima mostra essa comparação entre o global e o local e está incluído em diversos indicadores climáticos, como são os casos do índice de Thorthwaite e do índice de Lang.

As questões de pesquisa integradas ao trabalho dessas redes acadêmicas dentro da geografia do solo foram as seguintes: como identificar os processos de degradação a partir da informação do solo? como a informação do solo contribui para a análise ambiental? como solucionar problemas de dados na ausência informações mais detalhadas sobre o solo? quais são as aplicações da informação do solo à produtividade? como focar a ciência do solo nas ciências agrícolas? como analisar a saúde do solo para a produtividade ou para o ambiente?, como a informação do solo contribui para a análise ambiental?, como gerar novas técnicas para mapear a degradação do solo? e, por fim, como entender os solos a partir da relação sociedade-terra?

Nos cinco meses seguintes à primeira reunião, foram realizadas consultas com outros especialistas latino-americanos, com o objetivo de conhecer as características dos solos degradados pelo uso excessivo do solo no México, Brasil, Argentina e Equador; as consultas foram estendidas aos atores territoriais da savana sazonal de Puerto Gaitán em Meta, na Colômbia, para contrastar as diferentes visões sobre a mudança no uso da terra nessas savanas naturais, como são chamadas globalmente.

Com o objetivo de fortalecer a linha nascente de pesquisa em Geografia do Solo, foi organizado o Segundo Encontro Internacional de Especialistas em Solos (EIES II, 2022), que contou com quatorze convidados e foi realizado no dia 10 de dezembro de 2021. Nesse encontro, foram trabalhadas as linhas orientadas a dados, informações, conhecimento e escala cartográfica, a partir da visão trabalhada nos países da América Latina que estão sendo afetados pela degradação do solo causada pela implantação de cultivos intensivos nas savanas. As seguintes questões foram estabelecidas para guiar esse encontro: que problemas enfrentam os especialistas dos países latino-americanos para obter dados de solo e como os resolvem?; que estratégias os especialistas usam para gerar as informações necessárias para os processos de produção ou para a gestão ambiental?; que conhecimento os especialistas em solo adquirem?; e em que escala eles estão aplicando esse conhecimento?

As intervenções foram conduzidas por renomados pesquisadores, contribuindo para a discussão a partir de suas experiências relacionadas aos impactos que as monoculturas deixam no solo; nesse sentido, tratou-se de temáticas como: agricultura intensiva, metabolismo rural, fluxo de nutrientes e intangíveis na

agricultura: Vamos para o esvaziamento de Las Pampas?, exibida pelo Dr. Walter Pengue; e a geração de ideias advindas da socialização da identificação de eventos vulcânicos e da configuração da paisagem nas características dos solos, socializadas pelo Agrônomo e Engenheiro Agrônomo William González, foram temas centrados na linha de riscos ambientais.

As ameaças ocultas nos solos dedicados à produção agrícola intensiva foram analisadas com base na presença de cádmio nos solos equatorianos pelo Dr. Manuel Carrillo Zenteno, que complementa a análise com a proposta de ações corretivas. As causas do avanço da fronteira agrícola no pampa argentino analisadas a partir da cartografia dos solos e utilizadas como base do ordenamento territorial rural na província de Chaco, Argentina, foi o conteúdo da apresentação feita pelo Eng. Astor Emilio Lopez. Essas investigações exploraram os efeitos da agricultura intensiva na saúde humana e na biodiversidade.

As covariáveis geográficas que podem ser aplicadas no mapeamento de solos do cerrado brasileiro expostas pelo Dr. Elizon Dias e a dissertação sobre as aplicações práticas e de engenharia que são geradas a partir das informações de solo apresentadas pela Dra. Grace Andrea Montoya permitiram mostrar outras novas formas de representar e identificar os solos.

A relação entre a informação do solo e a sustentabilidade econômica da família, apresentada pela Dra. Dora Inés Rey; os elementos físicos que determinam a ordem espacial e a distribuição dos solos na paisagem por meio do sistema de classificação geomorfológica e sua contribuição para a delimitação dos solos apresentado pelo Mestre Agrônomo Héctor Jaime López e a definição do limite entre a fronteira agrícola e a selva amazônica com informações de solo apresentadas pelo Dr. (C) Carlos Enrique Castro Méndez foram apresentações que se concentraram em mostrar aspectos relacionados aos limites cartográficos que têm um importante componente de solos e paisagem, os quais possuem relevante utilidade no ordenamento socioambiental do território.

As pesquisas resumidas neste livro foram desenvolvidas a partir da análise de um problema comum na América Latina relacionado à deterioração do solo devido ao uso inadequado, onde os impactos produzidos pelo uso agrícola intensivo foram identificados como uma constante nesses países. Além da revisão das contribuições da ciência do solo como referência para definir o uso ideal da terra, é exposta, como contraste, a função desempenhada pelos solos localizados em relevos íngremes para identificar seus serviços ecossistêmicos e complementar o panorama da sustentabilidade.

Cada um dos investigadores voltou à informação do solo e respondeu às questões com vários graus de complexidade, como o tema dos solos poligenéticos apresentado pelo Dr. Jorge Sánchez, que nos permitiu aprofundar o conhecimento

do tempo, graças à interpretação de as diferentes temporalidades que ocorrem no espaço geográfico. Seus objetos de estudo foram a paisagem e o solo, vistos como uma construção natural derivada de eventos geológicos que causaram o acúmulo de fragmentos e depósitos rochosos da última era glacial, 20 mil anos atrás. Assim, o solo é derivado de alterações ambientais que determinam a sua gênese, sendo uma referência para analisar os efeitos no habitat que se tornam visíveis quando os elementos minerais são analisados ao microscópio. Isso também está relacionado à degradação do solo, estudada a partir do fator tempo e sua materialização no espaço.

Nesta mesma lógica, o Dr. Sergio Gaviria abordou sua pesquisa com uma abordagem química e mineral e gerou um modelo teórico espacial baseado na análise da dinâmica da água que lhe permitiu entender porque algumas formas de ferro chamadas crostas petroferrosas estão localizadas na paisagem sazonal de savana .

Essa lógica espacial analisada no sentido transversal a uma drenagem pouco dissecada no cerrado é um avanço importante para o reconhecimento dos solos, e é especialmente útil na etapa de interpretação geomorfológica, pois permite ao pesquisador inferir algumas hipóteses sobre quais são as áreas mais sensíveis à degradação causada pelo uso agrícola intensivo.

A lógica global diria que as terras agrícolas produtivas devem estar localizadas em relevo plano e que as terras de conservação devem estar localizadas em relevo mais íngreme. É a partir dessas abordagens que se inicia a análise geográfica da realidade que é vivida no Brasil, como primeiro produtor de cultivo de cana-de-açúcar no bioma chamado cerrado, do desenvolvimento rural a partir da implantação de lavouras de soja nos pampas argentinos, do desmatamento de florestas realizadas no Chaco paraguaio para o plantio de soja e da intensificação do uso na savana estacional colombiana como medida de desenvolvimento rural acordada nos Acordos de Paz.²

Assim, o objetivo deste livro é apresentar as diferentes formas de interpretar os dados do solo, a fim de propor novas formas de pensar a ciência do solo, não como um elemento descritivo ou interpretativo orientado para fins ambientais ou produtivos, mas como esse conhecimento está relacionado a abordagens sociais, econômicas ou políticas que promovam o desenvolvimento territorial equitativo. Pretende-se que estas experiências sejam a base de inspiração para que novos investigadores ousem gerar questões e respostas holísticas que liguem lugares, regiões e espaços globalizados. A geografia dos solos possibilita pensar novas

² Nas conversas com os guerrilheiros das FARC desde 2012, o governo colombiano gerou uma nova institucionalidade que visava cumprir o primeiro acordo assinado em 2016. Os novos instrumentos de política que permitiram a ocupação da savana sazonal colombiana com usos agrícolas intensivos concretizaram um novo processo de territorialização que se iniciou com a elaboração dos documentos do Conselho Nacional de Política Econômica e Social - CONPES: 3797/2017, 3917/2018 e 3490/2018.

formas de proteger os solos, decodificar as mensagens que chegam como modismos e que são adotadas sem revisão conceitual e análise do discurso; A teoria crítica como eixo desta proposta procura revelar o que não é visível, que foi base para o nascimento do conceito de degradação induzida, um efeito involuntário que se esconde na colheita dos produtos da terra. Apesar de os solos apresentarem alta vocação para uso agrícola, a perda de solo leva a sociedade camponesa a uma diminuição de sua capacidade produtiva e ao seu empobrecimento.

Carlos Enrique Castro Méndez

<http://orcid.org/0000-0003-3125-8349>

Júlio César Suzuki

<https://orcid.org/0000-0001-7499-3242>

Wladimir Mejía Ayala

<https://orcid.org/0000-0002-4091-9885>

(Orgs.)



Geografía del suelo en América Latina: entre el sueño y la realidad

La geografía de suelos permite abordar la relación existente entre la política económica de globalización que se adelanta en los países de América Latina, con los conflictos de ocupación, la tenencia y el uso de la tierra, la productividad agropecuaria y la sostenibilidad ambiental en cada uno de estos territorios. Con este enfoque, desde la ciencia del suelo se plantean interrogantes en diferentes niveles o escalas, con la finalidad de entender varias de las razones que requiere el avance de la ciencia geográfica: ¿es el conocimiento del principio evolutivo de los suelos y las tierras, información suficiente para la construcción de una política de desarrollo territorial?, ¿es necesario involucrar a la sociedad e incluir en el análisis de los suelos, el grado de influencia de las decisiones políticas en el uso de las tierras y en la conformación de paisajes culturalizados, ¿es la resiliencia al cambio de uso de los suelos, un elemento que pueda tratarse desde las diversas visiones que tienen los especialistas al respecto?

Con el fin de responder a estos interrogantes se realizó, en primera instancia, un análisis geográfico del uso agrícola de los suelos en sabanas naturales de Brasil, Argentina, Ecuador, México, Paraguay y Colombia, para el período comprendido entre 1950 y 2019, y se encontró un incremento del área de tierras agrícolas que supera en promedio 50.000 hectáreas al año. Se identificó igualmente, que un alto porcentaje de estos espacios corresponde a sabanas naturales. Estas fueron estudiadas con un enfoque descriptivo-clasificadorio y le fueron estimadas altas posibilidades agrícolas, basadas en aspectos climáticos, cercanía a cuerpos de agua, tierras mecanizables, presencia de comunidades ancestrales evangelizadas en la época de la colonia y que fueron promovidas como áreas estratégicas para el progreso local.

Para complementar el ejercicio anterior, se invitó a un grupo de dieciocho investigadores latinoamericanos, procedentes de diferentes campos del conocimiento, a participar en la primera versión del Encuentro Internacional de Expertos en Suelos (EIES I, 2021), que se realizó el 18 de junio de 2021³. El objetivo de este encuentro fue socializar las propuestas de investigación en suelos de las sabanas naturales en el marco de las políticas de desarrollo territorial, que estuvieran centradas en las líneas de productividad, ambiente y sociedad. Se tomaron ejemplos de países como Argentina, Brasil, Ecuador, México y Honduras, para confrontar las temáticas que se tratan en Colombia en los enfoques de productividad y ambiente. De esta manera, el evento permitió comprender la función de los suelos y su relación con las actividades

³ Se tuvieron como observadores externos al proceso reconocidos investigadores en geografía de suelos vinculados a la Universidad de Quintana Roo en México, la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad Panamericana de Zamorano en Honduras, para que con su experiencia identificaran temas relevantes y plantearan novedosos métodos, procedimientos e interpretaciones, con la finalidad de inspirar la creación de conceptos que puedan abordarse con mayor profundidad.

humanas, incluida la calidad de vida, el incremento de la productividad agrícola y el manejo ambiental, así como la consecuente formación de sociedades sustentables.

Durante el evento, los enfoques planteados se agruparon en dos visiones que son complementarias entre sí: la productividad agrícola del suelo y la función ecosistémica. Se abordaron temáticas relacionadas con la amenaza y los riesgos naturales, la agricultura intensiva, la permacultura, los servicios ambientales, la ecología y la geografía. Así mismo, se identificaron problemáticas novedosas y metodologías alternativas orientadas a organizar la información y su sistematización, y se expusieron nuevas formas de análisis a partir de los datos del suelo. Los investigadores sopesaron las temáticas y ofrecieron una visión de cómo abordar el análisis de la información del suelo desde su experiencia en las aulas universitarias, en la dirección de proyectos de investigación y en la aplicación de nuevo conocimiento.

En cuanto a lo anterior, es importante señalar que la información que construyen los especialistas en suelos tiene su base en grandes campos del conocimiento, como la climatología, la geología, la química, entre otros. Estos campos se van integrando a la representación cartográfica temática, a una escala determinada, lo que permite transferir información desde la caracterización del suelo, es decir, desde la referencia puntual hasta la representación corológica. De esta manera, se integran datos espaciales y temporales que se trabajan en Colombia durante las fases de precampo, campo y poscampo de los levantamientos de suelos.

Es así como, el encuentro permitió la identificación de temáticas novedosas y la conformación de una red académica, por medio de la cual, se buscó complementar temáticas del suelo con otras relacionadas con las ciencias sociales y, de esta manera, fortalecer la línea de investigación en Geografía de suelos en la Subdirección de Agrología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi en Colombia. En el tránsito hacia una geografía de suelos, la reunión realizada logró mostrar la versatilidad que tiene la aplicación de la información espacial de los suelos y demostrar que, a través del quehacer diario de los expertos, se encuentran otras posibilidades para hacer investigación. Una de ellas es la relacionada con la estructura conceptual denominada en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi como “marco pedológico”, es decir, el diseño teórico que permite identificar y clasificar los suelos a partir de la combinación de los factores formadores del suelo, clima, relieve y material parental.

El clima, por ser el más englobante, es el primer factor que se aplica y es el que se determina la condición global del suelo. Este factor inspiró a los primeros geógrafos físicos interesados en conocer la potencialidad agrícola de las sabanas naturales del mundo; la tendencia actual es investigar la variabilidad climática y las temporalidades largas que se reflejan en la génesis de los suelos como lo expresan los investigadores que participan en esta obra académica. El segundo factor considerado fue el relieve, el cual, analizado en conjunto con el clima generó nuevas unidades conceptuales y

nuevas preguntas geográficas, mientras que el material parental es el factor menos estudiado y que completa su información desde la escala cartográfica más general.

Clima, relieve y material parental son la confluencia de varias escalas que van desde generales a específicas y que también cuenta con niveles variables de conocimiento, en el inicio de esta aventura del conocimiento en el cual estuvieron unidas el clima y el relieve. Así como también el clima muestra esa comparación entre lo global y lo local y está incluido en varios indicadores climáticos, como son los casos del índice de Thorthwaite y el índice de Lang.

Las preguntas de investigación que se integraron en los trabajos de estas redes académicas dentro de la geografía de suelos fueron las siguientes: ¿cómo identificar procesos degradativos a partir de información de suelos?, ¿cómo aporta la información de suelos al análisis ambiental?, ¿cómo solucionar problemas de datos ante la ausencia de información más detallada de suelos?, ¿cuáles son las aplicaciones de la información de suelos a la productividad?, ¿cómo enfocar la ciencia del suelo a las ciencias agrícolas?, ¿cómo analizar la salud del suelo para la productividad o el ambiente?, ¿cómo aporta la información de suelos en el análisis ambiental?, ¿cómo generar nuevas técnicas para el mapeo de la degradación de tierras?, y finalmente ¿cómo entender los suelos desde la relación sociedad - tierra?

En los cinco meses siguientes al primer encuentro, se realizaron consultas a otros expertos latinoamericanos, con la finalidad de conocer las características de los suelos que se degradaron por causa de la sobreutilización de las tierras en México, Brasil, Argentina y Ecuador; las consultas se extendieron a los actores territoriales de la sabana estacional de Puerto Gaitán en el Meta en Colombia, para contrastar las diferentes visiones sobre el cambio de uso de las tierras en estas sabanas naturales, como se denominan globalmente.

Con el propósito de fortalecer la naciente línea de investigación de Geografía de Suelos, se organizó el Segundo Encuentro Internacional de Expertos en Suelos (EIES II, 2022), que contó con catorce invitados y se llevó a cabo el 10 de diciembre de 2021. En este encuentro se trabajaron las líneas orientadas a datos, información, conocimiento y escala cartográfica a partir de la visión trabajada en los países de América Latina, los cuales están siendo afectados por la degradación de las tierras causada por la implementación de cultivos intensivos en las sabanas naturales. Se establecieron los siguientes interrogantes para guiar este encuentro: ¿qué problemas afrontan los expertos de países latinoamericanos para la obtención de datos del suelo y cómo los solucionan?, ¿qué estrategias utilizan los expertos para generar la información requerida para los procesos productivos o para la gestión ambiental?, ¿qué conocimiento adquieren los expertos en suelos? y ¿a qué escala están aplicando ese conocimiento?



Las intervenciones fueron lideradas por reconocidos investigadores, aportando a la discusión desde su experiencia relacionada con los impactos que deja al suelo los monocultivos, en ese sentido la agricultura intensiva metabolismo rural, flujo de nutrientes e intangibles en la agricultura: ¿Vamos hacia el vaciamiento de Las Pampas?, expuesta por el Dr. Walter Pengue; y la generación de ideas surgidas de la socialización la identificación de eventos volcánicos y configuración del paisaje en las características de los suelos, socializado por el Agrólogo y Agrónomo William González, fueron temas centrados en la línea de riesgos ambientales.

Las amenazas ocultas en los suelos dedicados a la producción agrícola intensiva fueron analizadas a partir de la presencia de cadmio en suelos de Ecuador por el Dr. Manuel Carrillo Zenteno, que complementa el análisis con el planteamiento de acciones de remediación. Las causas del avance de la frontera agrícola en la pampa argentina fueron analizadas a partir de la cartografía de suelos y utilizadas como base del ordenamiento territorial rural en la provincia del Chaco, Argentina, fue el contenido de la presentación realizada por el Ing. Astor Emilio López. Estas investigaciones exploraron los efectos de la agricultura intensiva en la salud humana y la biodiversidad.

Las covariables geográficas que pueden aplicarse en el mapeo de suelos en la sabana brasilera expuesta por el doctor Elizon Dias y la disertación sobre las aplicaciones prácticas e ingenieriles que se generan a partir de la información de suelos presentada por la doctora Grace Andrea Montoya, permitieron mostrar otras formas novedosas para representar e identificar los suelos.

La relación entre la información de suelos y la sostenibilidad económica de la familia, presentada por la Dra. Dora Inés Rey; los elementos físicos que determinan el orden espacial y la distribución de los suelos en el paisaje, a través del sistema de clasificación geomorfológico y su aporte a la delimitación de los suelos presentada por el Magíster Agrólogo Héctor Jaime López; y la definición del límite entre la frontera agrícola y la selva amazónica con información de suelos presentada por el Dr. (C) Carlos Enrique Castro Méndez, fueron presentaciones que se enfocaron en mostrar aspectos relacionados con límites cartográficos que tienen un importante componente de suelos y paisaje, que tienen utilidad relevante en el ordenamiento social y ambiental del territorio.

Las investigaciones que se resumen en este libro fueron desarrolladas a partir del análisis de una problemática común en América latina relacionada con el deterioro de los suelos debido al uso inadecuado, donde los impactos producidos por el uso agrícola intensivo fueron identificados como una constante en estos países. Además de la revisión en los aportes de la ciencia del suelo como referente para definir el uso óptimo de las tierras, se expone como contraste, la función que prestan los suelos localizados en relieves escarpados para identificar sus servicios ecosistémicos y complementar el panorama de la sustentabilidad.



Cada uno de los investigadores retomó la información de suelos y respondió las preguntas en diverso grado de complejidad, como fue el tema de suelos poligenéticos que expuso el Dr. Jorge Sánchez, que permitió ahondar en el conocimiento del tiempo, gracias a la interpretación de las diferentes temporalidades que ocurren en el espacio geográfico. Sus objetos de estudio fueron el paisaje y el suelo, vistos como un constructo natural derivado de eventos geológicos que causaron la acumulación de fragmentos de rocas y depósitos procedentes de la última glaciación hace 20.000 años. Así, el suelo se deriva de cambios ambientales que determinan su génesis siendo un referente para analizar los efectos en el hábitat que se hacen visibles cuando se analizan al microscopio los elementos minerales. Esto también se relaciona con la degradación de las tierras, estudiada desde el factor tiempo y su materialización en el espacio.

En esta misma lógica, el Dr. Sergio Gaviria planteó su investigación con un enfoque químico y mineral y generó un modelo teórico espacial basado en el análisis de la dinámica del agua que le permitió entender por qué se localizan algunas formas de hierro llamadas costras petroféricas en el paisaje de la sabana estacional.

Esta lógica espacial analizada en el sentido transversal a un drenaje en la sabana poco disectada es un avance importante para el reconocimiento de los suelos, y especialmente es útil en la etapa de interpretación geomorfológica, pues le permite al investigador inferir algunas hipótesis sobre cuáles son las áreas más sensibles a la degradación causada por el uso agrícola intensivo.

La lógica global diría que tierras agrícolas productivas deben localizarse en relieves planos y que las tierras de conservación se deben situar en relieves más pronunciados. Es a partir de estos planteamientos donde comienza el análisis geográfico de la realidad que se vive en Brasil, como primer productor del cultivo de caña de azúcar en el bioma denominado el cerrado, del desarrollo rural a partir de la implementación de cultivos de soja en la pampa argentina, de la deforestación de selvas realizada en el Chaco paraguayo para la plantación de soja y de la intensificación del uso en la sabana estacional colombiana como una medida de desarrollo rural pactado a partir de los Acuerdos de Paz⁴.

Es así como, el objetivo de este libro es presentar las diferentes maneras de interpretar los datos del suelo, para proponer nuevas formas de pensar la ciencia del suelo, no como un elemento descriptivo o interpretativo orientado bajo unos propósitos ambientales o productivos, sino que dichos conocimientos se relacionen con los

⁴ Durante las conversaciones con la guerrilla de las FARC desde el 2012, el gobierno colombiano generó una nueva institucionalidad que estaba dirigida a cumplir con el acuerdo número uno firmado en el 2016. Los nuevos instrumentos de política que permitieron la ocupación de la sabana estacional colombiana con usos agrícolas intensivos materializan un nuevo proceso de territorialización que empezó con la redacción de los documentos del Consejo Nacional de Política Económica y Social – CONPES: 3797/2017, 3917/2018 y 3490/2018.

planteamientos sociales, económicos o políticos que propenden por un desarrollo territorial equitativo. Se pretende que estas experiencias sean base de inspiración para que nuevos investigadores se atrevan a generar preguntas y respuestas holísticas que conecten sitios, lugares, regiones y espacios globalizados. La geografía de suelos permite pensar en nuevas formas para proteger los suelos, decodificar los mensajes que llegan a manera de moda y que se adoptan sin una revisión conceptual y un análisis del discurso; la teoría crítica como eje de esta propuesta procura revelar lo que no es visible, que fue base para el nacimiento del concepto de degradación inducida, un efecto involuntario que está oculto en la cosecha de los productos de la tierra. A pesar de que los suelos cuentan con alta vocación para el uso agrícola, la pérdida de suelo lleva a la sociedad campesina a una disminución de su capacidad productiva y su empobrecimiento.

Carlos Enrique Castro Méndez

<http://orcid.org/0000-0003-3125-8349>

Júlio César Suzuki

<https://orcid.org/0000-0001-7499-3242>

Wladimir Mejía Ayala

<https://orcid.org/0000-0002-4091-9885>

(Orgs.)



CAPÍTULO I

DEGRADACIÓN INDUCIDA POR COSECHA DE PAPA. ANÁLISIS HISTÓRICO-GEOGRÁFICO

**DEGRADAÇÃO DE BATATAS INDUZIDA PELA COLHEITA. ANÁLISE HISTÓRICO-
GEOGRÁFICA**

**HARVEST-INDUCED DEGRADATION OF POTATOES. HISTORICAL-GEOGRAPHICAL
ANALYSIS**

**DEGRADACIÓN INDUCIDA POR COSECHA DE PAPA. ANÁLISIS HISTÓRICO-
GEOGRÁFICO**

Carlos Enrique Castro Méndez¹, Júlio César Suzuki² y Wladimir Mejía Ayala³

¹Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia

²Universidad de São Paulo, São Paulo, Brasil

³Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia e Instituto Geográfico Agustín
Codazzi, Bogotá, Colombia

Notas de autor

Carlos E. Castro M. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Estudios de posgrado en geografía, candidato a doctor en Geografía. Grupo de investigación Suelos y Ecología, Subdirección de Agrología. <https://orcid.org/0000-0003-3125-8349> cecastro77@gmail.com

Júlio Cesar Suzuki. Universidade de Sao Paulo e do Programa de Pós Graduacao (Mestrado e Doctorado) em integracao da America Latina (PROLAM/USP). <https://orcid.org/0000-0001-7499-3242> jcsuzuki@usp.br.

Wladimir Mejía Ayala. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Estudios de posgrado en geografía. Grupo de investigación GEOT. <https://orcid.org/0000-0002-4091-9885> wladimir.mejia@uptc.edu.co

CAPÍTULO I

Resumen: La gestión ambiental en América Latina se especializa en realizar diagnósticos y poco se hace en el control de la pérdida de suelos, donde se identifican varios tipos de degradación y no se reglamentan las prácticas de manejo; la sociedad se enfoca en declarar áreas protegidas y no controla la sobremecanización de las tierras. El análisis documental y los datos procedentes de las bases institucionales fueron utilizados para definir el marco del problema. Se aplicó un método comparativo regresivo en el que se analizaron resultados presentados por investigadores en la Unión Europea y se confrontaron con los resultados obtenidos de pérdida de suelo en el sector estudiado para identificar la magnitud del problema en tierras con uso adecuado a su aptitud. El objetivo específico de esta investigación es mostrar una aplicación práctica del concepto de degradación inducida de las tierras mediante la exploración de la forma de evaluar el efecto socioambiental ocasionado por la cosecha de tubérculos en un sector de la sabana de Bogotá. De acuerdo con estos resultados hubo degradación inducida de las tierras de la Sabana en el año 2005 debido a la siembra de papa de la variedad Parda Pastusa. La proporción de pérdida de suelo transportado en bultos fue de 4,0 ton/ha/cosecha lo que es equivalente a un bulto de suelo por cada tonelada de papa cosechada, de allí que el tema de investigación se centró en revisar el concepto de degradación inducida a nivel local y generar planteamientos teóricos relacionados con la “*erosión en costales*”.

Palabras clave: Degradación; Sabana; Cultivo de papa, Tierras, Suelos.

Abstract: Environmental management in Latin America specializes in making diagnoses and little is done in controlling soil loss, where various types of degradation are identified and management practices are not regulated; society focuses on declaring protected areas and does not control the over-mechanization of the land. Documentary analysis and data from institutional databases were used to define the framework of the problem. A regressive comparative method was applied in which results presented by researchers in the European Union were analyzed and compared with the results obtained on soil loss in the sector studied to identify the magnitude of the problem in lands with use appropriate to their suitability. According to these results, there was induced degradation of the lands of the Savannah in 2005 due to the planting of potatoes of the Parda Pastusa variety. The proportion of soil loss transported in packages was 4.0 ton/ha/harvest, which is equivalent to one package of soil for each ton of potato harvested, hence the research topic focused on revising the concept of degradation locally induced and generate theoretical approaches related to "erosion in sacks".

Keywords: Degradation; Savanna; Potato cultivation, Land, Soils.



CAPÍTULO I

Resumen: A gestão ambiental na América Latina é especializada em fazer diagnósticos e pouco se faz no controle da perda de solo, onde vários tipos de degradação são identificados e as práticas de manejo não são regulamentadas; a sociedade se concentra em declarar áreas protegidas e não controla a supermecanização da terra. Análise documental e dados de bancos de dados institucionais foram utilizados para definir o arcabouço do problema. Foi aplicado um método comparativo regressivo no qual os resultados apresentados por pesquisadores da União Européia foram analisados e comparados com os resultados obtidos sobre a perda de solo no setor estudado para identificar a magnitude do problema em terras com uso adequado à sua adequação. O objetivo específico desta pesquisa é mostrar uma aplicação prática do conceito de degradação da terra induzida explorando como avaliar o efeito socioambiental causado pela colheita de tubérculos em um setor da savana de Bogotá. De acordo com esses resultados, houve degradação induzida das terras do Cerrado em 2005 devido ao plantio de batatas da variedade Parida Pastusa. A proporção de perda de solo transportada em embalagens foi de 4,0 ton/ha/colheita, o que equivale a uma embalagem de solo para cada tonelada de batata colhida, por isso o tema de pesquisa se concentrou em revisar o conceito de degradação induzida localmente e gerar abordagens teóricas relacionadas à "erosão em sacos".

Palabras Clave: Degradação; Folha; Cultivo de batata, Terra, Solos.

INTRODUCCIÓN

La degradación inducida de las tierras es una manera diferente de analizar la relación paisaje-suelo y esto se logra a través de la inclusión de otras variables a las que tradicionalmente estudian los expertos en estas temáticas. La aplicación de tecnología cerrada a algunas variables no ha permitido pensar en la posibilidad de otros enfoques y, en otros contextos, se viene impulsando la utilización de imágenes de satélite acompañadas de algoritmos; también se utilizan elementos de análisis de estadística espacial ya incluidos en los Sistemas de Información Geográfica (Sig) a manera de caja negra, donde se ingresa un elemento y se aplican comandos para saber si la tierra tiene algún grado de erosión. Generalmente los sistemas llamados inteligentes tienen la finalidad de seguir algunos patrones que les enseñan los expertos y que sus sistemas replican con la ayuda de árboles de decisión que automatizan la interpretación (Celio, Koellner and Grêt-Regamey, 2014); esto genera poca oportunidad para pensar en otras formas de estudiar el problema de la degradación de las tierras.

CAPÍTULO I

En un sistema directo en el que interactúa el investigador a través del análisis de una imagen de satélite se puede percibir también los efectos del cambio de uso, siendo necesaria la verificación y la validación de los procesos geomáticos y mediante la aplicación de la mirada de experto, es posible deducir los efectos de la intervención de los seres humanos en el paisaje, y analizar históricamente, el cómo se produjeron los cambios que llevaron a la aparición de las capas internas del suelo cuando se dieron procesos erosivos intensos que denotan a simple vista una pérdida del suelo superficial; en otros casos, es necesario analizar el espesor de los horizontes superficiales, labor que requiere un trabajo de verificación en campo.

Es necesario realizar un repaso sobre el desarrollo conceptual de la temática de la degradación y para este caso se hacen dos grandes divisiones: una degradación tradicional que requiere del análisis desde los enfoques físico, químico o biológico del paisaje y del suelo; y la otra degradación denominada paradigmática que requiere enfoques social, económico o político. Cada una de estas formas de estudiar la degradación de las tierras requiere de instrumentos y métodos en los que es necesario que los investigadores se especialicen.

En el caso de la degradación biológica, ésta se produce por el aniquilamiento de los organismos benéficos del suelo debido a la carga excesiva de nutrientes, que inhabilita la función que tienen estos microorganismos de liberar nutrientes a la fase intercambiable del suelo y ocasiona la disminución de su fertilidad natural.

La otra corriente denominada para esta investigación como “paradigmática” es una propuesta que puede analizarse por su efecto manifiesto en el contexto local, siendo esta la más contradictoria debido a que se deriva de la planificación del uso basado en la política global que para este escrito apenas se deja esbozada (Figura 1).

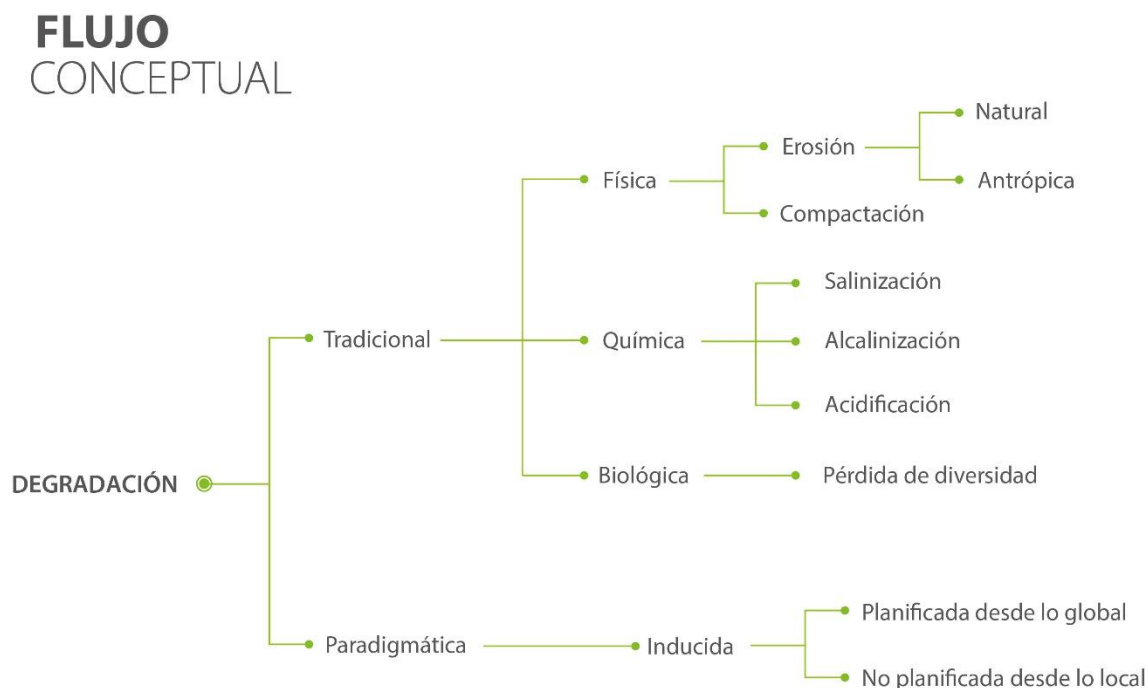
En el presente avance de investigación se analiza el efecto de una degradación paradigmática inducida desde el contexto local y con las mismas prácticas agronómicas que se aplican en cualquier parte del mundo. Esto muestra que todo uso planificado necesita incluir información sobre el riesgo que se corre cuando se implementa un uso agrícola intensivo.



CAPÍTULO I

Figura 1

Esquema Propuesto para el Análisis de la Degradación de las Tierras.



En cuanto a la degradación inducida desde lo global puede identificarse la intensidad mediante el estudio de la cartografía histórica que representa las miradas externas dirigidas desde las instituciones mundiales hacia los países de América latina. Durante el análisis se denotan cambios en la forma de observar estas tierras y también con ellas se identifican nuevas maneras para interpretar los suelos.

En las primeras representaciones se tiene la manifestación del clima en las coberturas vegetales denominadas bajo el concepto ambiental de *biomas* (Clements y Shelford (1939) y Moeller (2017)). En otras representaciones puede observarse que hay una nueva forma de clasificar las tierras, como un *hábitat* (Trefethen (1964) and Hall *et al.* (1997)), en el siguiente paso se realiza una representación de la *cobertura y el uso* IDEAM (2010); Melo y Camacho (2007); UPRA-IGAC (2015), y esto llevó a que en todos estos países impulsaran las investigaciones hacia las especies que tienen un valor comercial. Recientemente se creó una representación cartográfica en la que se especifica la *aptitud*

CAPÍTULO I

de uso agropecuario en donde se da prioridad a los usos agrícolas comerciales de estas tierras y se implementan a través de tipos de política que son similares en los países de América Latina (FAO, 1985; UPRA, 2013).

De ese modo con la combinación de criterios ambientales y productivos las delimitaciones cartográficas comienzan a entremezclar los temas, las *sabanas herbáceas* pasan a ser representadas como sabanas húmedas (WWF, 2019) y luego fueron denominadas como *sabanas monzónicas* que mantienen un período con abundantes lluvias y espacios secos prolongados (Alcaraz, 2012), hoy en día es llamada *sabana estacional* con base en la teoría del cambio climático (IAVH, INVEMAR, SINCHI e IIAP, 2007); finalmente aparece la representación de la sabana según su aptitud y se muestra la cartografía de espacios globales en donde las sabanas naturales son vistas como espacios útiles para la implementación de cultivos, pastos y bosques (López-Hernández, et al, 2005).

Para el caso de las áreas de sabana de Brasil denominadas localmente como *el cerrado* se establece en documentos oficiales que estas tierras son aptas para cultivos mejorados (Brunetto, 2007), mostrando así que el impacto que hay en la actualidad en estas tierras, se debe a la introducción de cultivos intensivos en estos ecosistemas del Brasil (Prager, A y Milhorange, 2018) y que además se encontraban programados desde cartografías que no se interesan en la verdadera vocación de las tierras y que fueron definidos desde los estamentos globales.

Las anteriores acciones cartográficas muestran el paso de un conocimiento adquirido basado en la identificación de las características distintivas del paisaje, la condición climática global y el tipo de cobertura hacia la aptitud de uso, siendo un camino explícito para la comercialización de lo natural.

En contradicción con esos cambios de usos propuestos y llevados a cabo para países como Argentina y Paraguay con los cultivos de soja y en Brasil con los cultivos de caña de azúcar enfocadas a la práctica del desarrollo territorial (Saquet, 2021), se presentan también desde la institucionalidad global la recuperación de áreas que ofrecen alternativas ambientales, como son los programas basados en el cambio climático en

CAPÍTULO I

donde los países de América latina firman compromisos para disminuir las emisiones de gases efecto invernadero derivadas del Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Naciones Unidas, 1992), o el programa de monitoreo de los procesos de desertificación que fijan la atención en las tierras semihúmedas, secas y semidesérticas (IDEAM, s.f).

En otro caso está la elaboración de estudios de la degradación de tierras en cada uno de los países latinoamericanos, caso colombiano (MINAMBIENTE, IDEAM Y UDCA 2015), caso de Argentina (Albarracín y Casas, 2015), Brasil (EMBRAPA, 2015) creados para definir el punto de partida o la línea base para comenzar a realizar los reportes de país en cuanto a los niveles de deforestación y avances de la degradación en estas tierras. El programa más reciente aplicado a los países latinoamericanos es el de Degradación Neutral de las Tierras - DNT (UNCCD, 2016), compromiso que es pactado con cada país para reservar algunas tierras aplicándoles medidas mínimas de conservación que pueden cumplirse ampliamente y que no tienen la intención de recuperar o de restaurar aunque se hayan degradado con la utilización de tierras debido a que superaron su capacidad de uso (Figura 2).

Figura 2

Aspecto de Tierras Semisecas de abanicos Subrecientes en el municipio de La Paz en el Departamento de Cesar, Colombia.



Autor. Carlos Castro, 2015.

CAPÍTULO I

La Figura 2 muestra tierras consideradas como centro de atención en el monitoreo de la degradación de tierras, que tienen como característica especial la presencia de fragmentos de suelos antiguos denominados “pedorelictos” procedentes de abanicos antiguos, localizados en un nivel más alto del terreno, en donde los suelos prácticamente se han perdido y en dicho paisaje subsisten abundantes fragmentos de roca que se consideran como parte de la estructura de la geoforma; estos nuevos suelos iniciaron un nuevo desarrollo pedogenético.

En la degradación inducida no planeada desde lo local se realiza primero un reconocimiento de las condiciones locales con investigaciones realizadas desde el mismo territorio, dado que las clasificaciones climáticas que se aplican en muchos casos han llegado desde otras latitudes (Agualimpia y Castro, 2016). A través de proyectos de investigación realizados en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas se revisó la determinación de los pisos térmicos mediante la aplicación del concepto de *gradiente de temperatura* en Colombia, que reunió las experiencias de varios investigadores en el tema de como varía espacialmente la temperatura en las vertientes montañosas de Colombia (Sturm y Rangel, 1985; Eslava, 1986; Flórez, 1986; Pinzón, 1989; Villaseca, 1990; Forsythe, 2002; Jiménez, 2008).

A partir de la revisión de los avances derivados de los anteriores investigadores se realizó la zonificación climática aplicada a levantamiento de suelos a partir de la delimitación de las zonas morfoclimáticas en Colombia, que permitió el acercamiento a la variabilidad espacial de la temperatura del aire y del suelo acorde con la posición en las vertientes, debido a la influencia de los cuerpos de agua, la incidencia de la luz solar y de los vientos (Agualimpia y Castro, 2018). Este desarrollo sirvió para identificar la zona que por su condición de temperatura óptima para el cultivo de papa podría analizarse como estudio de caso en la sabana de Bogotá.

Recientemente se involucró la delimitación de las zonas productivas y zonas ambientales, a través de la definición de la frontera agraria colombiana (MADR – UPRA, 2018) y esto motivó la necesidad de evaluar si las tierras bajo coberturas naturales

CAPÍTULO I

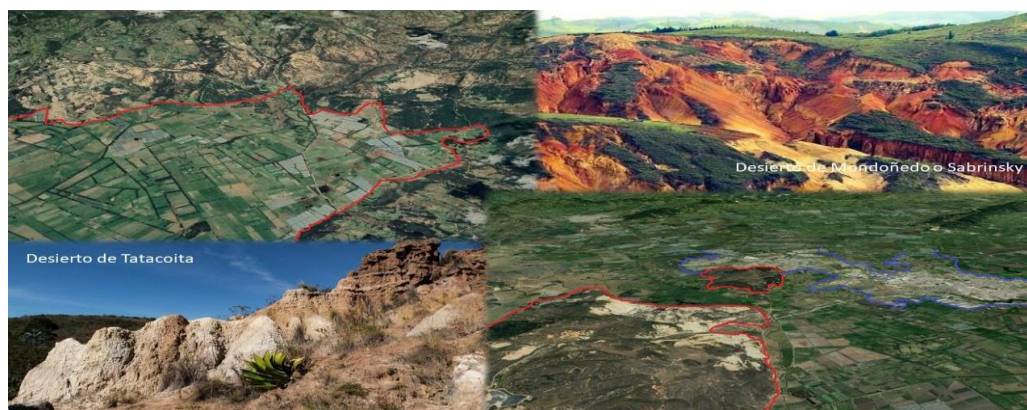
localizadas dentro de las zonas productivas agrarias, tienen baja resiliencia al cambio de uso (Castro, 2020).

La resiliencia desde el enfoque político tiene un componente económico porque busca la optimización del uso de la tierra; sin embargo, es importante revisar el aspecto relacionado con el componente social el cual debe ser tratado y discutido con las comunidades locales para manejo de las controversias territoriales.

Para dar claridad de cómo se manifiesta la resiliencia al cambio de uso en la sabana de Bogotá, se estudió el límite de las tierras productivas y para este caso se analizó el efecto de borde¹ o frontera entre ecosistemas, especialmente cuando las tierras planas se encuentran con relieves abruptos. La baja resiliencia al uso intensivo de la tierra se manifiesta con mayor fuerza en el borde del norte de la sabana en un área próxima a la zona denominada como el desierto de la Tatacoita y en el sector sur en espacios aledaños al desierto de Mondoñedo o también denominado de Sabrinsky (Figura 3).

Figura 3

Identificación de Efectos de Borde en la Sabana de Bogotá.



Fuente. Imágenes Google Earth, consultadas el 10 de marzo de 2021.

¹ El efecto de borde es entendido como una manifestación del cambio de uso de la tierra en dos ecosistemas disímiles, se culpa a la deforestación como uno de los mayores causantes de la formación de bordes con tierras que han perdido la sucesión vegetal, así como la desaparición del sotobosque debido a frecuentes incendios naturales o causados por las actividades de los seres humanos. En este borde degradado se modifican factores que regulan el proceso de acumulación orgánica y la generación periódica de biomasa vegetal. La biota descomponedora y otros organismos del suelo son sensibles a los cambios de temperatura que suceden luego del desmonte de las coberturas naturales.

CAPÍTULO I

La degradación inducida no planificada o local puede identificarse cuando se hace un estudio histórico-cultural para comprender el estado actual de los paisajes al incluir las historias de vida de los habitantes. Para el caso que se toma como ejemplo en la zona norte del altiplano de Bogotá hay un área que mantiene ese efecto, dichas tierras son susceptibles a la degradación e hicieron parte de un programa de recuperación de suelos en los años 80 y 90 como proyecto Checua (Zamudio y León, 2008).

Para ilustrar la degradación inducida local se muestra un avance de la investigación principal denominada “Degradación de tierras y usos agrícolas intensivos en la sabana estacional del sector Tillava-Los Kioscos en Puerto Gaitán, Meta, Colombia” (Castro, 2020), que incluye a la etnografía como elemento que permite relacionar los efectos y el uso inadecuado de los suelos con la narrativa local, a través de la problemática social que es común en la áreas rurales colombianas.

En ese sentido, desde los años cuarenta las familias numerosas tenían mayor posibilidad de aprovechamiento de la tierra; no obstante, contaban con pocas oportunidades de ahorro y poca posibilidad para ampliar sus predios. Cuando el padre fallecía, la finca era heredada por sus hijos y pasaba por un proceso de fragmentación, donde cada uno de los herederos daba un uso a la parcela de acuerdo con su capacidad de trabajo.

El predio analizado se ubica en el municipio de Nemocón, departamento de Cundinamarca, en tierras localizadas en clima frío seco distribuidas en laderas de lomas con pendiente superior al 12%.

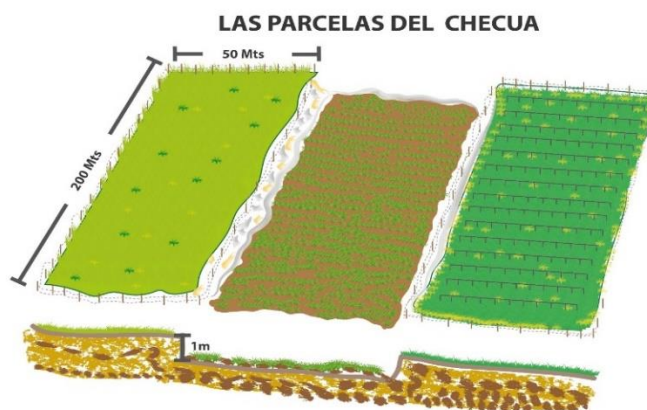
Al conocer la historia de vida de los moradores de la región y realizar la visita a los predios se concluyó que existe un uso intensivo de la tierra con el cultivo de papa durante un período de cuarenta años, que se manifiesta espacialmente en el desnivel respecto al terreno original que tuvo un uso en ganadería y cultivos tutorados (Figura 4).



CAPÍTULO I

Figura 4

Esquema de los Usos Diferenciados de Pastos, Cultivos de Papa y Cultivos Tutorados en Lotes de una Hectárea, en un Período de 40 Años.



Fuente: los autores.

Los otros usos un poco más conservadores denotan también un proceso de degradación aunque en menor intensidad que el cultivo de papa, si a esto se agrega que fue en un período de 40 años y el suelo presenta pérdida de la producción, en consecuencia si se le analiza socialmente se justifican los niveles de pobreza que hay en estas áreas del municipio de Nemocón en Cundinamarca.

En otros casos la cosecha de tubérculos en las zonas de páramo del municipio de Cogua en Cundinamarca ha traído consecuencias aún mayores que impactan no solo a una familia, sino a la sociedad dado que estas áreas regulan los recursos hídricos que mantienen el caudal base de los ríos. En este caso las pérdidas de suelo se traducen en la disminución de la capacidad de los suelos para retener altos volúmenes de agua lo que produce picos de crecientes en los ríos que nacen en estas vertientes montañosas durante los períodos de lluvias.

Para el desarrollo de esta investigación y con los antecedentes de una “erosión en costales” que es tomada socialmente como un efecto involuntario derivado de las actividades agropecuarias. Surge un interrogante que desvirtua la creencia de que la erosión solo es posible en terrenos de mayor inclinación y se plantea de la siguiente forma: ¿hay degradación por erosión en las tierras planas del altiplano de Bogotá?

CAPÍTULO I

Al margen de una posible erosión eólica causada por la preparación de tierras en la temporada seca, se trabaja la cuantificación de la *erosión en costales*, como algo que no se tiene previsto y que da lugar a otro tema de investigación como es el manejo de la cosecha de tubérculos en general, como una medida para minimizar el impacto del aprovechamiento de las tierras con este tipo de cultivo intensivo.

El objetivo específico de esta investigación es mostrar una aplicación práctica del concepto de degradación inducida de las tierras explorando una forma novedosa de evaluar el efecto socioambiental ocasionado por la cosecha de tubérculos en la sabana de clima frío.

Desde el punto de vista social las tierras deberían representar un beneficio para las comunidades locales y servir para cubrir las necesidades básicas alimentarias siempre y cuando las prácticas agrícolas no causen su deterioro. Para el caso de la cosecha de tubérculos es importante presentar nuevos planes de manejo y producir nuevas tecnologías que permitan el aprovechamiento sustentable de estas tierras.

MARCO TEÓRICO

La degradación inducida de las tierras se distancia de la degradación natural porque la segunda ocurre durante miles de años de manera normal, en tanto que la inducida ocurre en la escala de tiempo humana; esta propuesta hace referencia a una actividad programada y a veces mimetizada que se amplifica en la actualidad para los países en desarrollo y se presenta como un triunfo de la sociedad humana sobre la naturaleza, pues esta nueva forma de ver estos espacios, le permite al productor agrícola superar las limitantes naturales de los suelos y de posibilitar que estas tierras sean incluidas en los denominados *comodities* (Leff, Et al, 2002).

Cuando se aborda la problemática de la degradación desde la geografía es necesario incluir variables que van mas alla de identificar, categorizar y cuantificar tal como sucedió cuando en los países de América Latina se sugirió la generación protocolos y formas de monitoreo (FAO, PNUMA, UNESCO, 1979), sino que es necesario anticiparse a los hechos empezando por el análisis discursivo y desde el estudio de los elementos que

CAPÍTULO I

llevaron al incremento en los procesos de degradación de tierras en los países de América latina (Dregne y Chou, 1992).

Dos enfoques que ayudan a comprender mejor el proceso de la degradación que se manifiesta en la erosión de las tierras, se cimentan en las teorías de la geografía ambiental (Bocco y Urquijo, 2003) y la geografía crítica (Santos, 1993), dado que la primera permite identificar los aspectos físicos que se presentan cuando las tierras superan la capacidad natural para auto regenerarse (Oliver, Et al, 2015) y la geografía crítica que permite mover los cimientos de cómo se manifiesta el desarrollo económico en el paisaje y cuales son los efectos previstos en las sociedades campesinas de América latina (Leff, 1998).

Desde el punto de vista ambiental se toma como referencia la teoría proveniente del efecto de borde traído de la ecología del paisaje que según Murcia (1995), produce interacciones anómalas cuando se encuentran en los límites dos ecosistemas en una frontera invisible y que puede generar degradación de tierras cuando hay intervención de los seres humanos (Lal, 1997). Este concepto de borde también podría asumirse como la identificación de tierras con *baja resiliencia al cambio de uso* (Holling, 1973) ya sea en las actividades agrícolas o en las actividades urbanas, por el impacto que puede causar el cambio de coberturas vegetales y por la necesidad de crear espacios antropizados que modifican el hábitat de las especies que allí se reproducen.

Desde la geografía crítica es importante abordar el análisis de la sociedad natural ante un proyecto de desarrollo en el que es necesario incluir a la población local o que es nocivo para el ambiente debido a que genera fragmentación del hábitat y en aquellos sectores donde las condiciones de vida se tornan dependientes de la inversión económica (Santos, 2008).

Desde el análisis de la historia social y ambiental que sucede en Colombia (Meléndez, 2002) y que posiblemente se repite en latinoamérica, las sociedades campesinas encontraron en la tierra la forma de sustento familiar y desde los años sesenta incluso desde décadas anteriores las unidades familiares trabajaban en conjunto para obtener de la tierra las cosechas que requerían para su sustento (Ley 135 de 1961). Se tenía mayor oportunidad de trabajar la tierra si desde muy jóvenes se casaban y tenían muchos

CAPÍTULO I

hijos, pues era la mano de obra que requerían para integrar las tierras naturales a la producción. Este proceso de ocupación se realizaba a partir de la generación de nuevas tierras agrícolas, es decir, con la ampliación constante de espacios para la siembra. Algunas familias no pudieron generar ahorro para desplazarse a nuevas tierras y consecuentemente ocurrió la fragmentación de las tierras con la distribución de las mismas entre los herederos (Centro Nacional de Memoria Histórica, 2016).

La historia social entonces está ligada a los impactos ambientales que se muestran en Uruguay (De Castro y Lima, 2020) y en Colombia (Uribe y Perafán, 2020) para referenciar como ejemplo; la erosión es un proceso antrópico que puede estudiarse en las fronteras o límites indefinidos, denominados así a espacios en los que poco interés hay y en contraposición, están orientados a la generalización, tal es el caso del paisaje, algo que silencia lo local. En el presente se orienta a cuestiones denominadas ecosistemas. Esto debido a que cartografías temáticas de escalas grandes pueden identificar mayor cantidad de limitantes para el uso.

De acuerdo con Santacoloma-Varón (2015) los campesinos colombianos cuentan con bajas posibilidades de acceso a las técnicas agronómicas y su producción económica es deficiente; desde los años sesenta las unidades agrícolas familiares constituyen sociedades técnicamente atrasadas que no cuentan con la oportunidad de ahorro y esto se revierte en la presión por el uso continuado del suelo. Afirma también que las sociedades campesinas son vulnerables al cambio en el régimen de lluvias y esto hace que sus rendimientos sean dependientes de las condiciones ambientales y de la volatilidad de los precios de los productos del campo, con un margen de ganancias no permite reinvertir en ciclos productivos sucesivos dentro de su propiedad.

Las sociedades campesinas del borde de la sabana se consideran sistemas productivos marginales que dirigen su producción al autoconsumo y al abastecimiento de alimentos para la familia; además, los grupos familiares se ayudan entre sí a través de diversas actividades económicas que se localizan fuera de sus predios.



CAPÍTULO I

Experiencias y avances en el tema

Se plantea como procedimiento metodológico el análisis comparativo y regresivo en el que se analizan elementos históricos que pueden identificarse en el paisaje; se trata de huellas que se manifiestan como efecto de borde (límite entre fronteras productivas y ambientales) representa además el límite entre dos ecosistemas que son utilizados en la investigación para dar visibilidad a las áreas sensibles al cambio de uso bajo el concepto de “*tierras de baja resiliencia*” el procedimiento comparativo regresivo parte de hechos del pasado en este caso acontecidos entre 1990 y 2005 para identificar las características de las sabanas diferenciadas según el grado de fragilidad ambiental.

De acuerdo con observaciones detalladas derivadas del análisis histórico-geográfico obtenidas en campo, es posible saber anticipadamente cuál será la cantidad de suelo que se pierde por erosión cuando se establecen cultivos de tubérculos, como la remolacha o la papa. Algunas medidas preventivas aplicadas en Colombia se basaron en los efectos visibles derivados de la cosecha.

En Colombia se aplicaron medidas de protección a los suelos del departamento de Quindío debido a que se identificó el impacto del cultivo de yuca en zonas de ladera. La Corporación Autónoma Regional de Quindío – CRQ, en 1986 produjo un acuerdo donde definió el uso y manejo de los suelos dedicados al cultivo de yuca, debido al uso indiscriminado de las tierras en este caso bajo la modalidad de arriendo. Dicho acuerdo se realizó con el fin de disminuir la amenaza a la degradación en un área donde predominan los suelos derivados de ceniza volcánica.

Muchos de los monitoreos a la degradación se realizan sobre hechos consumados y se orientan al ofrecimiento de datos que siempre están en progreso continuo (Albuquerque, *et al.*, 2011); pocas veces dirigen las miradas a la prevención con la excepción de la Corporación Autónoma Regional del Quindío - CRQ que estableció medidas de protección al interior de su territorio al identificar los riesgos de establecer cultivos intensivos en paisajes susceptibles a la degradación.

Investigaciones realizadas por Panagos, Borrelli, y Poesen (2019) en el período 1975 – 2016 indican que los cultivos de remolacha y papa produjeron la mayor pérdida de suelo.



CAPÍTULO I

Los autores aseguran que entre 2000 y 2016, la papa y la remolacha, ocupaban una extensión aproximada de 4,2 millones de hectáreas y concluyeron que en la Unión Europea (Holanda, Bélgica y Luxemburgo) había 110 millones de hectáreas sembradas con tubérculos.

Acorde con los datos reportados por dichos investigadores, durante el período de dieciseis años, el uso intensivo de estas tierras produjo en promedio una pérdida de suelo de 7,33 ton/ha.

En países como Bélgica, Irlanda y en el noreste de Francia se acordaron políticas públicas para reducir la pérdida de suelo luego de que en 2006 se visualizó el problema y esto condujo a la disminución de áreas sembradas con remolacha azucarera.

También Panagos et al (2019) llegaron a la conclusión de que la tasa media de pérdida de suelo en terrenos cultivados por erosión laminar era de 2,67 ton ha⁻¹ y por erosión eólica de 0,53 ton ha⁻¹, mientras que la pérdida por erosión, según sus aproximaciones, fue de solo 0,13 ton/ha/año, dadas esas cifras, las acciones de planificación del uso se orientaron hacia la protección de la cobertura vegetal natural.

Los efectos negativos generados por la eliminación de la cobertura vegetal en países desarrollados como Estados Unidos y Francia tras el establecimiento de cultivos intensivos fueron plenamente identificados por investigadores como Lal (1997) y Oldeman (1994), aunque ellos plantean que las soluciones se encontraban en la implementación de prácticas de manejo y especialmente en el tratamiento de las aguas de escorrentía que se presentan a mayores pendientes, sus investigaciones se concentraron en el estudio y en el análisis dimensional de las laderas, ellos fijaron su posición en el dato que usualmente no es posible aplicar en un terreno debido a que la cartografía general escala 1:100.000 o semidetallada 1:25.000 no las contempla, tal es el caso de la longitud de la pendiente en donde las laderas varían entre muy cortas y largas.

En un intento por adicionar el costo de la erosión, se realizaron estudios en Holanda, Bélgica y Luxemburgo que permitieron dar inicio en el período de la apertura económica, a la evaluación de los proyectos de conservación de suelos y al impacto que causan los proyectos especialmente trataron el tema de rendimiento de agua en la cuenca y

CAPÍTULO I

puntualmente trabajaron en la distribución de agua y nutrientes dirigidos aguas abajo así como en los efectos de la deforestación y la sedimentación de los embalses (Land degradation & development, 1996).

La relación que hay entre la capacidad de uso de las tierras llamada también clase agrológica con la degradación de las tierras se sustenta en el tipo y cantidad de limitantes que tienen los suelos para los usos agrícola, ganadero, multiestratificado, forestal o de conservación; al aumentar el valor numérico de la clase agrológica disminuyen las posibilidades de usos y en su valor más alto, la clase agrológica 8, prevalece la conservación de los suelos y del paisaje.

Identificar los suelos agrícolas para reservarlos para ese uso específico se contempla en la aplicación del decreto 3600 de 2007; sin embargo, otra interpretación con enfoque ambiental podría incluir que al sobreutilizar los suelos en su capacidad de uso, se incrementa el riesgo a la degradación.

En el año 2010 en Colombia se reunieron el Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial, la Gobernación de Cundinamarca, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi para realizar la revisión de las clases agrológicas en un sector de la sabana de Bogotá adscrita a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. La intención era armonizar las decisiones del cambio de uso y ejercer el control a las tierras que se encontraba bajo la mira de los llamados parques industriales, las bodegas y las zonas aduaneras.

El resultado más importante luego de revisar las clases agrológicas en 14 municipios de la sabana de Bogotá (MADT, Gobernación de Cundinamarca, CAR, IGAC, 2012) muestra que al aumentar el nivel de escala de los levantamientos de suelos, hay una reducción en las áreas con aptitud para la agricultura; no obstante, se debe tener en cuenta que al identificar tierras improductivas para la agricultura se debe revisar también las tierras desde el enfoque ambiental y conocer la función ecosistémica, dado que hay una relación espacial entre tierras productivas y ambientales porque algunos suelos proveen de agua y elementos nutritivos a los cultivos (Castro, Agualimpia y Mejía, 2022).

CAPÍTULO I

Hay una presión de las empresas inmobiliarias para que se produzca la liberación de tierras que serían revalorizadas con los proyectos de vivienda exclusiva, que causa la fragmentación del paisaje del altiplano. Estos cambios territoriales pueden observarse en la construcción de encerrados y en la generación de espacios para bodegas que almacenarían las provisiones tecnológicas, industriales y en los centros de transacción de negocios que posibilitan la conectividad mundial.

La competencia por tierras planas para las labores agrícolas y para las viviendas exclusivas de la población colombiana pone en contraposición dos actividades esenciales en la vida de las poblaciones rurales: la provisión de alimentos y la fuente de trabajo.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

En relación con la degradación inducida desde lo local se presenta un caso práctico derivado de la cuantificación de la pérdida de suelo, partiendo de conceptos y actividades de investigación referenciadas en informes científicos que se aplican bajo el método comparativo regresivo y la utilización de datos oficiales que permiten su verificación.

El período de análisis abarca desde 1990 a 2005, dado que se cuenta con la trayectoria de investigación y el producto cartográfico del área sembrada con papa se representa a una escala semidetallada; se utiliza el método de zonificación climática aplicada a levantamientos de suelos (Aguilimpia y Castro, 2016) y se realiza una confrontación de datos de pérdida de suelos con los reportados con otros procedimientos para la Unión Europea. Además el rendimiento de los cultivos de papa dentro de la zona de referencia proviene de estudios realizados por Castro y Figueroa (1990), por tanto, el análisis comparativo regresivo se concentró en el período 1990 y 2005 y como referencia del fenómeno de erosión inducida no planificada se comparan resultados de Holanda, Bélgica y Luxemburgo (países bajos), con los datos encontrados para el sector de la provincia de sabana occidente en Colombia.

Uno de los problemas que genera la implementación del cultivo de papa es la intensificación de la erosión debido a la adherencia de suelo en cada tubérculo y en cada cosecha que se obtiene en estos lugares (Panagos, Borrelli y Poesen, 2019); esa cantidad

CAPÍTULO I

de suelo perdido puede estimarse si se calcula el volumen transportado durante la cosecha y traslado a las plazas de abastecimiento.

En otro sentido, y haciendo referencia a las labores normales de poscosecha hay un beneficio cultural si se deja el recubrimiento de suelo a los tubérculos, dado que el campesino puede almacenar su semilla sin salir del lote, en el caso de consumo doméstico, la papa tiene mayor grado de conservación y pierde menor humedad si se mantiene la superficie de la papa recubierta de suelo.

En trabajos relacionados con las necesidades de agua por tipo de variedad de papa desarrollado por Castro y Figueroa (1990), se encontró que las variedades de papa Chitagá, Monserrate, Puracé y Parda Pastusa tienen diferentes rendimientos frente a la aplicación de láminas de riego (desde 32 a 48 ton/ha de tubérculos); también que en cada una de estas cosechas hay una proporcionalidad de tamaños asociados con la calidad o el tamaño del tubérculo que van desde el 0 clase más grande a la 4 la más pequeña (Richie) (En la Tabla 1, se reconoce el tamaño y calidad en el comercio colombiano).

Tabla 1

Clasificación Comercial de la Papa de Acuerdo con el Tamaño Referido en el Diámetro.

Clasificación	Denominación	Diámetro (mm)
0	Muy Grande	Mayor a 90
1	Grande	65 a 90
2	Mediana	45 a 64
3	Pequeña	30 – 44

Fuente: Norma NTC 341

Hay una degradación incipiente y constante en las tierras debido al aprovechamiento de las tierras productivas para la agricultura que es poco visible; en ese sentido, la cosecha de tubérculos de papa supone la degradación física de las tierras. En términos generales una cosecha generada con menor cantidad de lluvia a la que requiere el cultivo conlleva una menor calidad de papa, es decir un predominio de tubérculos de

CAPÍTULO I

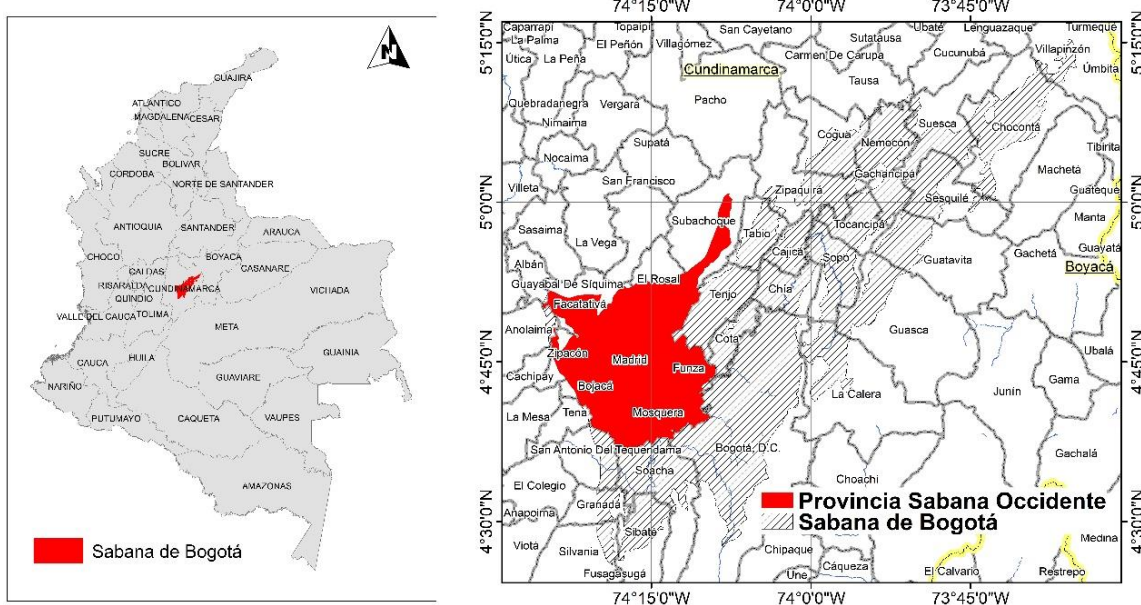
clase 3 o aún mas pequeños como la clase Richie y esto a su vez produce un incremento en la erosión mimetizada en costales, dado que hay un aumento en la superficie específica de la papa y una mayor posibilidad de degradación física debido a mayor volumen de suelo adherido en su cosecha. Estos efectos sobre la pérdida de suelo pueden observarse en las tierras del proyecto Chechua, antes ilustrados, en donde a 40 años de uso de las tierras con cultivos de dicho tubérculo, el desnivel del terreno es de aproximadamente un metro de profundidad, es decir, la pérdida de suelo es equivalente a un volumen de 10.000 m³ de suelo perdido por hectárea para la parcela visitada.

ÁREA DE ESTUDIO

Para el desarrollo en la práctica del concepto erosión inducida no planificada a nivel local se escogió como unidad de análisis la provincia sabana de Occidente en el altiplano cundiboyacense denominado también como sabana de Bogotá (Figura 5).

Figura 5

Localización de la Zona de Estudio en la Sabana de Bogotá, Cundinamarca, Colombia.



CAPÍTULO I

Se encuentra ubicada al occidente de la sabana de Bogotá en el departamento de Cundinamarca en Colombia y se caracteriza porque allí están los centros de investigación agropecuaria de Agrosavia, la Granja Tibaitatá y el Centro de Estudios de Marengo de la Universidad Nacional. La zona de estudio ocupa una extensión de 60.858.612 hectáreas y cubre los municipios de Facatativá, Bojacá, El Rosal, Funza, Madrid, Mosquera, Subachoque y Zipacón. Tiene áreas sembradas con papa debido a que están los suelos de alta calidad agronómica de Colombia y se caracterizan por ser profundos en más del 50% de su extensión, suelos derivados de cenizas volcánicas clasificados como Pachic Melanudands, medial isomésica con capa orgánica superficial de espesor mayor a 50 cm.

Adicional a la característica de suelos con poco impedimento en su profundidad efectiva, sus texturas son moderadamente gruesas generadas por la presencia de depósitos de cenizas volcánicas que cubrieron las arcillas lacustres, hubo un desarrollo específico para cada nivel de terraza lacustre que muestra la homogeneidad en gran parte del sector. Esto correlaciona perfectamente con las variaciones altitudinales y su relación con la temperatura del aire y del suelo.

Los suelos con mayor calidad agronómica para la papa se distribuyen en la terraza nivel dos con pocos metros de altitud en relación con los planos de inundación del río Bogotá. Aquí es importante el análisis climático local derivado de las investigaciones realizadas sobre zonificación climática aplicada a levantamientos de suelos (Aguilimpia y Castro, 2016) y adoptada por la Subdirección de Agrología (IGAC, 2021).

El análisis de gradiente de temperatura se obtuvo a partir del modelo de elevación digital más detallado disponible en la actualidad que es el Alos de 12 metros de celda, en el cual se aplicó la función de regresión temperatura - altura derivado de la correlación de datos de estaciones de la normal climatológica IDEAM más reciente (1981 – 2010) en la vertiente occidental de la Cordillera Oriental de acuerdo con Aguilimpia y Castro (2018):

CAPÍTULO I

$$TA = 29,711 + (-0,0061 \times h) \quad (\text{Fórmula 1})$$

Dónde:

TA es temperatura del aire

h es la altitud representada en el modelo de elevación (m)

La generación del raster de temperatura permitió identificar las tierras que por sus características agroclimáticas son óptimas para la siembra de papa. En ese sentido se tuvo como referencia la Tabla 2 que establece que a temperaturas promedio entre 12 y 14°C los cultivos de papa tienen un desarrollo normal, este sector es precisamente en donde se encuentran los centros de investigaciones agropecuarias antes mencionados.

Tabla 2

Temperaturas óptimas para el Desarrollo y Producción de la Papa.

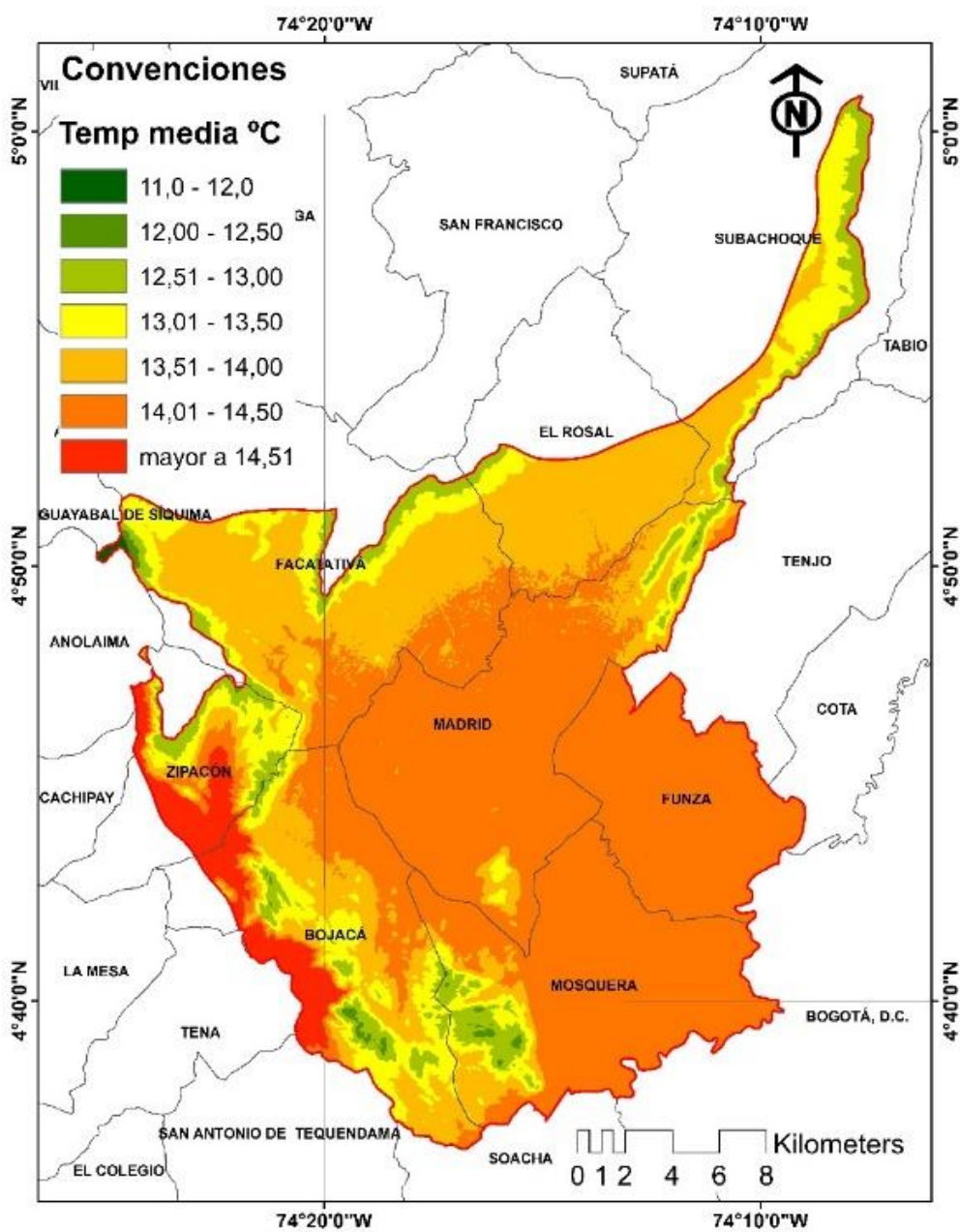
ETAPA	TEMP.°C
EN EL AMBIENTE	
Dos semanas después de la siembra	13
Desarrollo foliar	12 a 14
Elongación de tallo y floración	18
Formación de tubérculos	16 a 20
EN EL SUELO	
Emergencia y crecimiento foliar	21 a 24
Formación de tubérculos	15 a 24

Fuente. Zuñiga, et al (2017) citan a Rubio (2000).

CAPÍTULO I

Figura 6

Distribución Espacial de la Temperatura del Aire en la Provincia Sabana Occidente en la Sabana de Bogotá en Cundinamarca, Colombia.



CAPÍTULO I

Aplicando los conocimientos adquiridos en gradientes de temperatura se corrobora que el área municipal rural de los municipios de Mosquera, Funza y Madrid presentan las mejores condiciones bioclimáticas para el cultivo de papa, con valores promedio anual de temperatura del aire entre 14 y 14,5°C (Figura 6).

Con la utilización de otras herramientas gratuitas como el Google Earth se identificaron las áreas en donde se encuentran cultivos de papa y se les comparó con el mapa de distribución de la temperatura del aire. Además se consultó el mapa de cobertura y uso que tiene la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR (2005), para constatar esta información y se concluyó que los cultivos de papa en estos sectores son permanentes y presentan rotación con otros cultivos de la zona.

La información de uso de la tierra se presenta en diferentes niveles para este caso el mapa de cobertura se realizó a la escala 1:25.000 las categorías de uso reportadas allí se identificaron como *cultivos transitorios y/o permanentes* y en el informe se nombra los cultivos de papa presentes en una extensión de 3.260.42 hectáreas (Tabla 3).

De acuerdo con los trabajos de investigación realizados en el lote 52 de la granja Tibaitatá en Mosquera y las interpretaciones realizadas sobre las imágenes de Google Earth, se asumió que esta área estuvo conformada exclusivamente por cultivos de papa durante el período 1990 y 2005. Esta magnitud y extensión hace parte del análisis regresivo planteado al inicio en los procesos metodológicos y muestra la trayectoria de investigación realizada por los autores del presente capítulo en esta región.



CAPÍTULO I

Tabla 3

Estadística de Coberturas y Usos en la Provincia de Sabana Occidente en el Año 2005.

REGIONAL SABANA DE OCCIDENTE		
CÓDIGO	USO	ÁREA (Há)
BN	Bosque primario sin intervención o poco intervenido	1.113,54
Bp	Bosque plantado	3.548,28
BS	Bosque secundario	275,54
Bsp	Mosaico de bosque secundario y plantaciones dispersas	536,77
C	Cultivos transitorios y/o permanentes	3.260,42
Ca	Cuerpos de agua	7.791,66
Ed	Terrenos en preparación para siembras	239,03
Em	Terrenos degradados	3.604,61
Ma	Matorrales y arbustos	594,76
N	Nubes	21.041,58
Pa	Pajonales de páramo	6.618,09
Pb	Matorrales y frailejones	214,45
Pm	Pastos manejados	3.219,65
Pn	Pastos naturales	9.872,30
Sn	Sombras de nubes	51.477,35
Va	Vegetación acuática	1.225,75
Zu	Zona urbana	582,88
		115.216,65

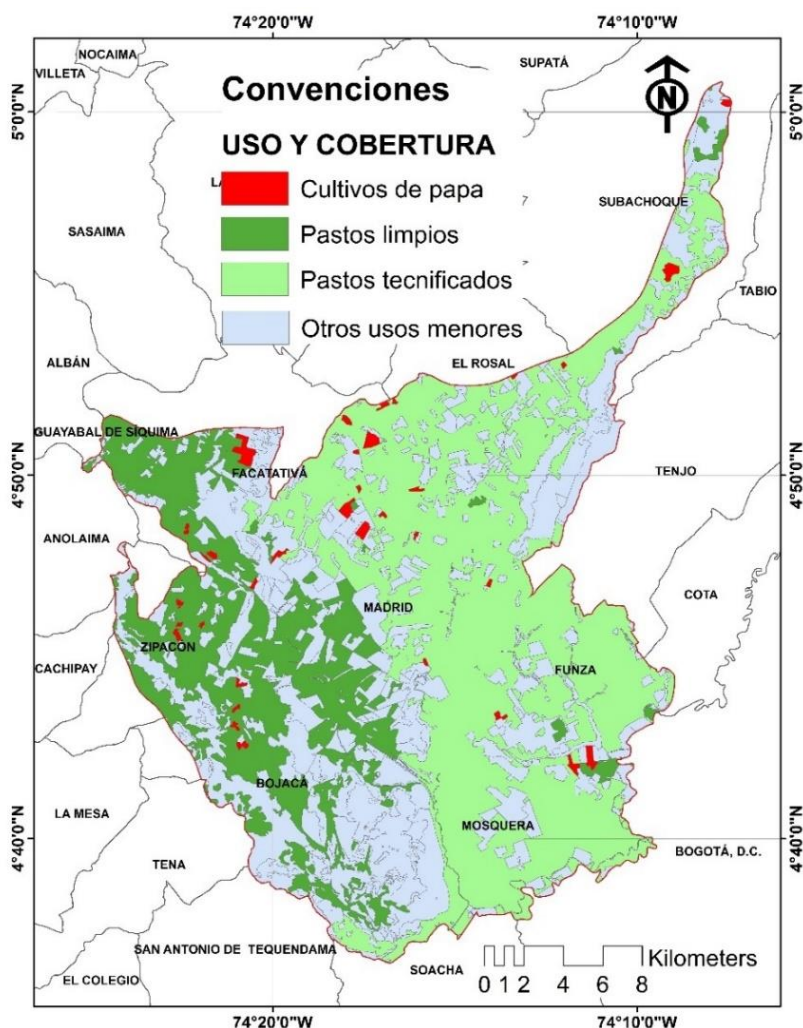
Fuente. Cartografía de Cobertura y uso CAR (2005).

CAPÍTULO I

En trabajos de investigación realizados por Castro y Figueroa (1990), se encontró que los cultivos de papa presentaban rendimientos máximos de acuerdo con la variedad de papa en función de las características climáticas entre las que se incluyen la temperatura y la humedad del suelo; en ese sentido, la variedad puracé tiene un rendimiento de 48.2 ton/ha, la monserate de 38.5, la chitagá de 38,0 y la parda pastusa de 32,1. Para esta investigación se considera el rendimiento como una variable importante para determinar la degradación inducida por prácticas culturales denominada de manera general como *erosión en costales*.

Figura 7

Distribución de los Cultivos de Papa en la Provincia de Sabana de Occidente.



Fuente: CAR, 2005.

CAPÍTULO I

En la Figura 7 se muestra que al sureste de la provincia de sabana occidente para el año 2005 en el municipio de Mosquera en donde se encuentran las instituciones de investigación agropecuaria con un bloque de producción de papa, sin embargo se observa que en los municipios del Rosal y de Facatativa se concentran las áreas más extensas de cultivos de papa, lo que muestra la localización de los suelos más profundos y aptos para este uso.

Para estimar la cantidad de suelo que se pierde por cosecha de cultivo de papa se ingresa otra variable que está relacionada con la superficie específica del producto agrícola y para el caso se tomó como referencia la norma colombiana de calidad de papa NTC (1969), que fue aplicada en la investigación realizada por Castro y Figueroa (1990) y se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Pérdida Anual de Suelo Derivado del Tamaño o Calidad de la Papa con un Espesor de Suelo de 0,5 mm por Tubérculo. (Fuente de datos: NTC, 341/69).

Clasificación	Denominación	Gramos de suelo por Kg de papa	Tipo de variedad	Rendimiento máximo (ton/ha)	Pérdida de suelo por cosecha (Ton/ha)	Pérdida anual de suelo en áreas de papa (Ton/ha)
0	Muy Grande	61,1	Parda pastusa	32,1	2,0	3,9
1	Grande	67,9	Monserate	38,5	2,6	5,2
2	Mediana	51,3	Chitagá	38,0	2,0	3,9
3	Pequeña	31,0	Purace	48,2	1,5	3,0
PROMEDIO		52,8				

$$SP = 4\pi r^2 \quad (\text{Fórmula 2})$$

Dónde:

SP es superficie de la papa

4π factor de superficie de la esfera

R^2 radio al cuadrado

CAPÍTULO I

En esta primera aproximación a la práctica de una investigación sobre *degradación inducida de las tierras por cosecha de tubérculos* se estima que la adherencia de suelos a la superficie del tubérculo depende de la composición del suelo, tales como los contenidos de arcilla ya que en suelos de texturas franco arcillosas es mayor la adherencia que en suelos de texturas francas; adicional a esto, los suelos derivados de cenizas volcánicas tienen mayor adherencia e incluso en investigaciones previstas a futuro podría tenerse en cuenta el estado de humedad del suelo durante la recolección, dado que el impacto aumenta si los cultivos de papa se establecen en tierras de temperaturas medias inferiores a 12°C, con humedad relativa alta variable que hace parte del análisis bioclimático característico de las zonas de páramo.

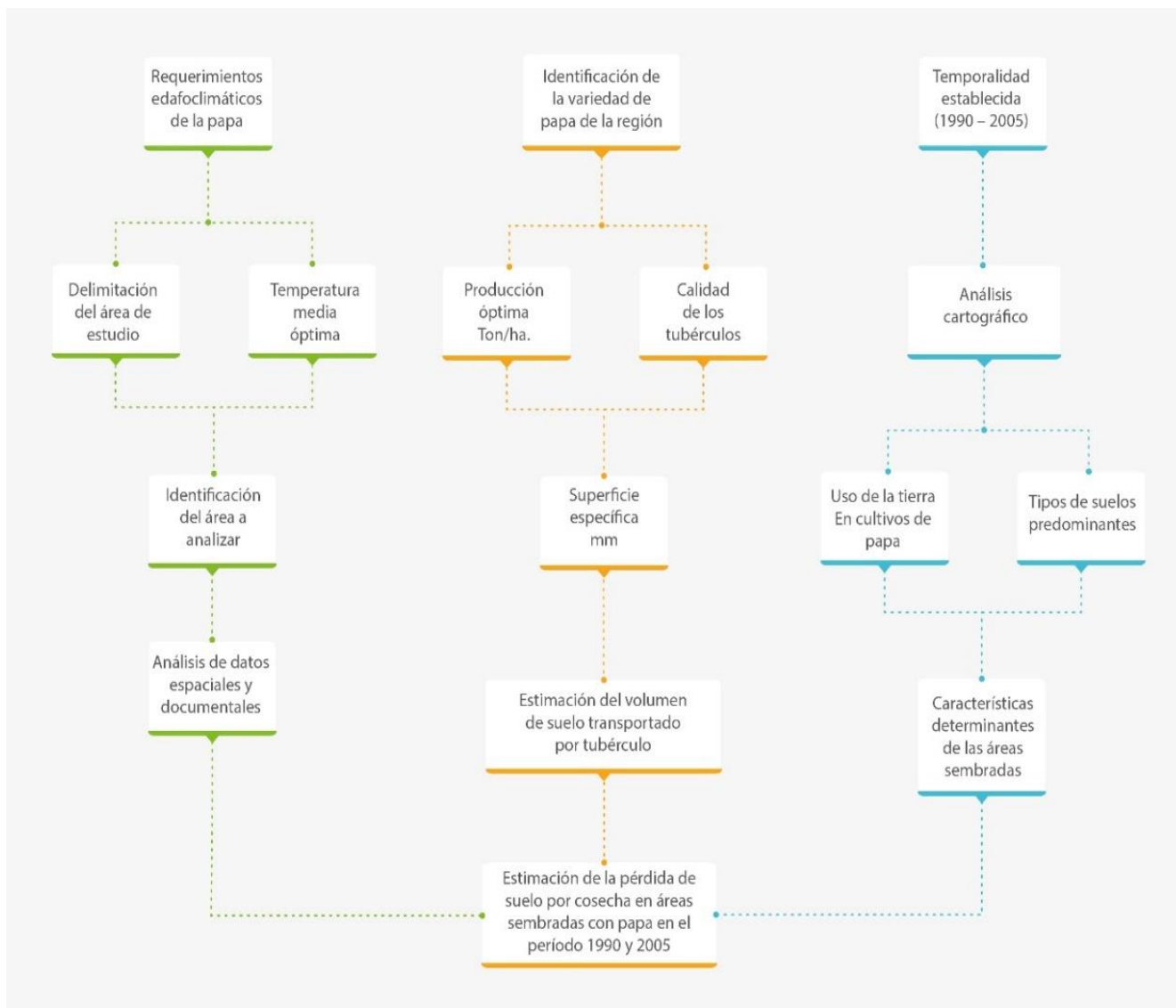
Es importante que los investigadores en suelos puedan generarse preguntas que tengan algún contenido sociocultural, se establece para este primer ejercicio conceptual una estimación de recubrimiento de suelo para un tamaño promedio de tubérculo, mediante técnicas combinadas, en ese sentido se tomó un espesor de 0,5 mm de suelo por tubérculo; es así como la superficie específica de cada tubérculo, se convierte en un dato importante para la cuantificación de la pérdida de suelo por cosecha (Tabla 4).



CAPÍTULO I

Figura 8

Esquema General del Procedimiento Aplicado en la Investigación.



En la Figura 8 se muestra en color verde las actividades realizadas para identificar el área representativa y el sitio en donde se recogieron los datos y la información documental, en la sección color naranja se muestran las actividades relacionadas con el cálculo del índice de erosión llevado a volumen de tierra adherido por tubérculo, en esta parte se aplican métodos cuantitativos y cualitativos representados en el tamaño de la papa y finaliza en la sección de la temporalidad identificada en el esquema en color azul,

CAPÍTULO I

donde se integra a la información el análisis regresivo, que consiste en el registro documental y cartográfico que aporta información espacial y cuantitativa. La integración de esta información permite estimar la pérdida de suelo por cosecha para el período de estudio 1990- 2005.

El procedimiento para estimar el volumen de tierra que se adhiere a la papa tuvo en cuenta el tamaño o calidad del tubérculo y para ello se aplicó la fórmula número 2 con la que se obtuvo la superficie promedio de la papa (SP).

Del producto de la superficie específica estimada de la papa según el tamaño y el dato asignado de 0,5 mm de recubrimiento de suelo se obtuvo el volumen de tierra adherido a cada tamaño de tubérculo, para el cálculo de la masa se obtuvo el valor promedio de la densidad aparente de los suelos muestreados (IGAC, CAR y MINAMBIENTE, 2012).

La otra variable cuantitativa aplicada en la investigación proviene de la Granja Tibaitatá en el sector con las mejores condiciones agroclimáticas. Se escogió al rendimiento de cada variedad, como un detonante de la cantidad de suelo que se pierde por cosecha.

En la tabla 4 puede observarse que para estimar la pérdida de suelo en costales se obtuvo la cantidad promedio de papa que según el tamaño suman un kilogramo y así se definió el número de papas que de acuerdo con la clasificación ICONTEC (1969) constituyen un bulto de 50 kg.

Se realizaron cálculos derivados de los datos promedio de las dimensiones que pueden obtenerse mediante la fórmula 2 que relaciona el tamaño del tubérculo con la adherencia de suelo al mismo y se obtuvo la cantidad de gramos de suelo que hay por Kg de papa según el tamaño de la misma.

De acuerdo con el rendimiento máximo de las cuatro variedades (Parda Pastura, Monserrate, Chitagá y Puracé) se concluye que para las variedades trabajadas hay una cantidad promedio de pérdida de suelo de 4,0 kg/ton/año. En consecuencia, la cantidad de suelo adherido en gramos por cada kilogramo de papa fue estimado en 52,8, lo que dicho en otros términos representa que en la cosecha de una tonelada de papa se sustrae un

CAPÍTULO I

bulto de suelo de 52,8 kg del terreno, es decir un indicador de aproximadamente un costal de suelo por cada tonelada cosechada de producto.

El siguiente paso fue calcular la pérdida total de suelo por unidad de área sembrada en el año 2005 en la provincia de Sabana occidente. El resultado de estimar la pérdida de suelo en un área de 3.260,42 has. sembradas con papa en la provincia de Sabana occidente fue de 14,3 toneladas de suelo durante este año.

Este índice de erosión puede aplicarse en un modelo de predicción diseñado para cada provincia y para otros tipos de tubérculos. Además, admite mejoramiento y en especial se pueden obtener datos puntuales que permitan realizar el monitoreo del uso; se trata entonces de un dispositivo novedoso que permite sugerir a los planificadores sobre la pérdida de suelos por la actividad agrícola y despertar una mayor atención al concepto de “*degradación inducida causada por las prácticas locales*”, se considera que este aporte al conocimiento es una herramienta que permite planear mejor las actividades agropecuarias y combatir los efectos del uso intensivo de la tierra con la implementación de nuevas propuestas de manejo y de recuperación de suelos. Este es el reto que deben enfrentar los nuevos expertos en suelos (Figura 9).

Figura 9

Suelo Adherido a la Papa en el Punto de Distribución de las Plazas de Mercado en Bogotá.



Fotografía. Carlos Castro, 2021.

CAPÍTULO I

Es necesario trabajar en otras formas de estimar la pérdida de suelo por cosecha para una variedad de tubérculos, ya que en esta investigación se empezó a trabajar con elementos históricos relacionados al cultivo de papa y con información documental referida a un período pasado con el fin de llamar la atención sobre la cantidad de suelo perdido desde ese tiempo hasta el presente.

El análisis comparativo de tipo documental refiere que en la Unión Europea el uso de la tierra con cultivos de tubérculos registraron una pérdida de 7.33 ton/ha/año, dentro de ese resultado Panagos et al (2019) dieron mayor peso a la erosión causada luego de la cosecha de tubérculos en el mismo sitio; en contraste con lo anterior en la provincia de Sabana occidente en Colombia se cuantifica una pérdida de 4,0 ton/ha/año que exclusivamente hace referencia a la tierra que recubre los tubérculos de papa, sin tener en cuenta la erosión en el sitio, tanto por escurrimiento laminar difuso o por la erosión eólica que también está presente.

Parte de esta investigación tuvo un componente cualitativo que permite explicar como se distribuye este impacto de la cosecha dentro de la ciudad. En primer lugar la observación realizada en la plaza mayor de abastos en la capital y en las plazas de mercado de la ciudad de Bogotá muestra que la cantidad de suelo adherido a los tubérculos se van desprendiendo en la medida que se recolecta en los sitios de siembra, se transporta a las tiendas mayoristas y luego a los mercados minoristas, por lo que la tierra que recubre los tubérculos se estimó con observaciones realizadas en las plazas de barrio.

En segundo lugar esta la cultura distribuída en estratos sociales donde se encontró que en los sectores sur y noroccidental de Bogotá predomina la venta de papa sin lavar, en comparación con la papa lavada que es ampliamente comercializada en el sector noreste de la capital; en el sector norte prefieren la papa lavada, cortada, empacada y precocida. Indagando con las señoras del sector sur de la ciudad, prefieren la papa sucia porque se conserva mayor tiempo, también manifiestan que evitan la refrigeración porque la papa se torna más dulce y no es agradable al paladar.



CAPÍTULO I

CONSIDERACIONES FINALES

Es posible llevar a la práctica el conocimiento científico de una degradación inducida por acción involuntaria, lo que demuestra que generar un cambio de uso de la tierra a sistemas productivos intensivos, incrementa los riesgos de degradación si el cultivo que se implementa es una variedad de tubérculo, dado que como se observó durante la investigación en Colombia, hay un deterioro visible tomado como referencia en las parcelas del Checua el cual fue comparado con el índice de pérdida de suelos por cosecha de papa en un sector cercano al borde norte de la sabana de Bogotá en el municipio de Nemocón.

La degradación inducida no planificada desde lo local de acuerdo con el índice de pérdida de suelo puede producir la salida y el transporte de suelo en costales en una proporción de un costal de 50 kg de suelo por cada tonelada de papa cosechada.

La variedad que presenta mayor producción tiene un mayor índice de degradación de las tierras debido a que a mayor cantidad de producto agrícola, hay mayor superficie de tubérculo y sobre él se adhiere mayor cantidad de suelo.

En la provincia de Sabana Occidente la erosión promedio transportada en costales de las variedades estudiadas fue de 4.0 ton/ha., mientras que en Bélgica, Holanda y Luxemburgo los investigadores Panagos et al (2019) reportaron una pérdida de 3,33 ton/há.

De acuerdo con los datos de CAR, 2005 (3.260,42 ha con papa) en la Provincia de Sabana Occidente se estima que se perdieron 13,3 toneladas de suelo durante el 2005 debido a la cosecha de ese cultivo.

De acuerdo con esa información hay tubérculos que causan mayor erosión en costales, uno de ellos puede ser el cultivo de yuca, por tanto se sugiere estudiar la intensidad de la erosión de acuerdo con la especie de tubérculo implementado.



CAPÍTULO I

REFERENCIAS

- Agualimpia, Y. y Castro, C. (2016). Propuesta metodológica para la zonificación climática a diferentes escalas en Colombia, con fines de manejo sostenible del territorio. Fase I. Bogotá: Centro de investigaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (CIUD). Grupo de investigaciones Programa de Gestión Ambiental en Servicios Públicos (PROGASP- GAIA).
- Agualimpia, Y. y Castro, C. (2018). Zonas morfoclimáticas de Colombia: un aporte a la correlación entre el clima ambiental y el régimen climático del suelo. Agua y ambiente. Experiencias y reflexiones frente al desarrollo sostenible y sustentable. Colección Tierra y Vida. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. (pp. 13-30).
https://www.researchgate.net/publication/329119028_Definicion_de_las_zonas_morfoclimaticas_de_Colombia_un_aporte_a_la_correlacion_entre_el_clima_ambiental_y_el_regimen_climatico_del_suelo.
- Albarracín, G. F. y Casas, R. (2015). El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. Erosión y degradación de suelos. Editor FECIC, Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura. 2015.
- Albuquerque, J. A., Almeida, J. A., Gatibon, L. C. y Altz, F. (2011). Atividades agrícolas de producao em solos frágeis no sul do Brasil. En Trópicos em ciencia do solo. Vicosa, M. G: sociedade Brasileira de Ciencia do solo, V. 7, 201 pp. 1367 – 403.
- Alcaraz, F. J. (2012). Bosques monzónicos y sabanas. Universidad de Murcia. Geobotanica, Tema 23. España. 12 p. Consultado el 12 de enero de 2021.
<https://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema23.pdf>
- Bocco, G. y Urquijo, P. (2013). Geografía ambiental: reflexiones teóricas y práctica institucional. Región y sociedad, 25(56), 75-102. Recuperado en 02 de mayo de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252013000100003&lng=es&tlng=es.

CAPÍTULO I

- Brunetto, E. (2007). Reforma agraria en Brasil: por justicia social y soberanía popular. La vía Campesina. Movimiento Campesino Internacional. 19 de abril de 2007. Consultado el 3 de enero de 2021. <https://viacampesina.org/es/reforma-agraria-en-brasil-por-justicia-social-y-soberanpopular/>
- Castro, C. E. y Figueroa, E. (1990) Simulación agua - producción para el manejo óptimo del agua en cuatro variedades de papa. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, investigación realizada bajo el programa manejo de aguas del Instituto Colombiano agropecuario ICA - Tibaitatá. Bogotá. 199 p. https://www.academia.edu/31990086/SIMULACION_AGUA_PRODUCCION_PARA_EL_MANEJO_OPTIMO_DE_AGUA_EN_CUATRO_VARIETADES_DE_PAPA_pdf
- Castro, C. E. (2020). Globalización y resiliencia en la Sabana estacional de Puerto Gaitán, Meta, Colombia: reflexiones teóricas y metodológicas. En *Cadernos PROLAM/USP* 19(38):264-287. DOI: 10.11606/issn.1676-6288.prolam.2020.173228. <https://www.revistas.usp.br/prolam/article/view/173228/167611>
- Castro, C., Agualimpia, Y. y Mejía, W. (2022). Las sabanas como espacios agrícolas y de vivienda exclusiva. *Novos paradigmas e novos modelos de acao ¿do global ao local ou locais ao global?. Organizadores André Santos da Rocha, Marcos Aurelio Saquet y Daniela Grignoli. Letra Capital Editores. pp. 149 – 172. Consultado el 12 de enero de 2021.*
- Celio, E., Koellner, T. y Grêt-Regamey, A. (2014). Modeling land use decisions with Bayesian networks: Spatially explicit analysis of driving forces on land use change. *Medio ambiente. Modelo. Suave.* (pp. 52, 222–233).
- Centro Nacional de Memoria Histórica. (CNMH, 2016). *Tierras y conflictos rurales. Historia, políticas agrarias y protagonistas*, Bogotá. 692 p.
- Clements, F. Shelford, V. (1939). *Bio-ecology*. New York, J. Wiley & Sons; London, Chapman & Hall. 425 p. consultado en: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/28816#page/1/mode/1up>

CAPÍTULO I

Congreso de Colombia (1961). *Ley 135 de 1961. Sobre reforma agraria*. Rama Legislativa.

Consultado en:

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=74153>

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR, 2005). Mapa de cobertura y uso de la tierra. Escala 1:25.000. Bogotá.

De Castro, P. S. Lima, R de C. O (2020). paradigma produtivo que engoliu o pioneirismo da reforma agrária uruguaia em prol do direito inalienável da propriedade individual. En Dinâmicas Espaciais Latino-Americana. FFLCH-USP 2020. Série: Diálogos Interdisciplinares. pp.74-93.

Dregne, H. E; Chou, N. T. (1992). "Global Desertification, Dimensions and Cost. In Degradation and Restoaration of arid áreas. Lubbock Texas Tech. University.

EMBRAPA (2015). Solos Frágeis. Caracteizacao, manejo e sustentabilidade. Selma Simoes de Castro, Luis Carlos Hernani editores técnicos. Embrapa. Brazilia. 366 p.

Eslava, R. (1986). Los climas de Colombia (Sistema de Caldas-Lang). Sociedad Colombiana de Meteorología. En: Atmosféra. Bogotá. No.07 [Mar. 1986]; p. 41-77.

Flórez, A. (1986). Relación altitudinal de la temperatura del suelo y del aire en los andes centrales de Colombia. Revista Colombia Geográfica XII (2). Bogotá: IGAC 1986. pp. 5 – 38.

Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, 2019). Grandes logros 2019: Sabanas y Pastizales. WWF. 20 diciembre 2019. Accedido en: 18 dic.2020. Disponible en: https://www.wwf.org.co/about_us/

Forsythe, W. (2002). Parámetros ambientales que afectan la temperatura del suelo en Turrialba, Costa Rica y sus consecuencias para la producción de Cultivos. En Agronomía Costarricense 26 (1): 43-62. 2002.

Holling. C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. En Annual Review of Ecology and Systematics, Vol. 4 (1973), pp. 1-23 Stable. consultado el 30 de julio de 2017. URL: <http://www.jstor.org/stable/2096802>

CAPÍTULO I

Instituto Alexander Von Humboldt (IAVH), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés (INVEMAR), Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI) e Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2007. *Ecosistemas continentales, costeros y marinos*, Bogotá, D.C.: Imprenta Nacional de Colombia. + 1 CD-ROOM, 37 planchas.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, s.f.). Programa Nacional de Monitoreo y Seguimiento de la Degradación de los Suelos y las Tierras. Consultado el 2 de noviembre de 2020. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/siac/suelomonitoreo>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2010). Leyenda nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine land cover, adaptada para Colombia. Bogotá. 72 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). *Instructivo de Zonificación climática para levantamiento de suelos*. Código: IN-GAG-PC05-13. Vigente desde: 11/05/2021. Consultado en: https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/in-gag-pc05-13_zonificacion_climatica_para_levantamiento_de_suelos.pdf

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MINAMBIENTE). (2012). Levantamiento Detallado de Suelos en Áreas Planas de 14 Municipios de la Sabana de Bogotá. Escala 1:10000 Subdirección de Agrología. Bogotá, 492 p.

Jiménez, L. C. (2008). *Relación entre temperatura estabilizada del suelo y la temperatura del aire. En la cordillera oriental colombiana Transecto Sumapaz* (volumen 7). Los estudios de los ecosistemas Tropoandinos. pp 185 – 201.

Hall, L.S., P.R. Krausman y M.L. Morrison. (1997). *The habitat concept and a plea for standard terminology*. Wildlife Society Bulletin 25:173–182.

CAPÍTULO I

Lal, R. (1997). *Soil degradative effects of slope length and tillage methods on alfisols in western nigeria. I. Runoff, erosion and crop response*. School of Natural Resources, The Ohio State University, Columbus. Land degradation & development, vol. 8, 201±219.

Land degradation & development. The price of soil erosion: an economic evaluation of soil conservation and watershed development, Mansholt Studies 3, J. de Graa. Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, 1996. VOL. 9, 543 – 545.

Leff, E (1998). *Saber ambiental sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder*. PNUMA, Siglo XXI editores. México. 285 p.

Leff, E., Ezcurra, X., Pisanty, I. y Romero, P. (2002). *La transición hacia el desarrollo sustentable. Prospectivas de América Latina y el Caribe*. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales.

López-Hernández, Danilo, Hernández-Hernández, Rosa Mary & Brossard, Michel. (2005). *Historia del uso reciente de tierras de las sabanas de américa del sur. Estudios de casos en sabanas del orinoco*. Interciencia, 30(10), 623-630. Consultado en 01 de mayo de 2022, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005001000008&lng=es&tlng=es

MELÉNDEZ, Si. “*La historia ambiental: aportes interdisciplinarios y balance crítico desde América Latina*”. En: Cuadernos Digitales: *Publicación electrónica en historia, archivística y estudios sociales*, Vol. 7, No. 19, Noviembre 2002. 9 p.

Melo y Camacho (2007). *Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca, Metodología Corine Land Cover Adaptada para Colombia*, escala 1:100.000, IDEAM, IGAC, CORMAGDALENA.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). (2018). *Identificación General de la Frontera Agrícola en Colombia*. Escala 1:100.000. versión 1.0. Bogotá. 61 p.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MINAMBIENTE), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

CAPÍTULO I

- Ambientales (IDEAM) y Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA). (2015). *Estudio Nacional de la degradación de suelos por erosión*. Consultado el 10 julio de 2020. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023648/Sintesis.pdf>
- Moeller, Karla (2017, May 31). *Biomass sin límites*, (Enith Sifuentes, Trans.). ASU - Ask A Biologist. Retrieved March 8, 2020 from <https://askbiologist.asu.edu/biomass-sin-l%C3%ADmites>
- Murcia, C. (1995). *Edge effects in fragmented forests: implications for conservation*. Trends in Ecology and Evolution 10(2): 52- 62.
- Norma Técnica Colombiana (NTC)-341. Industria alimentaria. Papa para consumo. Especificaciones del empaque. 1996 – 06 – 19. Bogotá, 21 p. Consultado el 15 de febrero de 2021. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-industria-alimentaria-papa-para-consumo-especificaciones-del-empaque-ntc341-2-1996.html>
- Oldeman, L. R. (1994). *The global extent of soil degradation*, pp. 99±118 in D. J. Greenland and I. Szabolcs (eds.) Soil Resilience and Sustainable Land Use, CAB International, Wallingford.
- Oliver, T., Heard, Isaac, N., Roy, D., Procter, D., Eigenbrod, F., Freckleton, R., Hector, A., Orme, D., Petche, O., Proença, V., Raffaelli, D., Suttle, B., Mace, G., López, B., Woodcock, B. and Bullock, J. (2015). *Biodiversity and Resilience of Ecosystem Functions*. Trends in Ecology & Evolution, November. 30 (11) pp. 673 – 684.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU, 1992). Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). 1979. *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma. 74 p.

CAPÍTULO I

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1985)

Evaluación de tierras para la agricultura de regadío. Casos prácticos. *Informe de la sexta reunión del Subcomité de Correlación de Suelos y Evaluación de Tierras de África Occidental y Central*], FAO, Roma (Italia). Desarrollo de Tierras y Aguas Div. - Roma (Italia): FAO, 1985.- ISBN 92-5-202277-5. pp. 148-157.

Panagos, P., Borrelli, P. y Poesen, J. (2019). *Pérdida de suelo debido a la cosecha de cultivos en la Unión Europea: una primera estimación de un proceso geomorfológico subestimado*. La ciencia del medio ambiente total. 664: 487-498. DOI: 10.1016 / j.scitotenv.2019.02.009

Pinzón A. (1989). *Temperatura edáfica del páramo de Sumapaz*. Suelos ecuatoriales Vol 19. No 1. (Julio de 1989). pp. 41 – 47.

Prager, A y Milhorance, F. (2018). El Cerrado: ¿puede coexistir el imperio de la soya con la conservación de la sabana de Brasil?. En Mongabay. Periodismo ambiental independiente en Latinoamérica. 10 de julio de 2018. Consultado el 12 de enero de 2021. Disponible en: <https://es.mongabay.com/2018/07/brasil-la-soya-en-el-cerrado/>

República de Colombia. (2007). Decreto No. 3600 20 de septiembre de 2007. *Por el cual se reglamentan las disposiciones de las Leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones*. Rama Ejecutiva. Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo Territorial. Bogotá. 12 p.

Rodríguez, M. y Mance, H. (2009). *Cambio Climático: lo que está en juego*. Fondo Nacional Ambiental. Bogotá. 73 p.

Santacoloma-Varón, Luz Elena. Importancia de la economía campesina en los contextos contemporáneos: una mirada al caso colombiano. En: Entramado. Julio - Diciembre, 2015 vol. 11, no. 2, p. 38-50. Disponible en <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2015v11n2.22210>

CAPÍTULO I

Santos, Milton (1993). Los espacios de la globalización. Anales de Geografía de la Universidad Complutense, Núm. 13, Servicio de Publicaciones, Universidad Complutense. Madrid, 1993, pp. 69-77. Consultado en: http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/mcheca/teoria_geografica/LECTURA_36.pdf

Santos, M. (2008). *Economía Espacial. Críticas e alternativas*. Traducción Maria Irene de Q. F. Szmrfcsanyi. Editorial Universidad de São Paulo- edUSP. Brasil. 203 p.

Saquet, M. A. (2021). Conciencia de clase y de lugar, Praxis y Desarrollo territorial. CLACSO. Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales. Rio de Janeiro, Brasil. 295 p.

Sturm y Rangel. (1985). Ecología de los páramos andinos: una visión preliminar integrada. UNBogotá, pp. 19 – 33.

Trefethen, J.B. (1964). Wildlife management and conservation. D.C. Heath & Co, Boston.

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA, 2013). Evaluación de tierras para la zonificación con fines agropecuarios a nivel nacional metodología a escala general 1:100.000. Bogotá. 111 p.

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) - Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2015). *Leyenda de usos agropecuarios del suelo*. Bogotá. 136 p.

United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD, 2016). *Neutralidad de la Degradación de las Tierras. Programa de Establecimiento de Metas*. Guía técnica. Consultado el 20 de noviembre de 2021. Disponible en: https://knowledge.unccd.int/sites/default/files/2018-08/LDN%20TS%20Technical%20Guide_Draft_Spanish.pdf

Uribe, H., Perafán, A. (2020). *Historia ambiental de la agroindustria cañera en el valle del río Cauca*. Colección investigación. Universidad del Valle y Universidad Autónoma de Occidente. Cali, Colombia. 167 p. Consultado el 1 de mayo de 2022. Disponible en:

CAPÍTULO I

https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/13216/Historia_ambiental_de_la_agroindustria_ca%C3%B1era_en_el_Valle_del_r%C3%ADo_Cauca.pdf

Villaseca S. (1990). La temperatura del suelo. En agricultura técnica (Chile) 50 (2) 155 – 160 (Abril– junio de 1990). pp 155 – 160.

Zamudio, C. y León, T. E. Transferencia y adopción de prácticas de agricultura de conservación. *En Gestión y Ambiente*. Vol 11 No. 2. Agosto de 2008, pp. 149 – 162. Consultado 16 de mayo de 2021. Disponible en: https://redcol.minciencias.gov.co/vufind/Record/UNACIONAL_e3f063a1a4b8310a8f7fcb98194d8e19

Zuñiga Chila, S., Morales Espinoza, C. y Estrada Martínez, M. (2017). *Cultivo de la papa y sus condiciones climáticas*. *Gestión Ingenio y Sociedad*, 2 (2), 140-152. Consultado de <http://gis.unicafam.edu.co/index.php/gis/article/view/60>



CAPÍTULO II

PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN LA EVOLUCIÓN DE LOS PAISAJES DE SABANA EN LA ALTILLANURA DE COLOMBIA

PROCESSOS HIDROGEOQUÍMICOS NA EVOLUÇÃO DAS PAISAGENS DE SAVANA NAS
PLANÍCIES DA COLÔMBIA

HYDROGEOCHEMICAL PROCESSES IN THE EVOLUTION OF SAVANNAH LANDSCAPES
IN THE HIGHLANDS OF COLOMBIA

PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN LA EVOLUCIÓN DE LOS PAISAJES DE SABANA
EN LA ALTILLANURA DE COLOMBIA

Sergio Gaviria Melo

Notas de autor

Sergio Gaviria. Doctor en Pedología, Universidad de Nancy, Francia. Profesor pensionado, Universidad Nacional de Colombia, <https://orcid.org/0000-0003-0751-7419> sgaviriam@gmail.com



CAPÍTULO II

Resumo: Os Llanos da Colômbia são uma extensa região de savana tropical que se estende do pé dos Andes até o rio Orinoco. A altillanura é o bloco separado da planície por uma escarpa, com Oxisols desenvolvidos ao longo de milhares de anos em detrimento de um antigo material aluvial de lodo de argila. Os solos foram lavados pela água da chuva, sem receber novos insumos minerais. Atualmente, sob clima úmido com estação seca muito acentuada, sofrem hidromorfia temporária devido ao escoamento da subsurreição com dissolução de ferro, degradação de minerais que acumulam alumínio e perda de argilas. Na faixa de flutuação do mesa de água são formados nódulos ferrugídeos endurecidos que preservam minerais herdados e formam um nível de plintita em uma matriz de quartzo. A porosidade criada pela hidrogeoquímica induz o afundamento do cano de água e dissecação da paisagem. Enriquecimentos posteriores da matriz com ferro, cimentam o plintite em crostas que fossilizam a paisagem.

Palavras-chave: Folhas; Oxisols; Hidromorfia; Óxidos de ferro; O Clays.

Abstract: The Llanos of Colombia are an extensive tropical savannah region that stretches from the foot of the Andes to the Orinoco River. The altillanura is the block separated from the plain by an escarpment, with Oxisols developed over thousands of years at the expense of an ancient silt-clay alluvial material. The soils have been washed by rainwater, without receiving new mineral inputs. Currently, under humid climate with a very marked dry season, they suffer temporary hydromorphy due to sub-surface runoff with iron dissolution, degradation of minerals that accumulate aluminum and loss of clays. In the fluctuation strip of the water table hardened ferruginous nodules are formed that preserve inherited minerals and form a level of plintite in a quartz matrix. The porosity created by hydrogeochemistry induces sinking of the water table and dissection of the landscape. Later enrichments of the matrix with iron, cement the plintite into crusts that fossilize the landscape.

Keywords: Savannas; Oxisols; Hydromorphy; Iron oxides; Clays.

Resumen: Los Llanos de Colombia son una extensa región de sabana tropical que se extiende desde el pie de los Andes hasta el río Orinoco. La altillanura es el bloque separado de la planicie por un escarpe, con Oxisoles desarrollados durante miles de años a expensas de un material aluvial limo-arcilloso antiguo. Los suelos han sido lavados por las aguas lluvias, sin recibir nuevos aportes minerales. Actualmente, bajo clima húmedo con una estación seca muy marcada, sufren hidromorfia temporal por escorrentía sub-superficial con disolución de hierro, degradación de minerales que acumulan aluminio y pérdida de arcillas. En la franja de fluctuación del nivel freático se forman nódulos ferruginosos endurecidos que conservan minerales heredados y forman un nivel de plintita en una matriz de cuarzo. La porosidad creada por la hidrogeoquímica induce el hundimiento del nivel freático y la disección del paisaje. Enriquecimientos posteriores de la matriz con hierro, cementan la plintita en costras y corazas que fosilizan el paisaje.

Palabras Clave: Sabanas; Oxisoles; Hidromorfía; Óxidos de hierro; Arcillas.



CAPÍTULO II

1. INTRODUCCIÓN

Los Llanos son grandes planicies de baja altitud localizados al este de Colombia, ocupando una superficie de más de 200.000 km² entre 4-6°N y 68-72°O. Están bordeados al oeste por la Cordillera Andina, al este por el Escudo de Guayana y al sur por el río Guaviare que marca el límite con la selva amazónica. La topografía general es plana, con un desnivel de menos de 200 metros entre el piedemonte de la cordillera y el río Orinoco que corre a 1.000 kilómetros de distancia, en el límite fronterizo con Venezuela.

La región está sometida a los vientos Alisios producidos en las zonas de altas presiones intertropicales que se dirigen a las zonas de bajas presiones ecuatoriales desde el noreste y el sureste. Los Llanos se sitúan en plena zona de confluencia de estos vientos, llamada zona de confluencia intertropical (ZCIT). Esta zona se desplaza entre 8 y 10° de latitud de sur a norte, siguiendo el ritmo de las estaciones, desde el ecuador a comienzos del año, época en la cual los Llanos presentan un clima seco. A medida que se desplaza hacia el norte trae un clima húmedo y fuertes precipitaciones a partir del mes de abril durante los siguientes seis meses. Esta dinámica de las masas de aire es causante de un ciclo de dos estaciones, una seca a finales y comienzo del año y la otra húmeda entre abril y octubre. Las precipitaciones disminuyen hacia el oriente desde 3000 mm/año cerca al piedemonte, hasta 1500 mm/año en el sector del río Orinoco.

La temperatura media es siempre superior a 25°C con aumentos entre 3 y 5°C en los meses secos. A nivel de los suelos, la temperatura es prácticamente constante a partir de 50 cm de profundidad y es el promedio de la temperatura ambiente en cada sitio.

Los Llanos corresponden a un paisaje de sabana interrumpida por bosques de galería estrechos que bordean una red hidrográfica muy ramificada cuyos drenajes son llamados “caños”. En la sabana alta, la parte superior de los suelos es bien drenada y dominan las gramíneas, aunque también pueden aparecer algunas especies arbóreas resistentes a los incendios. La acción antrópica modifica la fisionomía de los paisajes vegetales de sabana por la eliminación de especies sensibles.



CAPÍTULO II

La existencia de sabanas en el estado natural sorprende en medios donde la pluviometría es tan alta, mayor de 1500 mm/año. Es probable por razones edáficas ligadas a períodos secos muy drásticos, que se haya visto favorecida la extensión de estos ecosistemas de sabana, aunque incendios provocados por rayos o acciones antrópicas también pueden haber influido en este proceso. Las condiciones actuales más húmedas, probablemente muy recientes, no habrían permitido todavía la colonización de la selva en estos ambientes (Wijmstra y Van der Hammen, 1966; Van der Hammen, 1983). Los bosques de galería se caracterizan por cierta variedad de especies arbóreas entre las cuales la palma de moriche (*Mauritia*) predomina cerca de las fuentes.

Desde el punto de vista hidrográfico, tres afluentes principales del Orinoco nacen en la Cordillera Oriental de los Andes colombianos. De norte a sur es el río Arauca que corre en dirección oeste-este formando frontera con Venezuela; el río Meta que corre en dirección suroeste-noreste y recibe numerosos afluentes provenientes de la cordillera; el río Guaviare que forma el límite meridional de los Llanos con la selva en dirección Oeste-Este. Sin embargo, numerosos afluentes importantes del Orinoco nacen directamente en los Llanos, entre ellos los ríos Tomo, Tuparro y Vichada. Constituyen el drenaje de un compartimento más elevado que la planicie aluvial del oeste y por lo tanto separado de la influencia andina que se designa con el nombre de Altillanura. Estos ríos siguen un trayecto rectilíneo durante centenares de kilómetros, con una red secundaria dendrítica muy densa de arroyos llamados “caños”, alimentada por las napas presentes a poca profundidad. El origen de esas napas es consecuencia de un clima húmedo con lluvias locales que alimentan a todo lo largo el caudal de los ríos. Cerca de los márgenes del río Orinoco, la red de “caños” es menos densa debido a la menor precipitación (Khobzi *et al.*, 1980).

Este capítulo resume algunos de los resultados obtenidos por el autor durante la tesis de doctorado, que investigó la evolución de oxisoles en ambientes hidromorfos de las sabanas de altillanura de Colombia (Gaviria 1993). Varios aspectos del tema fueron también publicados en la revista Análisis Geográficos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Gaviria y Faivre, 2005).

CAPÍTULO II

2. PROBLEMÁTICA GEOMORFOLÓGICA Y PALEOAMBIENTAL

La región de los Llanos de Colombia forma una vasta cubeta rellena progresivamente con aluviones procedentes de la Cordillera Oriental Andina. Esos depósitos que en el piedemonte son gruesos, se adelgazan y se vuelven más finos a medida que se alejan de las montañas. La zona de piedemonte que se extiende unos 100 km al este, está compuesta por depósitos que constituyen conos de material grueso en una matriz fina. Esas formaciones están cortadas por los ejes hidrográficos que rápidamente pierden su energía cuando alcanzan las zonas más planas.

Más lejos de la cordillera, donde solamente han llegado los materiales más finos, se formaron amplias planicies aluviales alimentadas por la divagación de grandes ríos procedentes de los Andes. Los materiales arcillosos se depositaron en ambientes tranquilos durante los períodos de inundación, como las depresiones que bordean los cursos de agua actuales. Los depósitos más gruesos ricos en arenas, corresponden a los antiguos lechos de los ríos y aparecen esporádicamente como capas lenticulares. Los depósitos finos son profundos al occidente de la región, pero alcanzan solamente unos pocos metros de espesor en el sector oriental de los Llanos cerca al río Orinoco. Allí afloran rocas cristalinas del Escudo de Guayana en forma de “inselbergs” que han liberado por alteración arenas de cuarzo (Botero, 1999).

Las grandes unidades de paisaje que condicionan los tipos de suelos, se observan en la **Figura 1**: Zona de piedemonte con los suelos menos evolucionados sobre materiales gruesos; planicies aluviales con suelos marcados por una hidromorfía intensa hasta cerca de la superficie; altillanura formada por depósitos aluviales del Pleistoceno que no recibieron aportes más recientes debido a la falla del Meta: se distingue la altillanura periandina poco disectada de la disectada, en la cual los caños han cortado varios metros las capas pedológicas dominada por oxisoles; finalmente, altillanura periguayanesa con suelos arenosos al oriente de la región (Goosen, 1971).

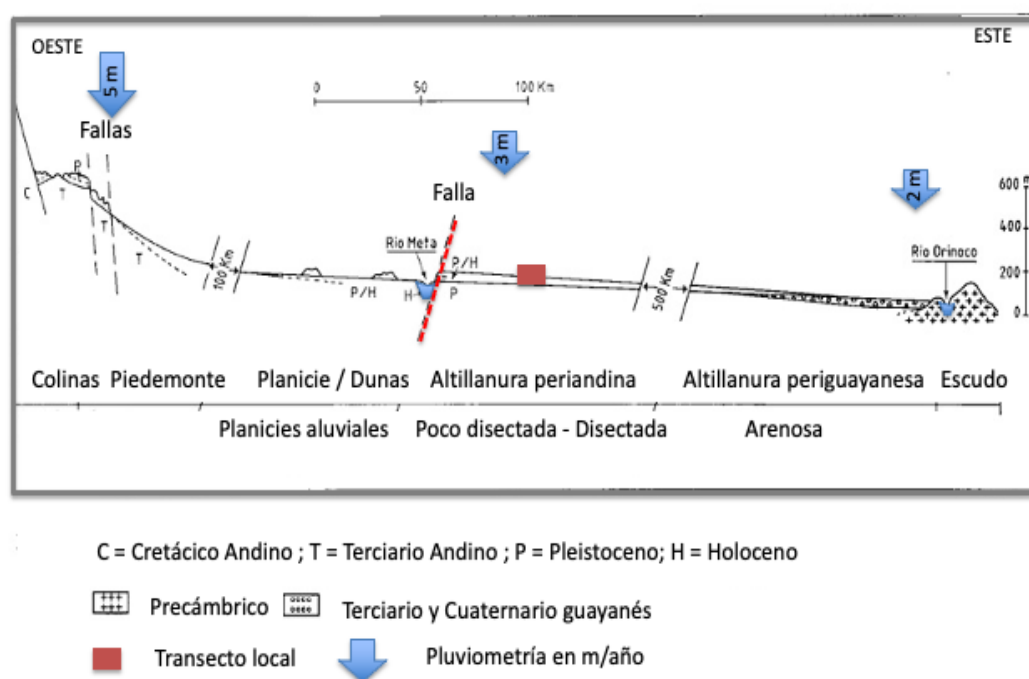


CAPÍTULO II

Durante el Pleistoceno, se formaron numerosas fallas paralelas a la Cordillera ligadas a los procesos de plegamiento y levantamiento, seguido por el hundimiento de la actual planicie aluvial al oeste del río Meta. El curso de este río que sigue una línea de falla de dirección SO-NE, es responsable de la existencia de un escarpe que puede alcanzar unos 50 metros en la margen derecha. Los materiales arrancados de los Andes por la erosión, se acumularon en la depresión creada en la planicie. El bloque situado hacia el este dejó de ser recubierto por sedimentos provenientes de la Cordillera.

Figura 1

Transecto Geomorfológico de los Llanos Orientales (Según Goosen, 1971; IGAC, 1983).



En estos medios, la dinámica del agua ligada a la disección progresiva del paisaje, es uno de los factores determinantes de la génesis y funcionamiento de los suelos. Formados a partir de materiales aluviales provenientes de los Andes, son naturalmente más antiguos en la altillanura que los del piedemonte y la planicie aluvial actual.

CAPÍTULO II

Los aluviones se derivan principalmente de rocas sedimentarias de edad Mesozóica cuyo espesor en la Cordillera Oriental alcanza varios miles de metros. Rocas esquistosas en diferentes grados de metamorfismo, provenientes de formaciones más antiguas, también contribuyeron con aportes de productos más arcillosos en esas zonas aluviales. Otros aportes importantes provienen de rocas sedimentarias de origen continental fuertemente alteradas desde la fuente (Burgl, 1961).

Por otra parte, numerosas dunas se han descubierto en el norte de la región, principalmente al occidente del río Meta. Las arenas que constituyen esas formaciones eólicas alcanzan varios metros de espesor y parecen provenir de los lechos de los ríos durante las aguas bajas, transportadas por los vientos Alisios en dirección noreste-suroeste. Aunque no se ha determinado con precisión su edad, parecen estar relacionadas con los períodos fríos y secos del Pleistoceno y el Holoceno (Khobzi, 1981).

La historia paleoecológica, con largos períodos muy secos, ha dado lugar al planteamiento de la disminución de las coberturas de bosque y la expansión de la vegetación de sabana en extensas superficies del territorio amazónico (Van der Hammen y Absy, 1994; Behling y Hooghiemstra, 1998; Van der Hammen y Hooghiemstra, 2000). En el período más frío y seco de la última glaciación hace unos 20.000 años, las sabanas pudieron formar temporalmente un gran cinturón alrededor de un centro selvático más reducido que la actual selva amazónica, entre los Llanos de Colombia y Venezuela, las sabanas de las Guayanas y los Cerrados de Brasil (**Figura 2**). Diferentes estudios han demostrado que las sabanas abiertas dominaron estos paisajes durante casi todo el Holoceno (Wijmstra y Van der Hammen, 1966; Berrío *et al.*, 2000).

CAPÍTULO II

3. ESTUDIO DE LA RELACIÓN SUELO/AGUA EN LA ALTILLANURA

Para entender la evolución de los paisajes ligados a las condiciones hidrológicas, se analizó en detalle una secuencia de suelos en la altillanura poco disectada localizada al occidente del departamento del Vichada en el sector de Gaviotas, en un interfluvio donde se abrieron varias calicatas y se estudiaron seis perfiles de suelos detallando los cuatro más representativos.

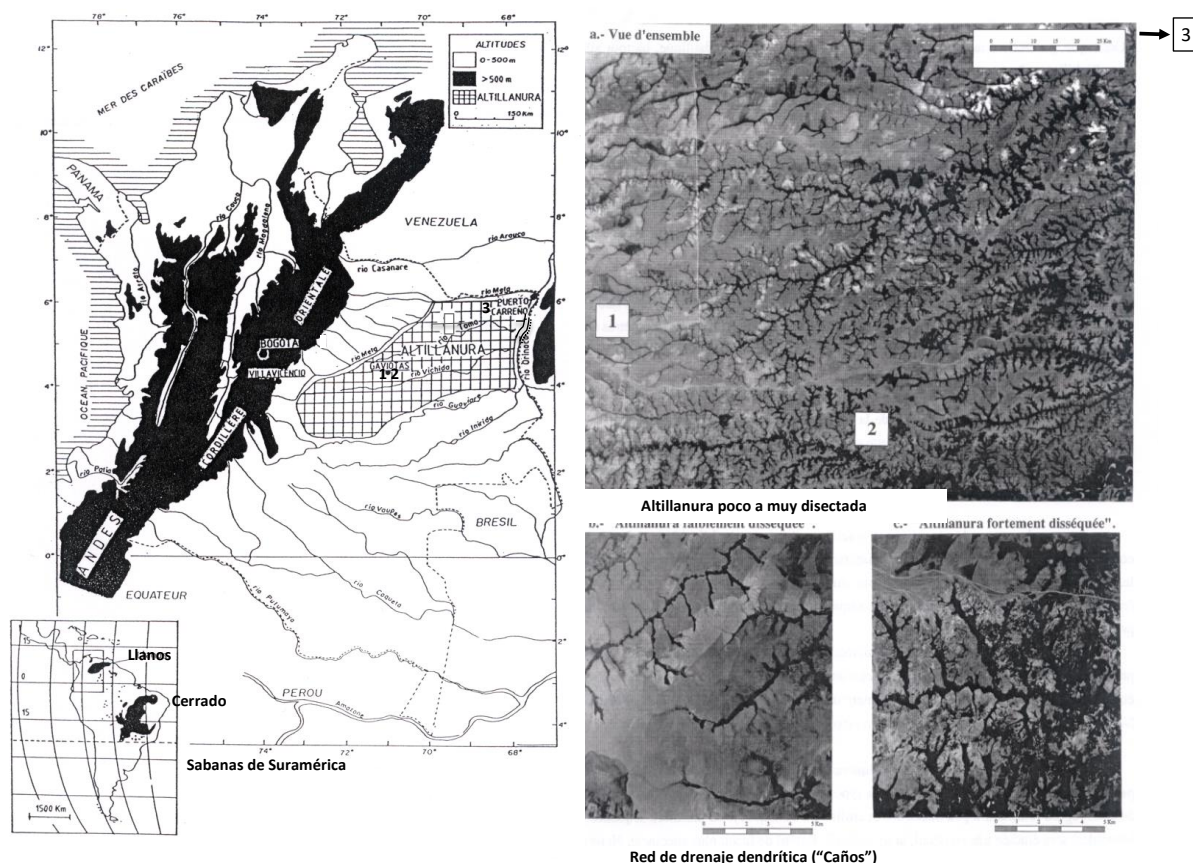
Se hicieron algunas comparaciones con suelos de la altillanura disectada 30 km al oriente de Gaviotas en el sector El Retén, donde se abrieron varias calicatas y se analizaron dos perfiles: uno sobre las colinas (“serranía”) y otro en la parte baja de un glacis del pie de las colinas, cerca a un caño; finalmente se visitaron algunos sitios al noreste de la región y se recolectó un perfil en el sector de La Venturosa donde el paisaje presenta una fuerte disección y corazas de hierro (**Figuras 2 y 3**).

Los métodos de estudio se basan en la selección de los transectos de suelos de sabana a lo largo de interfluvios (entre caños); apertura de calicatas y descripción de perfiles; análisis morfológico en campo y observaciones micromorfológicas sobre secciones delgadas; análisis químicos de suelos con técnicas tradicionales; análisis geoquímicos con énfasis en hierro, aluminio y silicio que incluye extracciones selectivas con reactivos específicos para las diferentes formas amorfas y cristalinas de Fe; análisis mineralógicos con técnicas instrumentales: difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB), análisis con microsonda electrónica (EDS), análisis térmicos (ATD-TG).

CAPÍTULO II

Figura 2

Mapa de Colombia donde se destacan los relieves de la Cordillera Andina y del escudo de Guayana, las unidades de paisaje de los Llanos Orientales con énfasis en la Altillanura (en achurado). En el recuadro inferior, mapa de Suramérica con la localización de los Llanos de Colombia y el Cerrado de Brasil (según Van der Hammen, 1983). A la derecha, imágenes de satélite (Lansat) de la altillanura poco disectada [1] disectada [2] y muy disectada [3].



Se realizó simultáneamente el estudio del funcionamiento hídrico de los suelos a lo largo de transectos por medio del monitoreo de los niveles freáticos durante al menos un ciclo climático anual. Las aguas superficiales, napas y red hidrográfica, están alimentadas exclusivamente por las aguas lluvias que caen en abundancia en la región. El estudio se realizó en el sector de Gaviotas donde se monitorearon los niveles freáticos en numerosos

CAPÍTULO II

aljibes. Se presentan en este estudio los resultados de cuatro puntos representativos de un interfluvio poco disectado.

Figura 3

Unidades de paisaje típicos de la altillanura en el departamento del Vichada: [1] poco disectada en el sector Gaviotas (4°42'50" N; 70°48'40" W); [2] disectada en el sector El Retén (4°30'12"N; 70°47'21"W); [3] muy disectada y con corazas petroféricas en el sector La Venturosa (6°04'50"N; 68°42'43"W). Ver localización aproximada en la Figura 2.



POCO DISECTADA



DISECTADA



MUY DISECTADA CON CORAZAS

3.1 SECUENCIA DE SUELOS DE ALTILLANURA POCO DISECTADA

Por ser la base principal para los análisis, se transcribe la descripción de los suelos consignados en la publicación de Gaviria y Faivre (2005, pp.53-54). El interfluvio donde se estudiaron los suelos se localiza en el sector Las Mercedes (4°42'50"N; 70°48'40"W) a 10 km al noreste de Gaviotas.

Los suelos se distribuyen a lo largo de cada interfluvio, formando toposecuencias desde el centro de las colinas hasta los ejes de drenaje. Del centro hacia el borde del interfluvio se desarrollan oxisoles con diferente grado de hidromorfía: Typic Haplustox, Typic Haplaquox, Plintic Haplaquox y Typic Plintaquox (USDA, 1990). En todas las posiciones de las secuencias los suelos presentan una sucesión vertical de conjuntos pedológicos, designados de arriba hacia abajo de 1 a 5. El conjunto 1 incluye los horizontes húmíferos y los horizontes subyacentes de color amarillo en la parte alta de la secuencia (1 metro de espesor), aclarándose progresivamente hasta decoloración completa en la parte baja. El suelo presenta una porosidad alta. El conjunto 2, de 0.5 metros de espesor, es transicional entre el 1 y el 3. El conjunto 3 que es compacto, presenta una estructura de fragmentación en poliedros gruesos bien desarrollados sobre 1 metro de espesor. El color es uniformemente rojo en la parte alta de la secuencia y se vuelve progresivamente muy heterogéneo hacia el eje de drenaje, donde aparecen manchas y nódulos rojos individualizados sobre una matriz clara. La actividad hídrica se limita a unos canales verticales muy porosos que penetran la masa compacta, conectando el conjunto de

CAPÍTULO II

superficie con el fondo del perfil, que resultan de la acción penetrante de la fauna del suelo.

El conjunto 4 se caracteriza por presentar nódulos opacos en una matriz roja sobre 1 metro de espesor, que se aclara hacia la parte baja de la secuencia, dando la morfología de un nivel nodular conocido como plintita. El conjunto 5 presenta manchas y nódulos que disminuyen con la profundidad produciendo una matriz uniformemente gris que se generaliza en el fondo de los suelos.

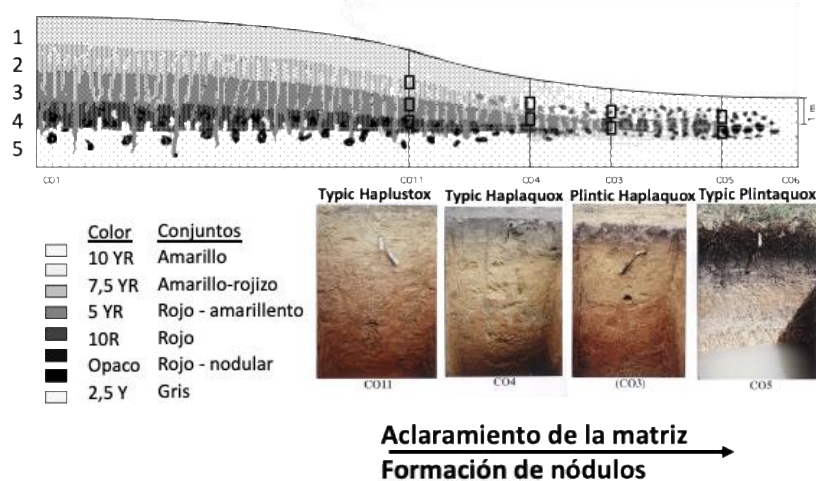
Los cinco conjuntos presentan caracteres constantes en toda la parte alta de los interfluvios, mientras que su aspecto se modifica considerablemente en las partes cóncavas donde tienden a adelgazarse, acompañados por fenómenos de decoloración y de segregación de hierro ligados a la hidromorfía.

3.2 DINÁMICA HÍDRICA A LO LARGO DE UN INTERFLUVIO POCO DISECTADO

Muchos de los caracteres morfológicos de los suelos son el resultado de procesos de hidromorfía, más marcados en la parte inferior de la secuencia y más discretos en la parte superior de la misma (**Figura 4**). En esta última, está muy ligada al trabajo de la fauna: los materiales de color amarillo con textura arcillo-limosa, son porosos por bioturbación y están muy afectados por la acción del agua. Los materiales rojos son un poco más arcillosos, más compactos y están menos sometidos a este efecto (Gaviria y Faivre, 1996).

Figura 4

Organización vertical y lateral de los conjuntos de horizontes de suelo en un interfluvio poco disectado de la Altillanura. Arriba: Secuencia esquemática de los conjuntos pedológicos (1 a 5) y colores Munsell. Abajo: Perfiles de suelos (USDA 1990) (según Gaviria, 1993; Gaviria y Faivre, 2005).



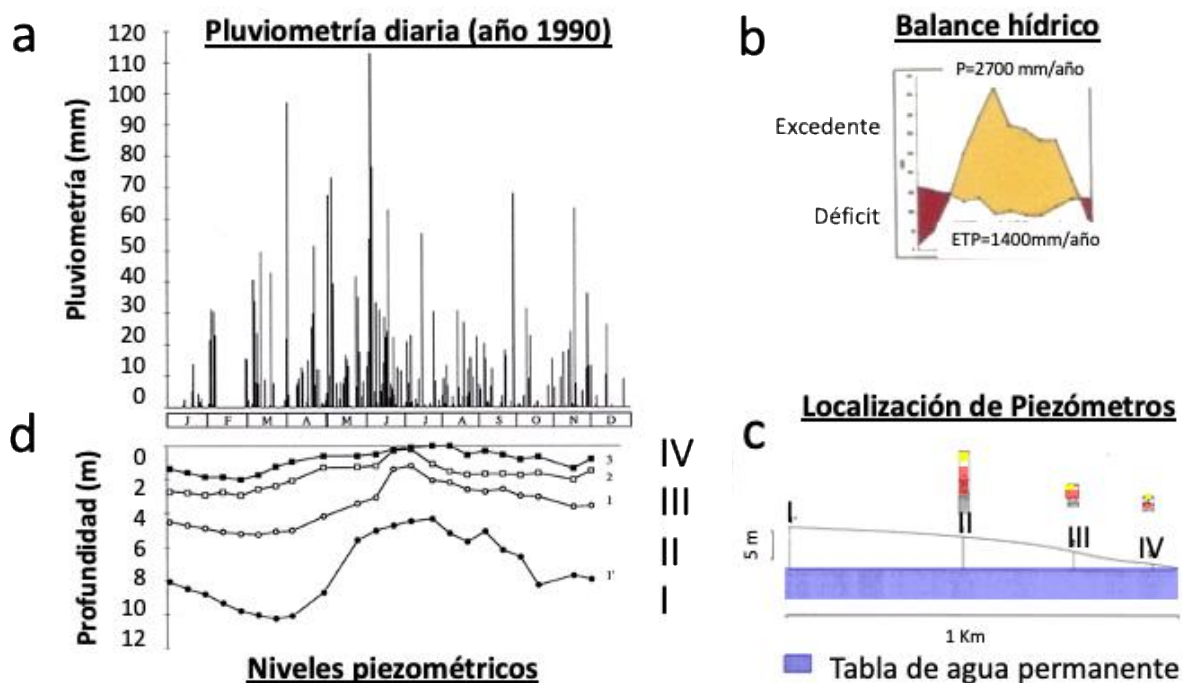
CAPÍTULO II

El clima se caracteriza por una estación húmeda larga con precipitaciones intensas durante siete a ocho meses entre abril y octubre, seguida de una estación seca de cuatro a cinco meses entre noviembre y marzo. El promedio de la precipitación en un período de 20 años en la estación Gaviotas, cerca al transecto en estudio, es alrededor de 2700 mm/año de los cuales unos 2000 mm caen en los seis meses más húmedos de “invierno” (Figura 5).

La variabilidad climática se manifiesta por años muy húmedos con lluvias que alcanzan los 3000 mm/año y años más secos en los cuales la precipitación es del orden de 2000 mm/año. La pluviometría acumulada en los tres meses más secos de “verano” es inferior a 150 mm, y en los años más secos pueden presentarse varios meses sin lluvia durante este período. El año cuando se realizó el monitoreo de los niveles freáticos tuvo una pluviometría cercana al promedio de 20 años (2626 mm) (Figura 5a).

Figura 5

Arriba: Pluviometría diaria (año 1990) y balance hídrico promedio en 20 años en la estación Gaviotas. Abajo: profundidad de los niveles freáticos en un ciclo anual (1990) y localización de piezómetros en el interfluvio poco disectado (según Gaviria, 1993).



CAPÍTULO II

El balance hídrico promedio, considerando una evapotranspiración del orden de 1400 mm/año, da ocho a nueve meses con excedentes de agua que entran a los suelos y tres a cuatro meses con déficit de agua. Los excedentes de agua están en el orden de 1200 mm/año que quedan disponible para infiltración a través de los suelos y dan origen a una tabla de agua permanente. Además, ocurren eventos esporádicos de lluvia muy intensos (50 a 100 mm) a todo lo largo del año, que influyen a nivel de los suelos en la formación de napas temporales (**Figura 5b**).

La red piezométrica se estableció en aljibes a lo largo de un interfluvio vecino, con mediciones quincenales durante un año que muestran que la tabla de agua permanente oscila fuertemente con el régimen de las precipitaciones. En la época más seca, se encuentra entre 10 y 5 metros de profundidad en los suelos de la parte superior de la secuencia, entre 2 y 3 metros en la parte media y a menos de 1 metro en la parte inferior. Con la llegada de las lluvias, la napa comienza a subir de nivel, lentamente en el centro del interfluvio y rápidamente en la parte baja. Durante la época más lluviosa de mediados del año, en la parte alta del interfluvio se encuentra entre 5 y 2 metros, muy cerca de la superficie en la zona intermedia e inundando las partes bajas. La oscilación de la napa, principalmente en el centro de las sabanas, es por lo tanto muy importante en el ciclo anual (**Figura 5c y 5d**).

Desde el comienzo de las lluvias ocurre una fuerte escorrentía, aunque una parte del agua penetra en los suelos creando una napa colgante superficial en el horizonte amarillo. El agua escurre lateralmente hasta la parte baja de la vertiente donde se une con la napa permanente. A medida que aumentan las lluvias, la tabla de agua ocupa los horizontes nodulares del fondo de los perfiles y la napa colgante satura los conjuntos amarillos superiores. Los conjuntos rojos compactos poco permeables son los únicos volúmenes de suelo que no quedan saturados por el agua. Sin embargo, en los horizontes intermedios amarillo-rojizo y en los rojos, se observan lenguas verticales porosas de colores claros que atraviesan los suelos y comunican los conjuntos amarillos con el fondo

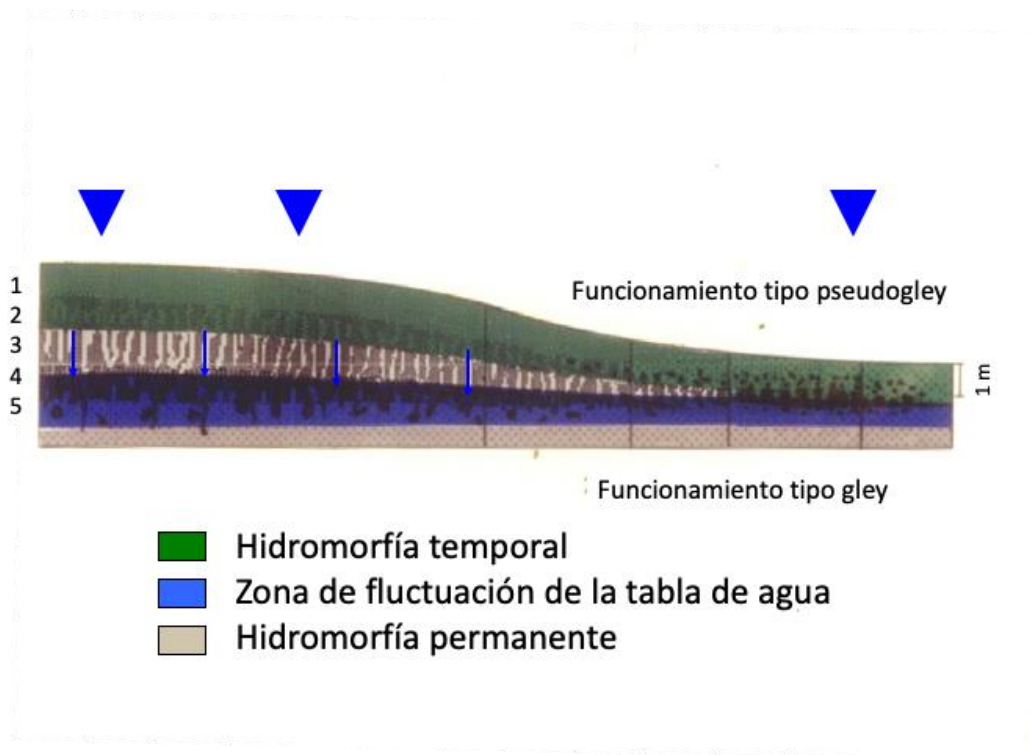
CAPÍTULO II

de los perfiles. El agua se puede por lo tanto infiltrar por estos caminos preferenciales y alimentar la napa permanente a todo lo largo del interfluvio (**Figuras 4 y 6**).

En resumen, la presencia de dos napas lleva a comportamientos hídricos diferentes: En la parte superior de los suelos, en los horizontes amarillos que son muy porosos principalmente por la acción de la fauna, se forma una napa colgante. El resultado es una dinámica hídrica particular de circulación lateral que a nivel pedológico corresponde a procesos de tipo pseudogley. En el conjunto inferior, donde ocurre la oscilación y abatimiento de la napa inferior, los procesos pedogenéticos toman el carácter de un gley oxidado y en la napa permanente el suelo es un gley reducido.

Figura 6

Funcionamiento hídrico de los suelos en un interfluvio de la altillanura poco disectada. Los horizontes superiores (conjuntos pedológicos 1 y 2) con napa colgante temporal y circulación lateral de tipo pseudogley; los horizontes inferiores (conjuntos pedológicos 4 y 5) con napa permanente y fluctuante de tipo gley; canales verticales (conjunto pedológico 3) por donde el agua de escorrentía alimenta la napa inferior (según Gaviria 1993).



CAPÍTULO II

En la parte baja de la secuencia, las dos napas se juntan e incrementan los caracteres hidromórficos de los suelos. El conjunto superficial amarillo pierde intensidad, la presencia de lenguas porosas saturadas con agua aumenta en los conjuntos subyacentes y se generaliza la decoloración de los suelos. Los niveles rojizos sufren una variación lateral de facies cuando son invadidos por el agua freática que asciende durante el “invierno”, en la parte intermedia e inferior del interfluvio. Los procesos hidromórficos se manifiestan por la destrucción progresiva de la estructura y el desmantelamiento de los suelos, con pérdida de sílice medidos en solución (valores promedio de 20 ppm), que es exportada por el sistema de drenaje. Solamente subsisten algunos volúmenes compactos en los que se intensifica el color rojo.

En ellos aparecen nódulos enriquecidos en hierro rodeados por una matriz decolorada empobrecida en arcillas y rica en arena de cuarzo (plintita). Lo anterior es un indicador visual de procesos químicos de oxido-reducción que producen segregación del hierro en estos ambientes hidromórficos, y colateralmente pérdidas de arcilla, como se verá más adelante.

3.3 DINÁMICA HÍDRICA A LO LARGO DE LOS INTERFLUVIOS FUERTEMENTE DISECTADOS

Algunas decenas de kilómetros al este de la secuencia de atillanura poco disectada, el paisaje se caracteriza por una fuerte disección producida por una red hidrográfica más densa. La morfología general muestra unos resaltos que rodean un glacis unos diez metros por encima del eje de drenaje. El paisaje se caracteriza por una sucesión de pequeñas colinas tabulares de pendiente fuerte y corta (ver **Figura 3**). La incisión por el “caño” es muy marcada en la parte baja del interfluvio y da origen a una red hidrográfica dendrítica muy ramificada rodeada de bosques de galería. El hundimiento del sistema hidrográfico es responsable de una zona de ruptura de la pendiente entre los bordes de las colinas y el glacis donde aparecen costras de hierro que fosilizan la morfología de lo que se conoce comúnmente como “serranía”. Se producen localmente fenómenos de erosión

CAPÍTULO II

mecánica con ruptura de las corazas que se derrumban y que caen en pedazos al pie de las colinas. Este paisaje es común y está repartido en grandes superficies al sur y al este de la altillanura.

Los suelos en este caso tienen textura arenosa, las aguas lluvias se infiltran y circulan rápidamente en los suelos sin formar ninguna napa. En las colinas, las costras de hierro son delgadas (menos de 10 cm) y están constituidas por granos de arena fina de cuarzo en un cemento ferruginoso. Encima se presenta una acumulación de figuras nodulares de color rojo oscuro correspondiente a nódulos duros de lo que se conoce como petroplintita, en una matriz de suelo arenosa. Su posición en los suelos, la relación plasma/esqueleto y su morfología, muestran una gran similitud con los nódulos de hierro de las zonas poco disectadas. Permite suponer que se formaron en un medio más rico en arcillas y corresponderían a figuras heredadas, testigo de un estadio menos avanzado de la disección cuando a ese nivel existían condiciones hídricas en el suelo. En la base del interfluvio, los suelos son más hidromórficos; la presencia de una napa da origen a un nivel de plintita que aparece en la zona de abatimiento que resulta de la segregación del hierro en un medio más arenoso. Lo anterior muestra una convergencia en la evolución de los suelos en función de la dinámica actual de las napas.

Centenares de kilómetros más al este, aparecen zonas con costras ferruginosas muy desarrolladas en medios donde la disección entalla profundamente la altillanura sobre varias decenas de metros, particularmente cerca a los grandes ríos. Las colinas están coronadas por corazas petroféricas que pueden alcanzar hasta un metro de espesor. Afloran en el borde de los “caños”, en la zona de ruptura de la pendiente de las colinas y protegen el relieve de la erosión actual (ver **Figura 3**). Las corazas están constituidas por nódulos de menos de 1 cm en una matriz rica en cuarzo, muy parecidos a los de la plintita de las secuencias de altillanura poco y fuertemente disectadas. A más de lo anterior, el esqueleto de cuarzo está impregnado con hierro que invade el espacio poroso entre los granos de cuarzo y cementa todo el material incluyendo los nódulos.

CAPÍTULO II

4. ESTUDIO MINERALÓGICO DEL COMPLEJO DE ALTERACIÓN

El objetivo de este numeral es presentar la evolución de los minerales en el transecto de la altillanura poco disectada, tanto vertical como lateralmente, considerando los regímenes hídricos en cada posición de la secuencia de suelos. La cobertura pedológica evoluciona en este sector a partir de materiales aluviales de textura arcillo-limosa provenientes de la cordillera Andina, afectados por la meteorización antes de su depósito. La pedogénesis actual es el resultado de procesos ocurridos sobre la altillanura durante un largo período de tiempo, sin aportes posteriores de materiales una vez que la región quedó cortada de la planicie aluvial actual por la falla del río Meta. Los procesos geoquímicos resultan del lavado continuo de los materiales por las aguas de escorrentía y de infiltración indicados en el numeral sobre funcionamiento hídrico de los suelos.

4.1 DISTRIBUCIÓN DE LAS FORMAS DE HIERRO EN LOS SUELOS

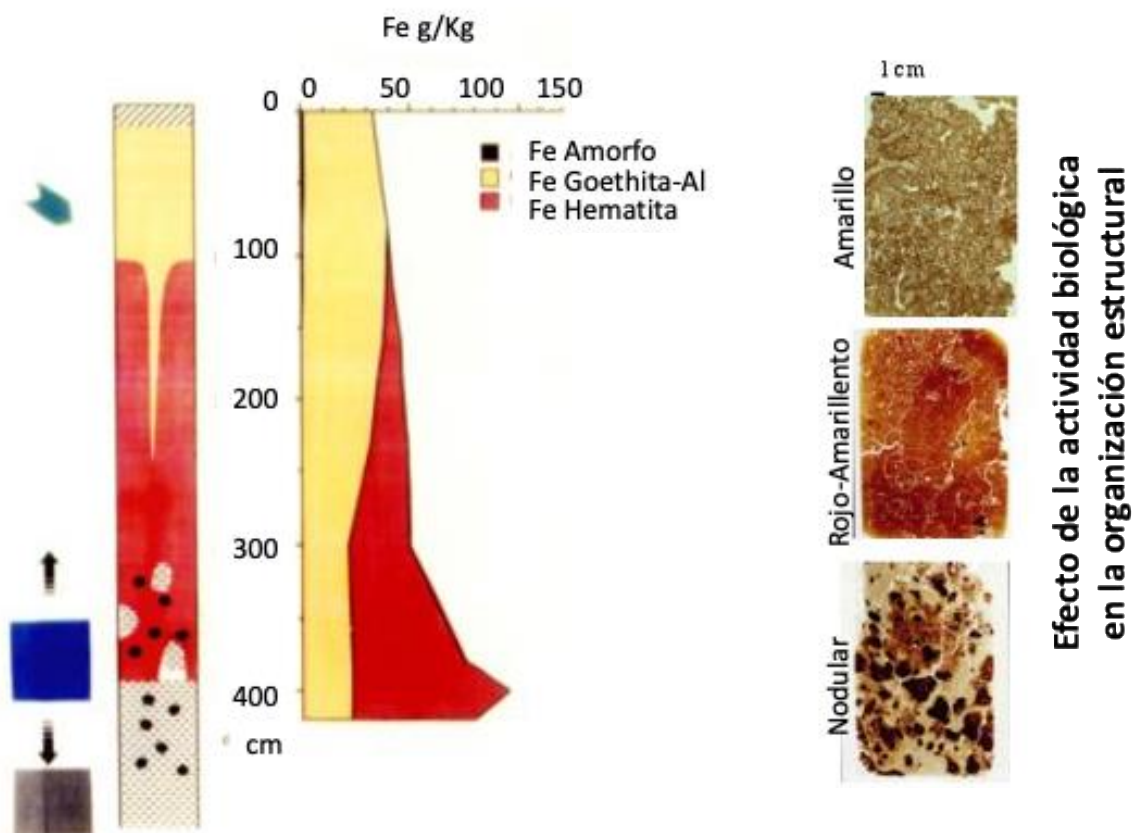
La movilización del hierro, su pérdida en unas zonas y su acumulación en otras, ha sido muy estudiada en oxisoles de zonas tropicales (Schwertmann y Taylor, 1989; Torrent *et al.*, 1983). Gracias al color de los diferentes óxidos, el hierro es un elemento fácil de seguir a partir de observaciones de campo y puede ser utilizado como indicador de condiciones físicoquímicas del medio. El hierro libre presente en estos suelos es principalmente el óxido hematita de color rojo (Fe_2O_3) y el oxihidróxido goethita de color amarillo (FeOOH), identificados preliminarmente con la tabla Munsell (ver **Figura 4**).

Las condiciones oxidantes o reductoras que se crean por acción del agua en los suelos, dependen del clima y del modo como esta circula a través de los suelos. La hidromorfía que genera la permanencia del agua en los perfiles, induce la transformación de las diferentes especies mineralógicas del hierro libre, goethita (Gt) y hematita (Hm). En la **Figura 7** se representa el perfil de suelo de la parte alta de la secuencia, las formas de hierro libre en cada horizonte y el aspecto micromofológico en sección delgada.

CAPÍTULO II

Figura 7

Perfil esquemático de suelo de la parte alta del interfluvio con la representación del funcionamiento hídrico; contenido de las formas de hierro libre en la tierra fina (<2 mm) en g/Kg de Fe; expresión micromorfológica en secciones delgadas de la organización estructural.



El horizonte amarillo superficial (conjunto 1), sometido a la acción temporal de la napa colgante, es muy poroso por la actividad de la fauna. El contenido de hierro libre es de 40g/Kg Fe, algo menor que en los horizontes subyacentes y tiene como mineral cristalino de hierro exclusivo la goethita, con aluminio sustituyendo al hierro en una alta proporción del 32% ($\text{Fe}_{0,7}\text{Al}_{0,3}(\text{OH})_3$). El color amarillo corresponde a una disolución selectiva de toda la hematita y las formas menos sustituidas de Al-goethita. El amarillamiento del suelo es expresión de una hidromorfía moderada (Macedo y Bryant, 1989).

CAPÍTULO II

La zona intermedia rojo-amarillenta (conjunto 2) con un contenido de 50 g/Kg Fe, es atravesada por un canal vertical con una mezcla de las dos formas cristalinas goethita y hematita, esta última aumentando en profundidad por redistribución hacia la parte inferior del perfil. En sección delgada aparecen zonas compactas rojas rodeadas de playas más porosas, con agua que infiltra lentamente por las lenguas verticales; el horizonte rojo (conjunto 3) es compacto y homogéneo, con un valor de hierro similar que el anterior, presenta igual proporción de los dos minerales (Al-Gt y Hm).

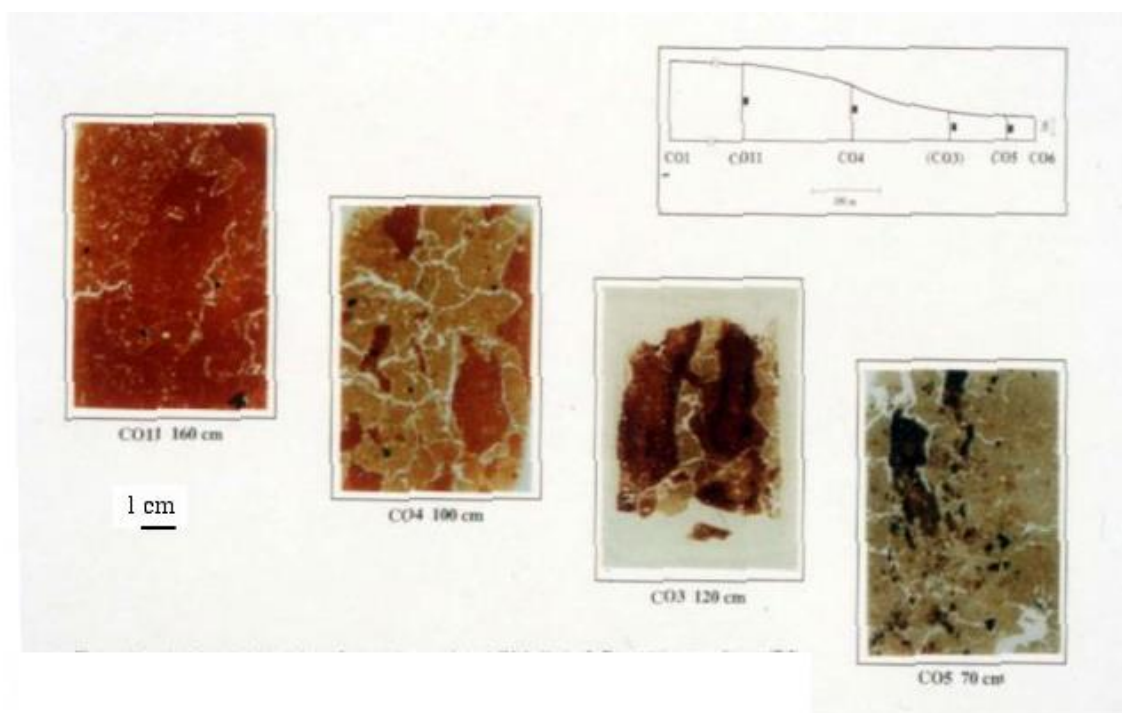
En el horizonte nodular (conjunto 4) aumenta drásticamente el contenido de hierro libre hasta 100 g/Kg, con más hematita precipitada a partir del hierro que aportan las aguas de infiltración en épocas de lluvia. En sección delgada se observan zonas enriquecidas con este mineral rojo formando nódulos oscuros en una matriz más clara. En sección delgada y por análisis puntuales con microsonda, se evidencia el enriquecimiento en hierro de los nódulos y el empobrecimiento en la matriz externa. Finalmente, hacia el fondo del perfil (conjunto 5) la matriz ha perdido la coloración por reducción y disolución de hierro en un medio con hidromorfía más drástica, ligada a la zona inferior de abatimiento del nivel freático.

Hacia abajo de la secuencia y en los canales de circulación preferencial del agua de los conjuntos 2 y 3 (ver **Figura 8**), los volúmenes empobrecidos en Fe se vuelven cada vez más importantes, porque al estar sometidos a mayor hidromorfía, se decoloran por la desaparición tanto de hematita como de goethita, aunque esta es más resistente a la disolución por la presencia de aluminio en la estructura.

CAPÍTULO II

Figura 8

Secciones delgadas del conjunto 2 a lo largo del transecto de suelos de altillanura poco disectada en Las Mercedes, sector de Gaviotas, departamento del Vichada; se observa el enriquecimiento en hierro de los volúmenes compactos y la pérdida de hierro en la matriz porosa (Gaviria, 1993; Gaviria y Faivre, 2005).



Finalmente, en la parte baja de la secuencia aparecen manchas y nódulos que presentan una distribución del hierro más heterogénea. En las secciones delgadas los agregados rojos muestran una pérdida de Fe progresiva en su periferia, pasando de rojo a amarillo y finalmente a gris, mientras que la parte interior de estos volúmenes se enriquecen en Fe con la aparición de manchas rojas concentradas que se transforman en zonas nodulares endurecidas cada vez mas opacas.

En la **Figura 9** se representa un perfil de suelo de la parte baja de la secuencia en donde la hidromorfía aumenta por efecto de la conjunción de dos napas: la temporal que circula lateralmente por los espacios porosos de los horizontes superiores y que coinciden con la zona de fluctuación del nivel freático. El suelo es mucho más delgado que en la parte alta de la secuencia y encuentra la tabla de agua permanente a poca profundidad. La matriz

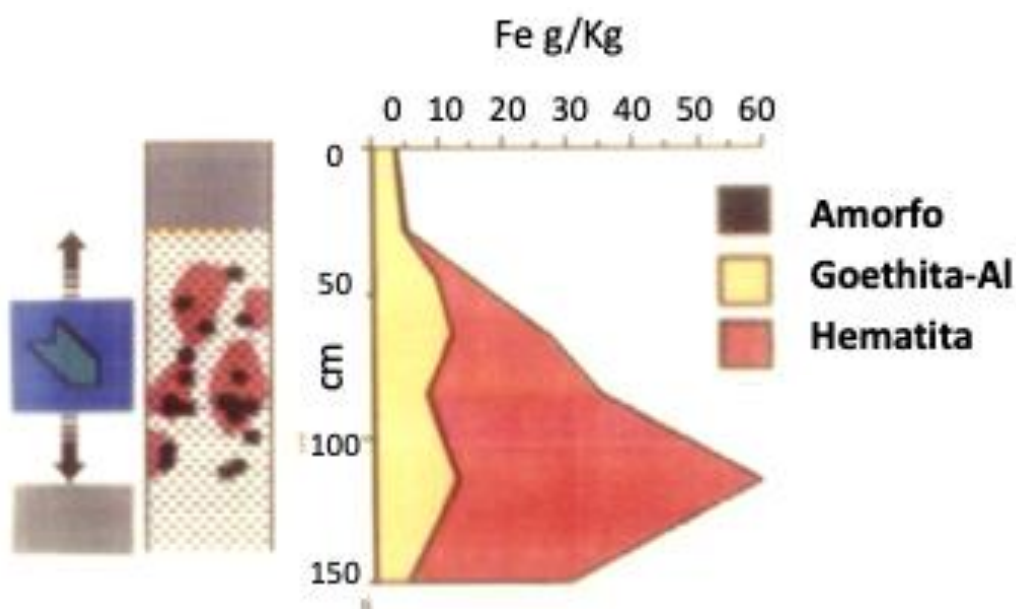
CAPÍTULO II

del suelo es limo-arenosa y por lo tanto permeable, mientras que las figuras nodulares son compactas y están endurecidas.

En la parte superior del perfil el contenido de hierro disminuye a menos de 5 g/Kg Fe en un horizonte de color claro, lo que indica desaparición de una parte importante de la goethita. El hierro aumenta progresivamente hacia abajo en donde existe goethita y hematita remanentes dentro de los volúmenes compactos. Hacia abajo ocurre un aumento marcado en hierro de las figuras nodulares hasta valores de 60 g/Kg Fe. Los estudios mineralógicos de estos nódulos muestran un enriquecimiento progresivo en hematita que cristaliza en condiciones de actividad de agua débil en los poros de pequeña talla (Tardy *et al.*, 1988).

Figura 9

Perfil esquemático del suelo de la parte baja del interfluvio con la representación del funcionamiento hídrico; a la derecha, contenido de las formas de hierro libre en la tierra fina (<2 mm) expresado en g/Kg de Fe.



CAPÍTULO II

4.2 TRANSFORMACIÓN DE MINERALES ARCILLOSOS EN LOS SUELOS

Los minerales predominantes en todo el perfil son caolinita mal cristalizada y cuarzo (suma igual a 80%). La caolinita está empobrecida en los conjuntos 1 y 2 (20%), alcanza su máximo valor en los horizontes rojos (50%) y disminuye en el horizonte nodular inferior (40%); el cuarzo tiene un comportamiento inverso (**Figura 10a**).

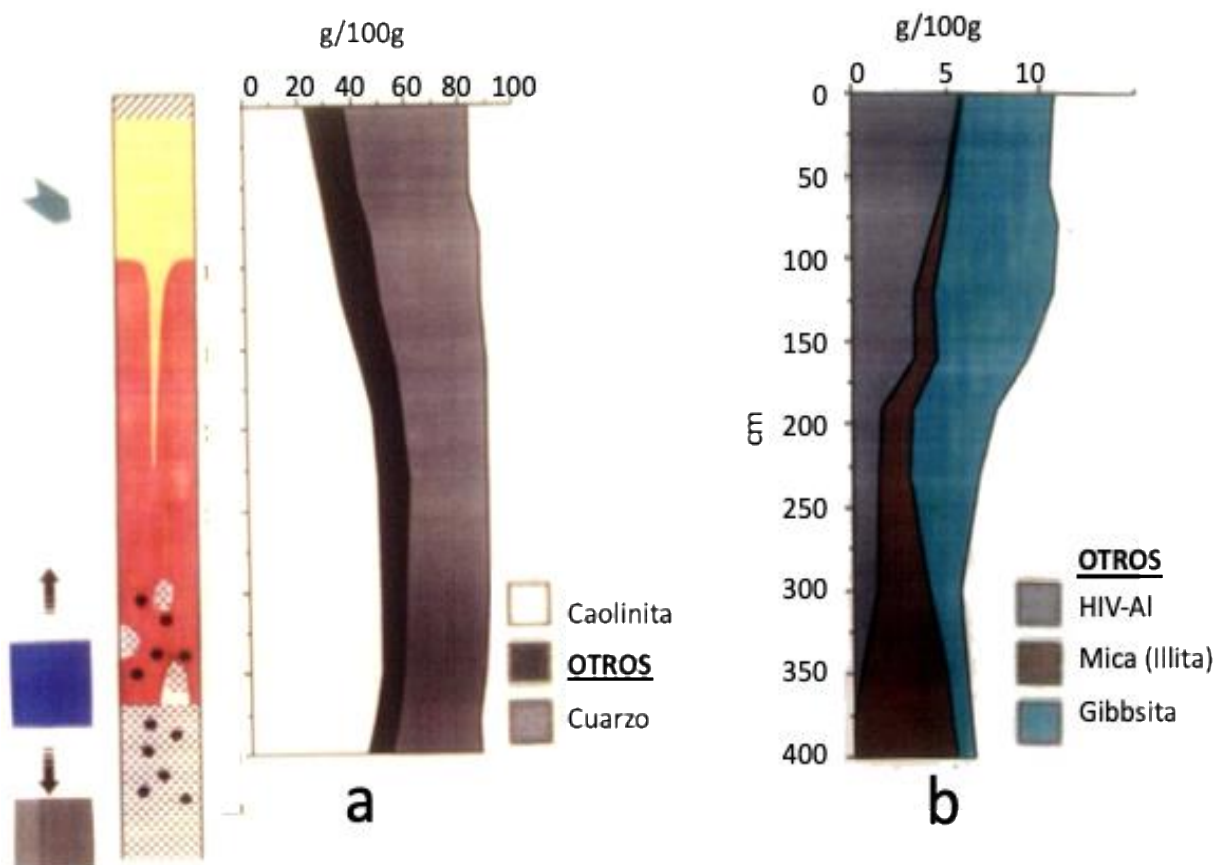
Otros minerales presentes son mica hidratada o illita, vermiculita hidroxil-aluminosa (HIV-Al) y gibbsita, cuya suma está entre 5 y 10% (**Figura 10b**). La illita es el mineral arcilloso derivado de la mica heredada de las rocas de la cordillera, por pérdida de potasio. La vermiculita es el producto de meteorización de la illita que ha incorporado aluminio y expulsado potasio, proceso que ocurre con intensidad en la parte superior del suelo. Hacia el fondo del perfil, la mica hidratada (illita) se conserva. La gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$ es el producto aluminoso típico de ambientes lateríticos y cristaliza a partir del aluminio liberado por otros minerales. En este caso, la fuente principal es la fracción de caolinita que desaparece en los horizontes superiores, que a su vez se enriquecen en gibbsita. Las condiciones fisicoquímicas son apropiadas para esta reacción por ser medios ácidos medidos en el suelo con pH alrededor de 4,5.

Las mismas transformaciones ocurren en los conjuntos superiores amarillentos de los suelos (1 y 2) a lo largo de todo el transecto. El conjunto rojo (3) puede considerarse como el material de partida poco afectado por la hidromorfía, a partir del cual esta actúa diferenciando los niveles superiores en un proceso progresivo. En el fondo del perfil, dentro de los conjuntos nodulares (4 y 5) ocurre una pérdida de material arcilloso y un incremento en el contenido de cuarzo que se hace más evidente en la parte baja del transecto. La hidromorfía más drástica por la conjunción de las napas es probablemente responsable de la degradación de los suelos, en los que del material inicial solo subsisten las figuras nodulares ricas en hierro (ver microfotografías, **Figuras 7 y 8**).

CAPÍTULO II

Figura 10

Perfil esquemático de suelo de la parte alta del interfluvio poco disectado con la representación del funcionamiento hídrico; **a.** contenido de los minerales mayores en la tierra fina (<2 mm) expresado en g/100g. **b.** Detalle de otros minerales en menor contenido.



En complemento a lo anterior, los análisis mineralógicos sobre la tierra fina por DRX, observaciones micromofológicos en secciones delgadas y por microscopía electrónica de barrido, apoyados con análisis puntuales con microsonda, permitieron reconocer algunos micrositios y ambientes donde ocurren procesos de transformación de minerales (**Figura 11**).

CAPÍTULO II

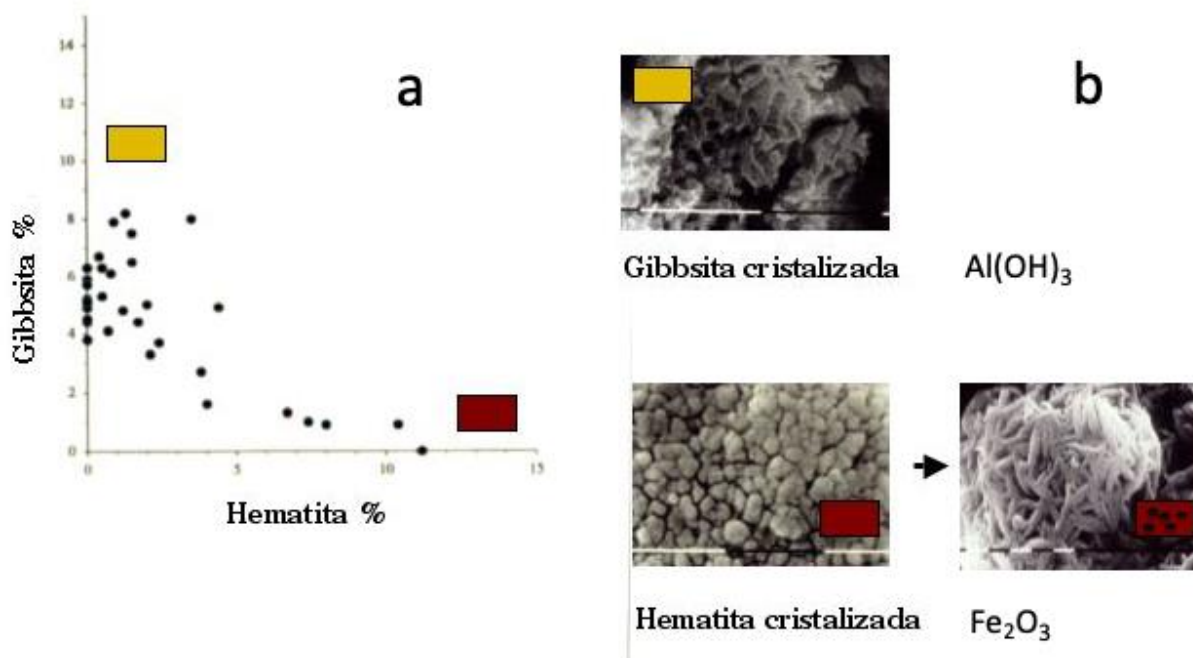
Existe una clara correlación inversa entre el contenido de gibbsita y el de hematita en la secuencia de suelos. Los volúmenes donde la hematita disminuye están enriquecidos en gibbsita como es el caso del conjunto amarillo (1); en el conjunto rojo (3) y en las zonas nodulares del conjunto 4, donde el contenido de hematita es alto, el de gibbsita es muy bajo, como lo indica la gráfica de la **Figura 11a**. Observaciones finas muestran que los minerales arcillosos del conjunto rojo están recubiertos por microagregados ricos en óxidos de hierro de tamaño microscópico ($<0,1$ micras). Si se compara con micrositios afectados por la hidromorfía temporal del conjunto amarillo que han perdido óxidos de hierro, se observan figuras de corrosión ricas en aluminio que corresponden a gibbsita. (ver los ejemplos de microfotografías MEB de la **Figura 11b**).

La correlación con goethita aluminosa no es tan clara debido a que es más resistente a la disolución que la hematita. Sin embargo, en el fondo de los perfiles y en la parte baja de la secuencia en donde ocurre la fluctuación del nivel freático, ambos minerales desaparecen de la matriz del suelo. En este caso, ocurre una segregación del hierro que precipita en forma de nódulos constituidos por hematita, que forman una estructura microcristalina compacta protegida de la acción disolvente del agua, a pesar de encontrarse en la zona de mayor hidromorfía (**Figura 11b**).

CAPÍTULO II

Figura 11

Relación entre la disolución de óxidos de hierro y formación de arcillas aluminosas. **a.** Caso de la hematita y la gibbsita. **b.** fotografías con microscopio electrónico de barrido que ilustran los procesos en los conjuntos amarillo, rojo y nodular.



En síntesis, los volúmenes de suelo más porosos de los conjuntos superiores se empobrecen en hematita y parcialmente en goethita, proceso que expone los minerales arcillosos a la pérdida y destrucción parcial. La caolinita libera sílice en solución, el aluminio es incorporado dentro de las micas hidratadas (illita) por intercambio con potasio y se forma vermiculita hidroxialuminosa (HIV-Al) (**Figura 12**).

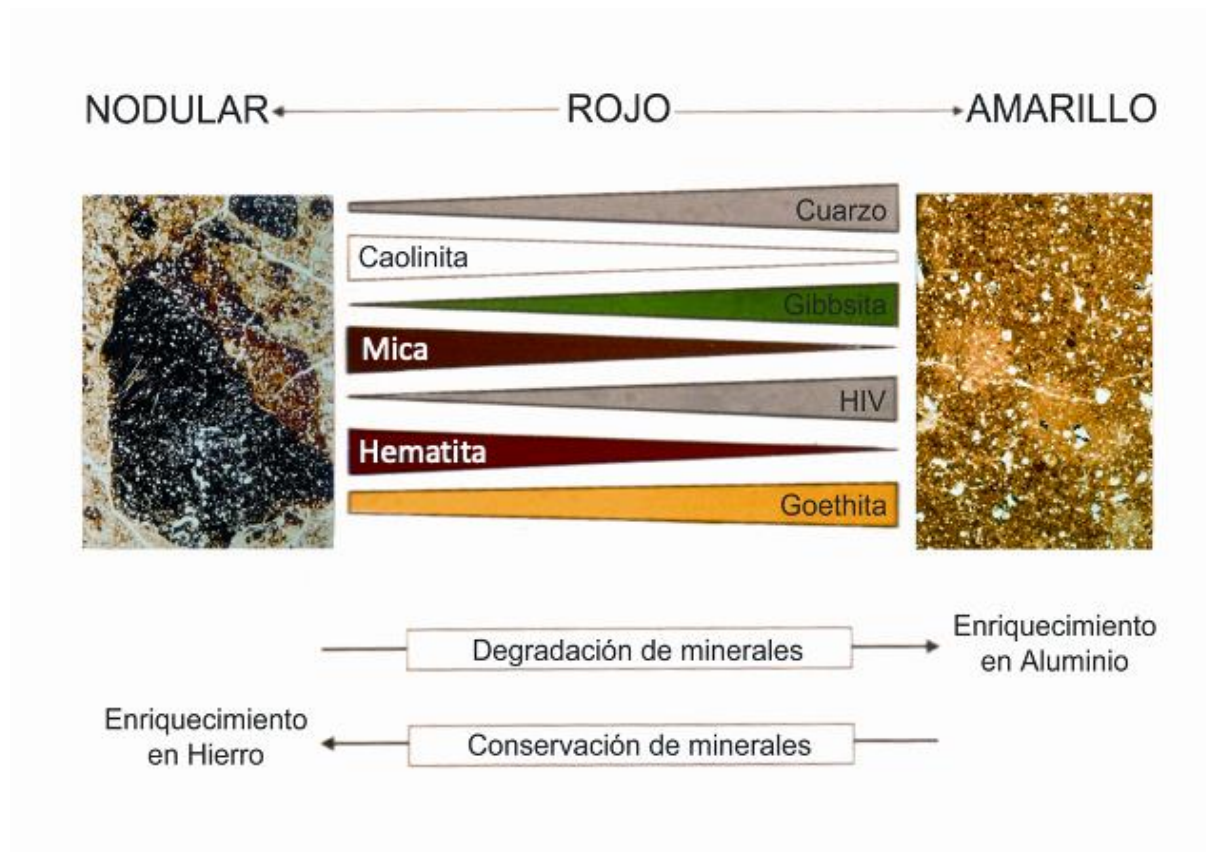
Ocurre un enriquecimiento relativo en cuarzo por pérdida de otros componentes, lo que aumenta la permeabilidad del suelo. Los volúmenes rojos compactos están preservados de la acción agresiva del agua y de los organismos del suelo, mantienen igual proporción de hematita/goethita y poca transformación de las arcillas. Finalmente, las figuras nodulares corresponden a volúmenes del suelo rojo que incorporan hematita microcristalina y se endurecen. La proporción entre matriz arcillosa y esqueleto de cuarzo,

CAPÍTULO II

con los minerales arcillosos caolinita y mica conservados, reflejan la composición del sedimento original (**Figura 12**).

Figura 12

Transformación o conservación de minerales que reflejan los procesos de enriquecimiento o empobrecimiento en hierro y aluminio en los diferentes conjuntos de los suelos (Gaviria y Faivre, 2005).



La precipitación del hierro que forma la plintita en el fondo de los perfiles, es un proceso que “fossiliza” el medio y preserva los minerales de la degradación. Los nódulos son, por lo tanto, testigos de los estados iniciales de la transformación del paisaje que ocurre progresivamente por el hundimiento de las tablas de agua y la disección de las sabanas.

CAPÍTULO II

5. EVOLUCIÓN DEL PAISAJE DE SABANA EN LOS LLANOS

La **Figura 13** muestra un par de perfiles de suelos en la altillanura disectada (**I** y **II**) y detalles de secciones delgadas preparadas para observaciones micromorfológicas. En los interfluvios más disectados hacia el este de la región, los suelos son limo-arenosos, textura más gruesa que en el interfluvio poco disectado, presumiblemente originada por el empobrecimiento hidrogeoquímico de arcillas discutido en el numeral anterior. Esta tendencia puede estar aumentada por la presencia de materiales inicialmente más arenosos ligados a antiguos drenajes, a partir de los cuales evolucionaron los suelos. En ellos aparecen costras y corazas petroféricas. Los procesos de degradación de minerales presentados para la secuencia del interfluvio poco disectado, constituye el punto de partida de los procesos que ocurren a medida que se transforman los materiales (ver también **Figura 3**).

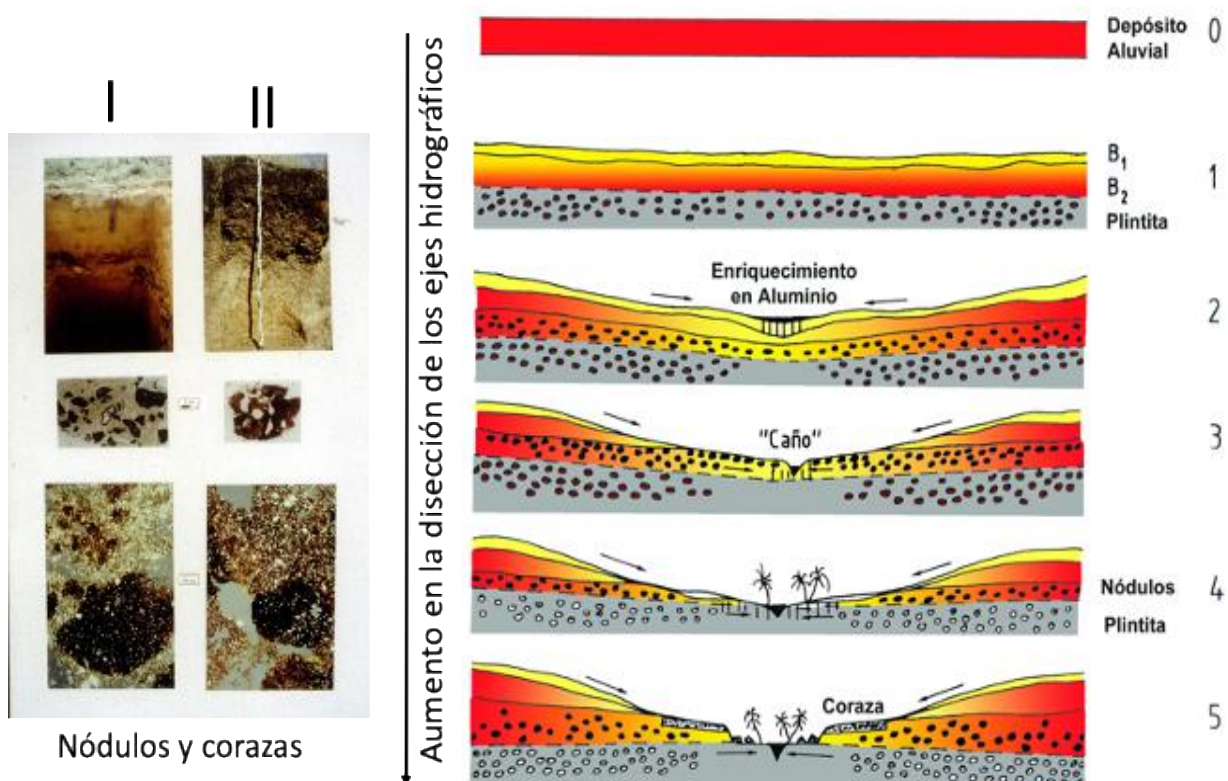
Un sedimento rojo inicial (0), de textura limo-arcillosa pierde hierro y materiales finos por efecto de la napa colgante que escurre lateralmente y genera una hidromorfía temporal (1). El suelo concentra cuarzo de tamaño limo y arena por enriquecimiento relativo y se vuelve progresivamente más permeable. La fuerte oscilación del nivel freático entre “verano” e “invierno” y los aportes de hierro con el agua que percola hacia el fondo de los perfiles, produce la formación de nódulos constituidos por un plasma denso con un cemento ferruginoso que endurece el material inicial formando un nivel de plintita donde se preservan los minerales arcillosos (3). Por fuera de estas figuras la matriz del suelo es un esqueleto de cuarzo que se empobrece en hierro y en arcillas (**Figura 13**).

A medida que avanza la disección por hundimiento del nivel freático en medios más permeables, el nivel nodular se conserva dentro de un suelo de textura arenosa como se aprecia en una sección delgada del suelo de la altillanura disectada, sobre una costra de hierro de formación secundaria (**I**). Un proceso más difícil de reconocer en su dinámica actual, erosiona el suelo y el nivel nodular aflora en la superficie del terreno en las colinas planas del paisaje de “serranía” (4).

CAPÍTULO II

Figura 13

Esquema que representa la evolución del paisaje de sabana en la altillanura por degradación hidrogeoquímica de minerales del suelo que promueve el hundimiento de los niveles freáticos y la disección de la red hidrográfica. Perfiles y secciones delgadas: I. Nivel nodular; II. Coraza petroférrica (Gaviria 1993; Gaviria y Faivre, 2005).



En algún momento de su historia paleoambiental, ligado a condiciones de mayor humedad, un enriquecimiento adicional en hierro cementó entre sí los nódulos de plintita por precipitación de hematita que endurece la matriz de cuarzo (II). Es el caso de estudio al oriente de la altillanura donde la disección es muy fuerte y el paisaje de serranía está "fossilizado" por la presencia de una coraza petroférrica (5).

CAPÍTULO II

6. CONSIDERACIONES FINALES

La evolución geomorfológica de los paisajes de la altillanura es un proceso de larga duración que inició a partir de la separación del bloque tectónico que impidió el aporte de materiales provenientes de la cordillera por la falla del río Meta. El material inicial fue un sedimento aluvial en un paisaje de planicie sobre-elevada que mantuvo condiciones climáticas más secas que la actual, durante largos períodos del Pleistoceno y Holoceno, interrumpidos por períodos más húmedos.

Los estudios paleoambientales han mostrado que durante los últimos miles de años en la región han prevalecido los paisajes de sabana, a pesar que en la actualidad la precipitación global es mayor de 1500 mm/año, más apropiada para una cobertura de selva. La estacionalidad de las lluvias, con bajas precipitaciones durante 3 a 4 meses del año, explica el descenso de varios metros en el nivel freático sobre grandes superficies de la altillanura. Esta dinámica hídrica dificulta el progreso de la vegetación arbórea que está restringida a las zonas bajas que bordean los “caños”. Las quemas probablemente constituyen otro factor negativo. Esta situación climática presente en la altillanura plana está exacerbada en la altillanura disectada, donde el hundimiento de las tablas de agua es mayor.

La degradación inicial de los suelos por la acción del agua se puso en evidencia en el transecto de un interfluvio poco disectado. Se demostró que los minerales arcillosos se transforman al quedar expuestos al ataque hidroggeoquímico cuando los óxidos de hierro que los protegen se disuelven en ambientes reductores hidromórficos. En los conjuntos superiores ocurre pérdida de sílice de caolinitas, pérdida de potasio en micas y liberación de aluminio que se inmoviliza en los minerales secundarios gibbsita y vermiculita. La hematita y parte de la goethita se liberan en los primeros horizontes y precipitan en el fondo de los perfiles, con figuras nodulares ricas en hematita microcristalina resistentes al agua. Los minerales heredados de los sedimentos se conservan en los nódulos gracias a la protección que brindan los óxidos de hierro. Los nódulos son testigos de la composición

CAPÍTULO II

del material inicial de los suelos. La matriz externa acumula cuarzo cuando los minerales arcillosos desaparecen por degradación y lavado.

Estos procesos hidrogeoquímicos promueven el hundimiento progresivo de las tablas de agua y la disección del paisaje en grandes áreas de la altillanura donde procesos de larga duración han desmantelado los oxisoles, permitiendo el enriquecimiento secundario con hierro de los niveles de plintita y la formación de corazas petroféricas.

REFERENCIAS

- Behling, H. y Hooghiemstra, H. (1998). Late Quaternary palaeoecology and palaeoclimatology from pollen records of the savannas of the Llanos Orientales in Colombia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 139, pp. 251-267.
- Berrio, J. C., Behling H. y Hooghiemstra H. Late Holocene history of savanna gallery forest from Carimagua área, Colombia. *Review of Palaeobotany and Palynology*, v. 111, pp. 295-308.
- Botero, P. (ed.), (1999). Paisajes fisiográficos de Orinoquia-Amazonia (ORAM) Colombia. *Análisis Geográficos (IGAC)*, Bogotá, v. 27-28, 1-361.
- Burgl, H. (1961). Historia geológica de Colombia. *Revista de la Academia Colombia de Ciencias*, Bogotá, v. 9, pp. 137-191.
- Gaviria, S. (1993). Évolution mineéralogique et géochimique du fer et de l'aluminium dans les sols ferrallitiques hydromorphes des Llanos Orientales de Colombie. Les états précoces du cuirassement. *Thèse Un. de Nancy I, France*, 1-216.
- Gaviria S. y Faivre, P. (1996). Efecto de la actividad biológica sobre el ciclo de elementos mayores en suelos de los Llanos Orientales de Colombia. *2nd International Symposium Environmental Geochemistry in Tropical Countries*, pp. 104-112.
- Gaviria, S.; Faivre P. (2005). Génesis y evolución de oxisoles en los Llanos Orientales. *Análisis Geográficos (IGAC)*, Bogotá, v. 33, pp. 50-64.

CAPÍTULO II

- Goosen, D. (1971). Physiography and soils of the Llanos Orientales, Colombia. *Publ. Fys. Geogr, Bodemkd. Lab. Univ. Amsterdam.*, v. 20, 198 p.
- Khobzy, J. (1981). Los campos de dunas del norte de Colombia y de los Llanos de la Orinoquia (Colombia y Venezuela). *Revista CIAF*, Bogotá, v.6, pp. 257-292.
- Khobzi, J., Kroonenberg, S., Faivre, P. y WEEDA, A. (1980). Aspectos geomorfológicos de la Amazonia y Orinoquia Colombianas. *Revista CIAF*, Bogotá, v. 5, pp. 97-126.
- Macedo, J., Bryan, R. B. (1989). Preferential microbial reduction of hematite over goethite in a Brazilian oxisol. *Soil. Sci. Soc. of Am. J*, v.53, pp. 1114-1118.
- Schwertmann, U., Taylor, R. M., Iron oxides. (1989). In: Minerals in soils environments, J.B. Dixon and S.B. Weed (eds). *SSSA Book Series 1*, Madison, 379-438.
- Tardy, Y., Bardossy, G. y Nahon, D. (1988). Fluctuations de l'activité de l'eau et successions des minéraux hydratés et deshydratés au sein des profils latéritiques ferrugineux et bauxitiques. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 307, Série II, pp. 753-759.
- Torrent J., Schwertmann U., Fechter H. y Alferez F. (1983). Quantitative relationships between soil color and hematite with dithionite. *Soil Science.*, v.136, pp.354-358.
- United States Department of Agriculture (USDA, 1990). Key to soil taxonomy (4^a Ed.). *SMSS Technical Monograph No. 19*.
- Van Der Hammen, T. (1983). The palaeoecology and palaeogeography of savannas. *Ecosystems of the world*. Cap. 13. p. 19-33; F. Bourlière (ed.), Elsevier.
- Van Der Hammen, T. y Absy, M. L. (1994). Amazonia during the last glacial. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 109, pp. 247-261.
- Van Der Hammen, T. y Hooghiemstra, H. (2000). Neogene and Quaternary history of vegetation, climate and plant diversity in Amazonia. *Quaternary Science Reviews*, v. 19, pp. 725-742.
- Wijmstra T.A. y Van Der Hammen, T. (1966). Palynological data on the history of tropical savannas in northern South America. *Leidse Geologische Mededelingen*, v. 38, pp. 71-90.

CAPÍTULO III

ESTUDIO DEL IMPACTO DEL CULTIVO DE SOJA EN TIERRAS DESMONTADAS DE LA PROVINCIA DEL CHACO, ARGENTINA

ESTUDIO DEL IMPACTO DEL CULTIVO DE SOJA EN TIERRAS DESMONTADAS DE LA PROVINCIA DEL CHACO, ARGENTINA

THE IMPACT OF SOYBEAN CROPPING ON AFTER FOREST CLEARING, IN CHACO PROVINCE, ARGENTINA

ESTUDO DO IMPACTO DO CULTIVO DE SOJA EM TERRAS DESBASTADAS NA PROVÍNCIA DE CHACO, ARGENTINA

Astor Emilio López¹, María Florencia Roldán², Laura Itatí Giménez³ y Sergio Montico⁴

¹INTA, P.R. Sáenz Peña, Chaco, Argentina, <https://orcid.org/0000-0002-6891-4779>

²INTA, P.R. Sáenz Peña, Chaco, Argentina, <https://orcid.org/0009-0009-1324-2272>

³FCA, UNNE, Corrientes, Argentina, <https://orcid.org/0000-0002-9139-4759>

⁴FCA, UNR, Zavalla, Santa Fe, Argentina, <https://orcid.org/0000-0002-8053-7734>

CAPÍTULO III

Resumen: En Argentina, el proceso de avance de la frontera agrícola se caracterizó por el monocultivo de soja, que en el Chaco ocupó áreas de bosque nativo. El trabajo evalúa el impacto de la soja (*Glycine max (L.) Merr*), en variables de suelo en tierras recientemente desmontadas. El trabajo se desarrolló en el Departamento Almirante Brown (Chaco) sobre cuatro Series de suelos y en tres condiciones de uso: bosque, un año y seis años de cultivo de soja. Se determinó densidad aparente, resistencia mecánica a la penetración, carbono orgánico, nitrógeno, fósforo, pH, conductividad eléctrica, infiltración y estabilidad estructural. Se realizó un análisis de varianza y multivariado. Se determinó que los suelos tienen diferente susceptibilidad a la degradación, en base principalmente a las impedancias mecánicas. Es necesario contemplar la Serie de suelo para comparar indicadores entre usos y se deben considerar las características de cada suelo para tomar decisiones de cambio de uso.

Palabras clave: cambio de uso - desmonte - Serie de suelos – soja

Summary: In Argentina, the advance of agriculture frontier process was characterized by soy monoculture, which in Chaco occupied native forest areas. The work evaluates the impact of soybean (*Glycine max (L.) Merr*), in soil variables and yield in cleared areas. The work was developed in Almirante Brown department (Chaco) on four soil series under three conditions of use: forest, one and six years of soybean cultivation. Bulk density, penetration resistance, organic carbon, nitrogen, phosphorus, pH, electrical conductivity, infiltration and structural stability were determined. An analysis of variance and multivariate were performed. It was determined that the soils have different susceptibility to degradation, based mainly on mechanical impedances. It is necessary to contemplate the soil series to compare indicators between uses and the characteristics of each soil should be considered to take decisions about use change.

Key Words: use change - clearing - soil series – soybean

Resumo: Na Argentina, o avanço do processo de fronteira agrícola foi caracterizado pela monocultura da soja, que no Chaco ocupou áreas de floresta nativa. O trabalho avalia o impacto da soja (*Glycine max (L.) Merr*), nas variáveis do solo e na produtividade em áreas desmatadas. O trabalho foi desenvolvido no departamento de Almirante Brown (Chaco) em quatro séries de solo sob três condições de uso: floresta, um e seis anos de cultivo de soja. Densidade aparente, resistência à penetração, carbono orgânico, nitrogênio, fósforo, pH, condutividade elétrica, infiltração e estabilidade estrutural foram determinados. Foi realizada uma análise de variância e multivariada. Foi determinado que os solos apresentam diferentes suscetibilidades à degradação, com base principalmente nas impedâncias mecânicas. É necessário contemplar a série de solos para comparar indicadores entre usos e as características de cada solo devem ser consideradas para a tomada de decisões sobre mudança de uso.

Palavras-chave: mudança de uso - limpeza - série solo - soja

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Investigador. lopez.astor@inta.gob.ar

CAPÍTULO III

1. INTRODUCCIÓN

En la Argentina, la agriculturización se caracterizó, a partir de la década del 80 del siglo pasado, por un creciente predominio de soja (*Glycine max (L.) Merr.*) en monocultivo en reemplazo de otros cultivos (Campitelli *et al.*, 2010; Volante *et al.*, 2014).

El sector sur del Departamento Almirante Brown, ubicado en el suroeste del “Impenetrable Chaqueño”, constituye el área de la Provincia del Chaco con mayor dinamismo en las transformaciones de los sistemas productivos (Paruelo *et al.*, 2004; Cuadra, 2012; García *et al.*, 2014a; Cuadra y Mónaca, 2016).

El proceso de desmonte y habilitación de tierras para uso agrícola más difundido en la región debe contar con la correspondiente autorización de la Dirección de Bosques, mediante planes de trabajo, que incluyen inventario forestal, aptitud de los suelos, y estudio de impacto ambiental (Boletín Oficial de Chaco, 2018). El mismo, consiste en tareas de rolado, junto a la siembra de pasturas megatérmicas, seguido del aprovechamiento de la madera de valor comercial, y se prosigue con la eliminación de restos no comercializables con fuego, finalmente, se realizan labranzas con herramientas de discos (Casas y Michelena, 1983).

Los cambios de uso del suelo generaron en la región degradación significativa en la calidad física y química de los suelos, en comparación con los suelos de la situación prístina en un plazo relativamente corto (Sanzano *et al.*, 2005; Rojas *et al.*, 2016).

Para predecir y detener los procesos de degradación, es indispensable utilizar indicadores para monitorear y evaluar si las tendencias se mantienen, dependiendo de las prácticas de manejo realizadas (Rojas y Zurita, 2017).

El problema de degradación más frecuente es la compactación superficial, que deriva en la pérdida de espacios porosos y con ello en la reducción de la infiltración (INF) y del almacenamiento de agua en el suelo por un lado, y de la generación de procesos erosivos por otro (Moro *et al.*, 2005; Olivares *et al.*, 2010; Rojas *et al.*, 2016).

En las distintas regiones de Argentina se registran casos de desequilibrio entre usos de la tierra y su aptitud que se manifiestan en: desertificación, degradación de suelos, expansión agropecuaria desordenada y pérdida de biodiversidad (Olivares *et al.*, 2005;

CAPÍTULO III

Sobral, 2009; García *et al.*, 2014a; Silberman *et al.*, 2015). Precisamente, en Chaco, el uso de la cartografía de suelos está centralizado en la evaluación de la potencialidad de los suelos para la producción. Los proyectos de desarrollo y programas de Ordenamiento Territorial, demandan la predicción del comportamiento de las tierras bajo usos específicos (Arzeno, 2008; Sobral, 2009; Perucca y Kurtz, 2016; Brest *et al.*, 2018).

Debe investigarse con énfasis, en base a los atributos originales del suelo, para llegar a una mejora de las funciones particulares de interés para cada caso, que optimicen los objetivos combinados de alta producción de cultivos, baja degradación ambiental y uso sostenible del recurso suelo (Pla, 2013).

El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto del cultivo de soja bajo siembra directa (SD) sobre indicadores edáficos en Series de suelos representativas, para generar conocimiento sobre el impacto del cultivo de soja en las propiedades físicas y químicas de suelos recientemente habilitados, para optimizar la adopción de decisiones en la expansión de la frontera agropecuaria en el sudoeste del Impenetrable Chaqueño.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el sector sur del Departamento Almirante Brown, en la provincia del Chaco. El área de trabajo, abarcó las localidades Río Muerto, Los Frentones, Pampa del Infierno y Concepción del Bermejo (550.000 ha), (Figura 1; Tabla 1), considerando la presión del proceso de agriculturización en esta región en los últimos veinte años. El clima del área de estudio es subtropical semiárido a subhúmedo, con un régimen pluviométrico de 800 mm y una temperatura media anual de 23°C (Ledesma y Zurita, 1995a). Las precipitaciones son estacionales, concentradas en primavera y verano, siendo los inviernos secos. Existe una gran variación interanual, una condición ambiental-climática muy común en la región. Hay alternancia de períodos húmedos y secos. El relieve es una llanura tendida muy suavemente ondulada. El material original de los suelos es loes-aluvial local fósil. Los suelos son de colores claros, de escaso desarrollo y texturas medias en los albardones de paleocauces; de textura pesada en lomas bajas y áreas de derrame.

CAPÍTULO III

Los suelos pertenecen a los órdenes Alfisoles, Molisoles, Inceptisoles y Entisoles (Ledesma y Zurita, 1995a).

Figura 1

Ubicación del Área de Estudio al Sur del Departamento Almirante Brown (Chaco, Argentina).

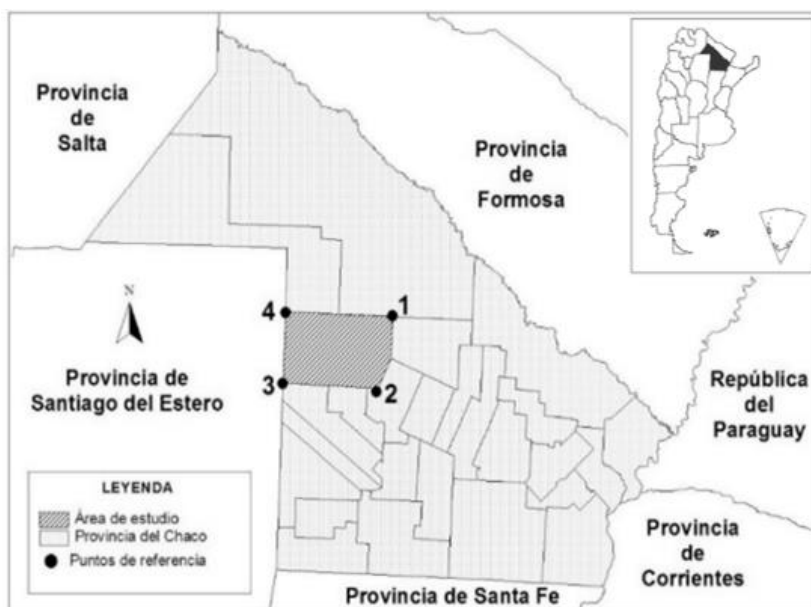


Tabla 1

Puntos de Georreferencia que Delimitan el Área de Estudio.

1 - Noreste
26° 7' S 60°48' O
2 - Sureste
26°40' S 60°54' O
3 - Suroeste
26°39' S 61°42' O
4 - Noroeste
26°6'S 61°42' O

CAPÍTULO III

La vegetación dominante es de bosque alto abierto, en explotación forestal y la agricultura en suelos de desmonte. Este sector del “Impenetrable” carece de aguas superficiales, y la subterránea es, en general, de mala calidad (Ledesma y Zurita, 1995a).

2.1 EVALUACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Mediante información preliminar de la Carta de Suelos del Departamento Almirante Brown (actualmente en elaboración) se seleccionaron cuatro Series de suelos, representativas del área, contrastantes entre sí y clasificadas como Clase de Uso IV en el Sistema de clasificación por capacidad de uso (Klingebiel y Montgomery, 1964). A continuación, se describen brevemente cada una de las Series de suelos (Figura 2):

Serie Tolosa (To): se encuentra en lomas tendidas, evolucionadas, de relieve normal. Es un *Haplustept Udico*, Horizontes diagnósticos: epipedón ócrico, horizonte cámbico, horizonte Ck. Su vegetación natural es de bosque maderable (Zurita, 2007).

Serie Luz (Lj): se encuentra en lomas medias tendidas de relieve normal. Es un *Haplustol Óxico*. Horizontes diagnósticos: epipedón mólico, horizonte cámbico, y horizonte Ck. Su vegetación natural es de bosque de dos estratos (Zurita, 2007).

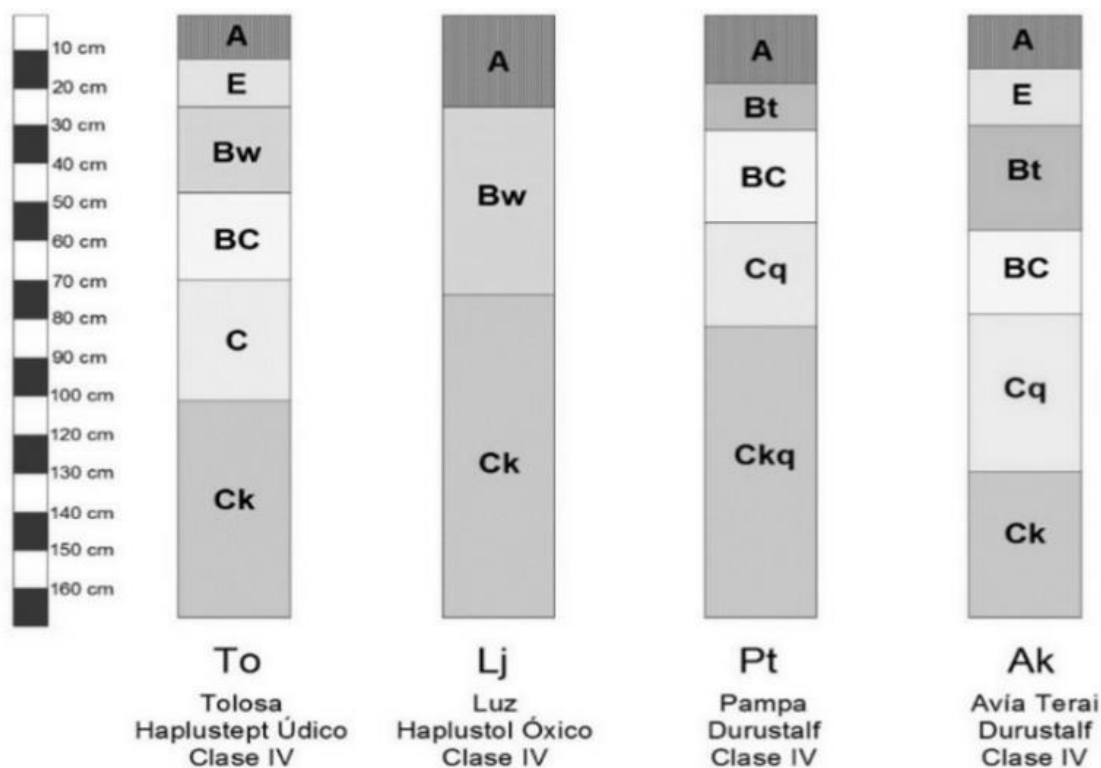
Serie Pampa (Pt): se encuentra en lomas tendidas, moderadas, de relieve normal. Es un *Durustalf*. Horizontes diagnósticos: epipedón ócrico y horizonte argílico moderadamente textural, duripán, horizonte Ck. Su vegetación natural es de pajonal con un arbustal que puede alcanzar la forma de ralera (Ledesma y Zurita, 1995b).

Serie Avía Terai (Ak): Se encuentra en lomas medias bajas tendidas, evolucionadas, de relieve subnormal. Es un *Durustalf*. Horizontes diagnósticos: epipedón ócrico, horizonte argílico fuertemente textural, duripán, horizonte Ck. Su vegetación natural es de fachinal y vegetación basal, rodeados por ralera (Ledesma y Zurita, 2003).

CAPÍTULO III

Figura 2

Esquema de los perfiles modales (horizontes y espesores) de las Series de suelos Tolosa (To), Luz (Lj), Pampa (Pt) y Avía Terai (Ak), indicando su clasificación taxonómica y aptitud de uso.



Seguidamente, se procedió a ubicar los lotes experimentales que tuvieran las Series de suelos seleccionadas, pero que además presentaran a campo las condiciones de uso de bosque, y luego del desmonte y habilitación, de un año de cultivo y de seis años de monocultivo de soja, bajo SD. Se eligió la secuencia soja sobre soja por ser el sistema más común en suelos desmontados y puestos en producción, en el área de estudio.

CAPÍTULO III

Tabla 2

Tratamientos evaluados (T1 a T12), integrando Series de suelos (Tolosa, Luz, Pampa y Avía Terai) con condiciones de uso (bosque, un año de cultivo y seis años de monocultivo de soja).

TRATAMIENTOS	SERIES DE SUELOS - CONDICIÓN DE USO
T1	Tolosa – Bosque
T2	Tolosa - Soja un año posterior al desmonte
T3	Tolosa - Soja continua durante seis años posteriores al desmonte
T4	Luz - Bosque
T5	Luz - Soja un año posterior al desmonte
T6	Luz - Soja continua durante seis años posteriores al desmonte
T7	Pampa - Bosque
T8	Pampa - Soja un año posterior al desmonte
T9	Pampa - Soja continua durante seis años posteriores al desmonte
T10	Avía Terai - Bosque
T11	Avía Terai - Soja un año posterior al desmonte
T12	Avía Terai - Soja continua durante seis años posteriores al desmonte

Para el análisis de la evolución de las propiedades edáficas se establecieron 12 tratamientos integrando cuatro Series de suelos con tres condiciones de uso (Tabla 2), resultando cuatro tratamientos (T1, T4, T7 y T10) de suelos con bosques (Bo), cuatro tratamientos (T2, T5, T8 y T11) de suelos con un año de cultivo de soja (1S), y cuatro tratamientos (T3, T6, T9 y T12) de suelos con seis años de monocultivo de soja (6S).

Por otra parte, en cada Serie de suelo se seleccionaron siete sitios de evaluación, distribuidos según la condición de uso, habiendo un sitio para bosque, y tres para un año de soja y seis años de monocultivo de soja, respectivamente, siendo en total 28 sitios.

CAPÍTULO III

Asimismo, en cada sitio de Bo se ubicaron cinco estaciones de evaluación, mientras que se dispusieron quince estaciones en los 1S y 6S. En cada sitio de 1S y 6S, las cinco estaciones se instalaron en una transecta diagonal en los lotes evaluados, distanciadas 80 metros unas de otras y alejadas de los límites de las unidades cartográficas, constituyendo un total de 140 estaciones. La extracción de las muestras de suelo y la medición de las variables edáficas a campo, se llevaron a cabo, con posterioridad a la cosecha del cultivo de soja de la campaña 2012/2013. Para la evaluación del estado actual de los suelos, en los Bo, 1S y 6S, se determinaron las siguientes variables:

Densidad aparente (DA): La DA de un horizonte o determinado espesor de suelo, es la relación que existe entre la masa de suelo seco a 105°C y el volumen que ocupa, incluyendo los poros, y se expresa en g.cm^{-3} . La DA del suelo varía, entre otros factores, con la textura, la estructura, el contenido de materia orgánica y las labranzas. Se determinó mediante el método del cilindro basado en Stengel (1983). Se tomaron muestras en cada estación de muestreo en los espesores de 0 - 5, 5 - 10 y 10 - 20 cm.

Resistencia mecánica a la penetración (RMP): se determinó a través del índice de cono (IC) utilizando un penetrómetro de impacto (Stolf, 1991). La RMP expresada en mega pascuales (MPa), fue medida a 0 - 10 y 10 - 20 cm en todos los tratamientos, con 15 repeticiones en cada estación de muestreo. Debido a que la RMP está condicionada por el contenido de humedad al momento del muestreo, los valores relevados se corrigieron a un porcentaje de humedad relacionado a la friabilidad de los suelos mediante una recta de ajuste (Jorajuría Collazo, 2004; Zerpa, 2006).

Carbono Orgánico Total (COT): El nivel de carbono orgánico oxidable se determinó, por mezcla oxidante fuerte, escala semi-micro, siguiendo la norma IRAM-SAGPyA 29571-2 (2011), la cual se basa en la metodología propuesta por Walkley y Black (1934). Las determinaciones de COT se realizaron sobre las muestras compuestas (10 submuestras) tomadas en cada estación de muestreo en los espesores de 0 - 10 y 10 - 20 cm. Los resultados fueron expresados en términos de concentración en porcentaje (%), como COT.

Nitrógeno Total (N): El nivel de N en el suelo, se determinó por el método Kjeldahl modificado, escala semi-micro (Bremmer and Mulvaney, 1996), siguiendo la norma IRAM-

CAPÍTULO III

SAGyP 29572-1 (2011). Las determinaciones de N se realizaron sobre las muestras compuestas (10 submuestras) tomadas en cada estación de muestreo en los espesores de 0 - 10 y 10 - 20 cm. Los resultados fueron expresados en términos de concentración en porcentaje (%).

Fósforo extraíble (P): El contenido de P, se determinó por el método Bray Kurtz 1 modificado, mediante extracción con solución de fluoruro de amonio y ácido clorhídrico, siguiendo la Norma IRAM-SAGPyA 29570-1 (2010). Las determinaciones se realizaron sobre las muestras compuestas (10 submuestras) extraídas en estación de muestreo en los espesores 0 - 10 y 10 - 20 cm. Los resultados fueron expresados en partes por millón (ppm).

Potencial Hidrógeno (pH): El pH, se midió con un potenciómetro, sobre una suspensión de suelo:agua en relación 1:2,5 (m/V) siguiendo la norma IRAM-SAGyP 29574 (2011). Las determinaciones se realizaron sobre las muestras compuestas (10 submuestras) extraídas en los espesores 0 - 10 y 10 - 20 cm, en cada estación de muestreo.

Conductividad Eléctrica (CE): La CE se midió con un conductímetro sobre el extracto suelo:agua con una relación, 1:2,5 (m/V) y se expresó la lectura en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Las determinaciones se realizaron sobre las muestras tomadas en cada sitio de estación de muestreo en los espesores de 0 - 10 y 10 - 20 cm.

Infiltración (INF): La INF básica se utiliza como parámetro de calidad de suelos porque es sensible a condiciones cercanas a la superficie (USDA, 1999). Los datos de INF se refieren a la velocidad con que ingresa el agua en la superficie del suelo en $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$. Se determinó en cada estación de muestreo, con un infiltrómetro-permeámetro de disco, adaptado por el Instituto de Suelos de INTA Castelar. (Gil, 2006).

Estabilidad de Agregados (EEA): La EEA fue determinada por el método descrito por De Boodt y De Leenheer (1967), para ello se tomaron muestras no disturbadas, en los espesores de 0 - 10 y 10 - 20 cm en cada tratamiento en estudio. Se obtuvo el cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP, mm) como una medida de la estabilidad de los agregados. A mayor CDMP menor es la estabilidad de los agregados del suelo.

CAPÍTULO III

2.2 DISEÑO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Análisis de la Varianza: El análisis de las variables de suelo se realizó a través de un Análisis de la Varianza correspondiente a un diseño Completamente Aleatorizado con 12 tratamientos (Tabla 2). El procesamiento de los datos se realizó con el software InfoStat versión 2016 (Di Rienzo *et al.*, 2016; licencia adquirida por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria).

Análisis de correlación: El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la magnitud de la asociación lineal entre dos variables que no depende de las unidades de medida de las variables originales. Se realizó un análisis de correlación de Pearson entre las variables pH, CE, COT, N, P, RMP, DA, INF y CDMP. Se obtuvo una matriz de correlaciones entre todas las variables, con su respectivo coeficiente de correlación.

Análisis multivariado: Las herramientas multivariadas como el análisis de componentes principales (ACP) permiten estudiar el comportamiento simultáneo de las variables con el objetivo de evaluar si las mismas pueden separar las condiciones principales de estudio. El análisis de las variables se realizó separando los datos según los espesores estudiados de 0 - 10 y 10 - 20 cm.

3. RESULTADOS

3.1 DENSIDAD APARENTE: Los valores de DA se incrementaron cuando los lotes se destinaron a la producción agrícola, siendo en el sexto año del cultivo de soja donde se produjo el mayor valor para los tres espesores estudiados, simultáneamente, la misma, aumentó en profundidad en cada uno de los tratamientos. En los 1S la DA aumentó ($1,11 \text{ g.cm}^{-3}$) en relación a los Bo ($0,96 \text{ g.cm}^{-3}$) y más aún en los 6S ($1,24 \text{ g.cm}^{-3}$), existiendo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0001$) entre ellas. Los CV fueron 10,71% para los Bo, 12,69% para los 1S y 9,26% para los 6S.

La interacción de los valores de DA entre los tratamientos analizados y los espesores no fue significativa ($p > 0,05$), por lo que se describirán los resultados para los tratamientos con los tres espesores en conjunto. Las diferencias de DA fueron significativas entre tratamientos ($p < 0,0001$).

CAPÍTULO III

En la Tabla 3 se muestran los valores medios de DA de los tratamientos, los coeficientes de variación y las diferencias estadísticas encontradas entre ellos. El valor máximo fue de 1,28 g.cm⁻³ en el T12 y el valor mínimo fue de 0,91 g.cm⁻³ en el T1.

Tabla 3

Densidad aparente (DA; g.cm⁻³) y coeficiente de variación (CV; %) en los 12 tratamientos evaluados, independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la DA entre los tratamientos.

TRATAMIENTOS	DA (g.cm ⁻³)	CV (%)
T1	0,91 A	9,75
T2	1,22 D	8,76
T3	1,21 D	8,43
T4	0,94 AB	8,81
T5	1,09 C	13,28
T6	1,27 E	8,86
T7	1,02 B	12,40
T8	1,12 C	9,29
T9	1,22 D	8,53
T10	0,97 AB	8,21
T11	1,01 B	12,55
T12	1,28 E	10,05

Al comparar según la condición de uso, los Bo T1 y T7, se diferencian significativamente. En los 1S, T2 se diferencia significativamente de T5, T8 y T11 y, por otra parte, T11 se diferencia de T5 y T8. En los 6S, T3 y T9 se diferencian significativamente de T6 y T12.

CAPÍTULO III

Al comparar las condiciones de uso, se diferenciaron estadísticamente los Bo frente a los 1S ($p < 0,0001$) y 6S ($p < 0,0001$), lo mismo sucede al contrastar esta última con los 1S ($p < 0,0001$).

3.2 RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN: La interacción entre las condiciones de uso y los espesores fue significativa ($p = 0,022$), como así también entre las condiciones de uso ($p < 0,0001$) y entre los espesores estudiados ($p < 0,0001$).

Las diferencias de los valores de RMP entre las condiciones de uso en los primeros 10 cm fueron estadísticamente significativas ($p > 0,0001$), siendo de 0,69 MPa en los Bo, 1,19 MPa en los 1S y 1,64 MPa en los 6S.

La mayor variabilidad se observó en los Bo (CV 42,0%) en relación a los 1S y 6S (27,1 y 25,0%, respectivamente).

En el espesor de 10 a 20 cm, si bien, la RMP aumentó con el uso agrícola, al igual que en el espesor superficial, las diferencias sólo fueron estadísticamente significativas ($p > 0,05$) en 6S (2,22 MPa) respecto de Bo (1,69 MPa) y 1S (1,90 MPa). Los CV en este espesor fueron 25,2% en los Bo, 15,3% en los 1S y 22,9% en los 6S. Al considerar los valores de RMP de los 12 tratamientos, los dos espesores estudiados y la interacción entre ambos factores, se hallaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0001$).

La Tabla 4 muestra los valores medios de la RMP determinados en el espesor de 0 - 10 cm. La mayor RMP se presentó en T6 y el menor valor en el T1. En el espesor superficial, al confrontar los 12 tratamientos puede observarse que, para la misma Serie de suelo, en los casos de Tolosa (T1-T2-T3) y Luz (T4-T5-T6) se diferenciaron significativamente entre sí para las diferentes condiciones de uso. Sin embargo, en Pampa (T7 y T8) y Avía Terai (T10 y T11) no se diferenciaron de T9 y T12, respectivamente.

CAPÍTULO III

Tabla 4

Resistencia mecánica a la penetración (RMP; MPa) y coeficiente de variación (CV%) en los 12 tratamientos evaluados en el espesor 0 - 10 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la RMP entre los tratamientos.

TRATAMIENTOS	RMP (MPa)	CV (%)
T1	0,51 A	6,39
T2	1,43 C	22,63
T3	1,70 D	30,58
T4	0,60 A	24,04
T5	1,11 B	20,9
T6	1,72 D	19,5
T7	0,81 AB	28,77
T8	1,12 B	32,71
T9	1,44 C	28,96
T10	0,84 AB	57,03
T11	1,11 B	22,93
T12	1,68 CD	19,64

Además, los Bo (T1-T4-T7-T10) no se diferenciaron significativamente entre ellos, sin embargo, los 1S, T5, T8 y T11 se diferenciaron significativamente de T2, y en los 6S, T9 se diferencia significativamente de T3 y T6.

La Tabla 5 muestra los valores medios de la RMP determinados en los distintos tratamientos en el espesor de 10 a 20 cm. La mayor RMP se observó en T6 con 2,40 MPa y el menor valor en el T7 con 1,47 MPa. En el espesor subsuperficial, al confrontar los 12 tratamientos se observó que, para el mismo suelo, en el caso de la Serie Tolosa, T1 se diferencia de T2, y en Pampa y Avía Terai, se diferenciaron los tratamientos con 6S, es decir, T6 y T9. Cabe destacar que T6 presenta los valores máximos en los dos espesores.

CAPÍTULO III

Tabla 5

Resistencia mecánica a la penetración (RMP; MPa) y coeficiente de variación (CV%) en los 12 tratamientos evaluados en el espesor 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la RMP entre los tratamientos.

TRATAMIENTOS	RMP (MPa)	CV (%)
T1	1,64 AB	1,04
T2	2,20 CD	1,11
T3	2,02 BC	5,01
T4	1,81 ABC	19,5
T5	1,83 ABC	12,2
T6	2,40 D	3,32
T7	1,47 A	8,45
T8	1,69 AB	3,84
T9	2,23 CD	0,73
T10	1,84 ABC	5,39
T11	1,88 ABC	7,91
T12	2,23 CD	1,63

Además, los Bo (T1-T4-T7-T10) no se diferenciaron significativamente entre ellos, sin embargo, en los 1S, T2 se diferenció significativamente de T8, y en los 6S, T3 se diferencia significativamente de T6.

3.3 CARBONO ORGÁNICO TOTAL: Las concentraciones de COT en general disminuyeron en los lotes cultivados y fueron más bajos en el espesor subsuperficial.

El análisis completo de todos los datos de COT mostró diferencias significativas para las condiciones de uso ($p < 0,0001$), los dos espesores estudiados ($p < 0,0001$) y la interacción entre las diferentes condiciones de uso y los espesores ($p < 0,0001$).

CAPÍTULO III

Las concentraciones de COT, en los primeros 0 - 10 cm fueron de 3,43% en Bo, 2,25% en los 1S y 1,80% en los 6S, siendo estas diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0001$), con CV de 25,44, 17,05 y 21,11%, respectivamente.

En el espesor de 10 - 20 cm, si bien, los valores de COT disminuyeron con el uso agrícola, al igual que en el espesor superficial, las diferencias sólo fueron estadísticamente significativas ($p > 0,05$) en 6S (1,32%) respecto de Bo (1,75%) y 1S (1,57%). Los CV para este espesor en Bo, 1S y 6S fueron 21,62, 21,85 y 29,21%, respectivamente.

Las concentraciones de COT determinadas en el espesor subsuperficial, permiten clasificarlos como suelos moderadamente provistos en Bo y 1S, y como pobremente provistos en 6S.

El análisis de los valores de COT de los 12 tratamientos, los dos espesores estudiados y la interacción entre ambos factores, detectó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0001$), en todos los casos.

La Tabla 6 muestra los valores medios de COT determinados en los distintos tratamientos en el espesor de 0 - 10 cm. El valor máximo fue de 4,23 en el T1, y el valor mínimo de 1,71 en el T6.

En el espesor superficial, al observar los tratamientos de igual Serie de suelo, se puede ver que, en Tolosa, T1 se diferencia significativamente de T2 y T3, en Luz (T4, T5 y T6) y Avía Terai (T10, T11 y T12) los tratamientos se diferencian significativamente entre sí, y en Pampa T7 y T8 se diferencian de T9. El análisis según la condición de uso, puso en evidencia que, en los Bo, T1 y T4 se diferencian significativamente de T7 y T10, en los 1S, T2 se diferencia de T5, T8 y T11. Sin embargo, en los 6S no se observan diferencias significativas entre ellos. Al contrastar las condiciones de uso, Bo fue estadísticamente diferente de 1S ($p < 0,0001$) y 6S ($p < 0,0001$), como así también lo fue 1S de 6S ($p < 0,0001$).

CAPÍTULO III

Tabla 6

Concentración de carbono orgánico total (COT; %) y coeficiente de variación (CV %) en los 12 tratamientos evaluados en el espesor 0 - 10 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de COT entre los tratamientos.

TRATAMIENTOS	COT (%)	CV (%)
T1	4,23 E	10,22
T2	1,99 A	16,35
T3	1,75 A	26,13
T4	3,78 E	22,49
T5	2,32 B	12,25
T6	1,71 A	17,06
T7	2,76 CD	13,10
T8	2,36 BC	19,96
T9	1,99 A	21,03
T10	2,97 D	30,18
T11	2,34BC	14,25
T12	1,74A	16,35

La Tabla 7 muestra los valores medios del contenido de COT determinados en los distintos tratamientos en el espesor de 10 a 20 cm. El valor máximo fue de 1,94 en el T7 y el valor mínimo de 1,19 en el T6.

La comparación de los tratamientos de igual Serie de suelo, mostró que, en Tolosa, T1 se diferencia significativamente de T2, en Luz T4 y T5 lo hacen de T6; en Pampa T7 y T8 son diferentes de T9, mientras que en Avía Terai los tratamientos no se diferencian significativamente entre sí.

CAPÍTULO III

Tabla 7

Concentración de carbono orgánico total (COT; %) y coeficiente de variación (CV; %) en los 12 tratamientos evaluados en el espesor 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de COT entre los tratamientos.

TRATAMIENTOS	COT (%)	CV (%)
T1	1,78 CD	16,48
T2	1,33 AB	26,84
T3	1,48 BC	27,03
T4	1,63 BCD	18,80
T5	1,60 BCD	11,61
T6	1,19 A	34,07
T7	1,94 D	14,48
T8	1,75 CD	21,85
T9	1,31 AB	26,25
T10	1,64 BCD	35,48
T11	1,57 BC	18,78
T12	1,32 AB	28,67

El análisis según la condición de uso, determinó que los Bo no se diferencian significativamente entre ellos, T2 se diferencia de T8 en los 1S y, T3 de T6 en los 6S.

Al contrastar entre Series de suelos se encontró que en el espesor 10 - 20 cm solo se diferencia Luz de Pampa ($p = 0,048$). El análisis por las condiciones de uso diferenció estadísticamente los Bo de los 1S ($p = 0,0474$) y 6S ($p < 0,0001$), lo mismo sucedió al contrastar estas dos últimas ($p = 0,0003$).

CAPÍTULO III

3.4 NITRÓGENO TOTAL: El análisis completo de todos los valores de N presentó diferencias significativas para las condiciones de uso ($p < 0,0001$), los dos espesores estudiados ($p = 0,0285$) y la interacción entre éstos ($p = 0,0031$). La concentración de N, en el espesor superficial, disminuyó significativamente ($p < 0,0001$) cuando los suelos fueron puestos en producción agrícola. Los valores medios de N fueron de 0,219% en Bo, 0,165% en 1S y 0,138% en 6S. Lo que permitiría clasificar a los Bo como muy bien provistos, a los 1S como bien provistos y a los 6S como moderadamente provistos de N. Los datos de N en Bo presentaron mayor variabilidad (CV 22,61%) en relación a los 1S y 6S (CV 18,67 y 17,91%, respectivamente). La concentración de N, en el espesor de 10 - 20 cm, registró diferencias estadísticamente significativas en 1S (0,128%) con respecto a Bo (0,115%) y a 6S (0,107%). No obstante, en estas tres condiciones de uso, los suelos estarían moderadamente provistos de N. Siendo los CV de esos contenidos de N, 15,83, 20,63 y 21,21%, para Bo, 1S y 6S, respectivamente.

El análisis estadístico de los valores medios de N determinados en los 12 tratamientos, los espesores y la interacción entre ambos, mostró diferencias significativas ($p < 0,0001$) en todos los casos.

En la Tabla 8 se pueden observar los valores medios de los contenidos de N del espesor de 0 - 10 cm, determinados en los distintos tratamientos, donde el valor máximo fue 0,256% en T1 y, el valor mínimo 0,124% en T6.

CAPÍTULO III

Tabla 8

Concentración de Nitrógeno total (N; %) y coeficiente de variación (CV; %) de los 12 tratamientos evaluados en el espesor 0 - 10 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de N entre los tratamientos.

TRATAMIENTOS	N (%)	CV (%)
T1	0,256 F	5,70
T2	0,154 BCD	6,61
T3	0,148 BC	7,73
T4	0,218 EF	3,25
T5	0,174 D	4,33
T6	0,124 A	7,55
T7	0,176 DE	0,91
T8	0,166 CD	4,71
T9	0,144 AB	9,67
T10	0,216 E	9,26
T11	0,166 CD	7,16
T12	0,138 AB	2,23

Asimismo, al considerar los tratamientos de igual Serie de suelo, se puede ver que, en Tolosa, T1 se diferencia significativamente de T2 y T3, en Luz (T4, T5 y T6) y en Avía Terai (T10, T11 y T12), todos se diferencian entre sí, sin embargo, en Pampa, T7 y T8 lo hacen de T9. Ahora bien, al tener en cuenta las condiciones de uso se puede ver que, en los Bo, T1 se diferencia significativamente de T7 y T10, en los 6S T3 lo hace de T6, por el contrario, en los 1S no hay diferencias entre ellos.

Los valores medios de la concentración de N determinados en los distintos tratamientos en el espesor de 10 a 20 cm se muestran en la Tabla 9.

Se puede observar que el mayor valor de concentración fue 0,138% en T8 y el menor fue 0,097% en T6. Cabe destacar que T6 presentó el valor mínimo de concentración de N, en los dos espesores estudiados.

CAPÍTULO III

Tabla 9

Concentración de Nitrógeno total (N; %) y coeficiente de variación (CV; %) de los 12 tratamientos evaluados en el espesor 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de N entre los tratamientos.

TRATAMIENTOS	N (%)	CV (%)
T1	0,126 BCD	16,46
T2	0,113 BC	23,74
T3	0,115 BC	20,11
T4	0,123 BCD	15,77
T5	0,129 CD	15,97
T6	0,097 A	26,99
T7	0,102 AB	14,54
T8	0,138 D	22,95
T9	0,113 ABC	19,35
T10	0,110 ABC	9,09
T11	0,127 CD	16,11
T12	0,104 AB	15,37

Asimismo, se observó que, entre los tratamientos de igual Serie de suelo, los contenidos de N no se diferenciaron significativamente en Tolosa, sin embargo, en Luz el T4 y el T5 se diferenciaron del T6; en Pampa el T7 y el T9 lo hicieron significativamente del T8, y en Avía Terai el T11 lo hizo del T12. Por otra parte, según la condición de uso, entre los Bo (T1, T4, T7, T10) no hubo diferencias en el contenido de N. Por el contrario, el T2 (0,113%) se diferenció del T8 (0,138%) entre los 1S, y el T3 (0,115%) lo hizo del T6 (0,097%) entre los 6S.

3.5 FÓSFORO EXTRAÍBLE: Los niveles de P, expresados en partes por millón (ppm), en las diferentes condiciones de uso y en los dos espesores estudiados, fueron significativamente diferentes ($p < 0,0001$), no así, la interacción entre las condiciones de

CAPÍTULO III

uso y los espesores ($p > 0,05$). Sin embargo, estos niveles en todos los casos clasifican a los suelos, en los espesores analizados, como muy bien provistos de este elemento.

La concentración de P, al comparar entre las condiciones de uso, fue significativamente mayor en los 1S (144,2 ppm) en relación a los 6S (121,7 ppm) y a los Bo (107,9 ppm), siendo en éstos últimos significativamente menor. Los CV fueron de 26,02%, 25,14% y 26,17% para los Bo, 1S y 6S, respectivamente. El análisis, de la concentración de P, en función a los espesores estudiados, determinó que existen diferencias significativas entre ellos ($p < 0,0001$). La Tabla 10 muestra los valores medios de P determinados en los 12 tratamientos, se puede observar, que el valor máximo fue 166,81 ppm en el T2 y el valor mínimo 97,56 ppm en el T7.

Tabla 10

Concentración de fósforo extraíble (P; ppm) y coeficiente de variación (CV; %) en los 12 tratamientos evaluados independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la concentración de P entre los tratamientos.

TRATAMIENTOS	P (ppm)	CV (%)
T1	112,05 ABC	9,2
T2	166,81 E	6,97
T3	126,09 BC	5,53
T4	107,53 AB	9,15
T5	131,58 C	5,82
T6	122,63 BC	5,47
T7	97,56 A	10,34
T8	129,18 BC	5,95
T9	123,53 BC	5,59
T10	114,59 ABC	9,18
T11	149,27 D	5,50
T12	114,49 ABC	6,66

CAPÍTULO III

Además, se puede observar que, el T2 se diferencia significativamente de T1 y T3 en Tolosa, T4 lo hace de T5 en Luz, en Pampa el T7 se diferencia de T8 y T9, mientras que en Avía Terai el T11 lo hace de T10 y T12, al considerar los niveles de P en tratamientos de igual Serie de suelo. Al considerar, los tratamientos por su condición de uso, no se observan diferencias significativas entre los Bo y entre los 6S, lo contrario sucede entre los 1S, siendo T2 y T11 diferentes entre ellos y distintos de T5 y T8.

3.6 POTENCIAL HIDRÓGENO: Los valores de pH del suelo, resultaron ser estadísticamente diferentes ($p < 0,0001$) entre las condiciones de uso, sin embargo, no mostraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los espesores estudiados. Asimismo, tampoco hubo interacción significativa ($p > 0,05$).

El valor medio de pH mostró un incremento significativo, desde los Bo (6,54), a los 1S (6,93) y de éstos, a los 6S (7,11). Es decir, de acuerdo a la escala de pH (USDA, 2017), los Bo, se clasificaron como levemente ácidos, mientras que los 1S y 6S resultaron ser neutros. Los CV fueron 9,4, 5,2 y 4,3% para los Bo, 1S y 6S, respectivamente. Por otra parte, el análisis estadístico, mostró diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre los valores medios de pH del suelo de los tratamientos. Sin embargo, no fue significativa la diferencia entre los espesores, como así tampoco, la interacción entre tratamientos y espesores ($p > 0,05$).

La Tabla 11 muestra los valores medios de pH determinados en los distintos tratamientos, independientemente de los espesores. El pH más alto, se determinó en el T3 con un valor de 7,18 (neutro), y el más bajo, en el T7, con un valor de 6,18 (levemente ácido). Se puede observar que las diferencias de pH, entre tratamientos con la misma serie de suelo, fueron significativas ($p < 0,05$) entre T1 (débilmente ácido) de T2 y T3 (neutros), no así entre estos dos últimos. No se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los T4, T5 y T6 (neutros), correspondientes a suelos de la Serie Luz. Al igual que en Tolosa, T7 (levemente ácido) se diferenció de T8 y T9 (neutros), pero no hubo diferencias entre ellos ($p > 0,05$), en Pampa. Por otro lado, en Avía Terai, el T12 se diferenció significativamente de los T10 y T11, aunque todos fueron clasificados como suelos neutros.

CAPÍTULO III

Tabla 11

Valor medio del potencial hidrógeno (pH) y coeficiente de variación (CV; %) de los tratamientos (T1 a T12), evaluados en el espesor de 0 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) de pH entre los tratamientos.

TRATAMIENTOS	Ph	CV (%)
T1	6,32	10,93
T2	7,06 CD	4,44
T3	7,18 D	4,91
T4	6,96 BCD	4,85
T5	6,90 BC	4,20
T6	7,05 CD	4,65
T7	6,18 A	8,79
T8	7,04 CD	3,87
T9	7,08 D	3,67
T10	6,71 B	8,47
T11	6,71 B	6,47
T12	7,12 D	4,05

También, por la condición de uso, entre los Bo, T1 y T7 (levemente ácidos) se diferenciaron significativamente de T4 y T10 (neutros); entre los 1S, T2, T5 y T8 (neutros) no se diferenciaron entre ellos, sin embargo, T2 y T8 lo hicieron de T11 (neutro). Asimismo, entre los 6S, no se observaron diferencias ($p > 0,05$) entre ellos.

3.7 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA: La CE en las tres condiciones de uso ($p < 0,0001$) y los dos espesores estudiados ($p = 0,0008$), fue significativamente diferente, no así la interacción entre éstos ($p > 0,05$).

El mayor valor de CE se observó en los 1S ($0,36 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), siendo estadísticamente diferentes ($p < 0,05$) al valor de los Bo ($0,20 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) y de los 6S ($0,23 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$). Sin embargo, los valores de CE medidos permiten clasificar a estos suelos como no salinos (USDA,

CAPÍTULO III

2017), dado que se encuentran dentro de rangos que no afectan el crecimiento de las plantas. Los CV fueron de 61,87% para la condición de Bo, 55,17% para 1S y 56,07% para los 6S. El análisis estadístico de los tratamientos, determinó diferencias significativas entre ellos ($p < 0,0001$). En la Tabla 12 se puede visualizar que, entre los tratamientos de igual Serie de suelo, en Tolosa el T2 se diferencia significativamente del T3.

Tabla 12

Conductividad eléctrica (CE; $dS.m^{-1}$) y coeficiente de variación (CV; %) en los 12 tratamientos evaluados independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la CE entre los tratamientos.

TRATAMIENTOS	CE ($dS.m^{-1}$)	CV (%)
T1	0,28 BCD	61,88
T2	0,37 DE	71,10
T3	0,26 BC	59,66
T4	0,21 ABC	57,43
T5	0,43 E	43,78
T6	0,25 BC	45,03
T7	0,20 ABC	47,74
T8	0,38 DE	41,08
T9	0,19 AB	54,14
T10	0,13 A	42,36
T11	0,28 CD	55,71
T12	0,21 ABC	60,51

El T4 y el T6, se diferencian del T5 en Luz. Así también, en Pampa el T8 se diferencia del T7 y el T9, mientras que, en Avía Terai el T10 lo hace del T11.

CAPÍTULO III

El valor máximo $0,43 \text{ dS.m}^{-1}$ se observó en el T5, y el mínimo $0,13 \text{ dS.m}^{-1}$ en el T10. Por otra parte, se puede ver, que, según la condición de uso, dentro de los Bo, el T1 se diferencia del T10; el T5 lo hace del T11, en los 1S. Mientras, que no se observan diferencias entre los 6S.

3.8 INFILTRACIÓN BÁSICA: La INF si bien mostró un leve aumento en la condición 1S ($2,68 \text{ cm.h}^{-1}$) no se diferenció significativamente ($p > 0,05$) de las condiciones Bo ($2,42 \text{ cm.h}^{-1}$) y 6S ($2,54 \text{ cm.h}^{-1}$). Los CV para la condición Bo, 1S y 6S fueron 47,07, 33,81 y 36,18%, respectivamente. Si bien, la variabilidad de los resultados fue alta, los CV se encuentran dentro de rangos aceptables, de acuerdo a los valores estimados para este parámetro (Pennock *et al.*, 2008).

El análisis entre los tratamientos arrojó diferencias significativas entre ellos ($p = 0,0025$). La Tabla 13, muestra los valores medios de INF (cm.h^{-1}) determinados en los distintos tratamientos. La INF máxima fue de $3,75 \text{ cm.h}^{-1}$ en el T1 y la mínima fue de $1,64 \text{ cm.h}^{-1}$ en el T7, ambas corresponden a tratamientos bajo la condición de uso Bo. Se puede visualizar, al comparar los tratamientos en la misma Serie de suelo, que, en Tolosa, el T3 presenta significativamente menor INF que el T1 y el T2. Tanto, en Luz (T4, T5 y T6), como en Avía Terai (T10, T11 y T12), no se observan diferencias significativas, entre los valores de INF de los tratamientos correspondientes.

CAPÍTULO III

Tabla 13

Infiltración básica (INF; cm.h⁻¹) y coeficiente de variación (CV; %) correspondientes a los 12 tratamientos evaluados. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la INF entre tratamientos.

TRATAMIENTOS	INF (cm.h ⁻¹)	CV (%)
T1	3,75 E	8,35
T2	3,25 DE	3,78
T3	2,47 ABC	2,17
T4	2,32 ABC	3,72
T5	2,51 ABC	3,11
T6	2,53 ABC	4,41
T7	1,64 A	8,70
T8	2,33 ABC	7,91
T9	2,88 CDE	2,24
T10	1,96 AB	6,90
T11	2,64 BCD	3,95
T12	2,29 ABC	9,78

En Pampa, se puede ver un aumento de la INF, que va desde el T7 (Bo) hasta el T9 (6S), siendo las diferencias sólo significativas entre estos dos.

Por otra parte, si se compara la INF de los tratamientos según las condiciones de uso, se destaca que, entre los Bo, el T1, se diferencia significativamente de los demás tratamientos (T4, T7 y T10). Entre los 1S, el T2 se diferencia significativamente con mayor INF, del T5 y el T8. Los 6S (T3, T6, T9 y T12), no se diferenciaron significativamente entre ellos.

3.9 ESTABILIDAD ESTRUCTURAL: Los resultados sugieren que la EEA se vio afectada una vez que los lotes se destinaron a la producción agrícola. No se detectó interacción ($p > 0,05$) entre las condiciones de uso y los espesores sobre el CDMP. El CDMP aumentó en

CAPÍTULO III

los 1S (0,36 mm) y luego en los 6S (0,38 mm) en relación a los Bo (0,26 mm), siendo estas diferencias significativas ($p < 0,05$). Sin embargo, la menor EEA en los 6S no fue estadísticamente diferente a la evaluada luego en los 1S ($p > 0,05$).

En el análisis de los 12 tratamientos se hallaron diferencias significativas entre ellos ($p < 0,0001$), al igual con los espesores ($p = 0,0011$), pero no ocurrió lo mismo en la interacción entre ambos, por lo que se describirán los resultados para los dos espesores en conjunto.

La Tabla 14 muestra los valores medios de CDMP determinados en los 12 tratamientos. El valor máximo fue 0,49 mm en el T9, mientras que, el valor mínimo fue 0,22 mm en el T4.

Tabla 14

Cambio del diámetro medio ponderado (CDMP; mm) de los agregados en los 12 tratamientos evaluados independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el CDMP entre los tratamientos.

TRATAMIENTOS	CDMP (mm)	CV (%)
T1	0,33 ABC	79,6
T2	0,43 CD	41,8
T3	0,33 AB	42,2
T4	0,22 A	37,5
T5	0,32 AB	35,6
T6	0,32 AB	42,3
T7	0,24 A	35,1
T8	0,38 BC	46,0
T9	0,49 D	57,3
T10	0,26 A	32,4
T11	0,33 AB	26,6
T12	0,40 BC	37,0

CAPÍTULO III

Los resultados de CDMP teniendo en cuenta los tratamientos de igual Serie de suelo, diferenciaron significativamente el T2 del T3, en Tolosa. En Luz, los tratamientos no presentaron diferencias significativas entre ellos, mientras que si lo hicieron en Pampa. Asimismo, en Avía Terai, el T10 presentó un valor de CDMP estadísticamente diferente al T12. Al comparar los tratamientos según la condición de uso, se observa que los Bo no se diferenciaron entre ellos. En los 1S, el T2 se diferenció del T5 y del T11, pero no del T8. Por otra parte, el T9 se diferenció de los demás (T3-T6-T12), en los 6S.

Análisis de correlación

El análisis estadístico muestra que existe una alta correlación positiva entre DA y RMP (0,59), parámetros físicos asociados a compactación del suelo y entre COT y N (0,87) relacionados con la fertilidad química. Por otra parte, se obtuvo correlación negativa entre DA con COT (-0,6) y N (-0,55), y entre RMP con COT y N (-0,93 y -0,82, respectivamente).

Análisis multivariado

Si bien se identificaron correlaciones entre variables que simplifican la interpretación de los efectos y diferencias entre tratamientos, se optó por utilizar todas ellas a efectos de disponer de una escena más amplia. A continuación, se presentan los resultados del ACP separados por espesores.

Análisis de componentes principales (CP) para el espesor de 0 a 10 cm

Las tres primeras CP explicaron un 69,37 % de la variabilidad total. Las variables que más contribuyeron a la construcción de la CP 1 fueron la RMP y la DA en el eje positivo y el COT y el N en el eje negativo. Para la CP 2, la mayor carga la tuvieron el P y la CE y para la CP 3 la infiltración y el CDMP. Se observa que en la CP 1 se oponen parámetros físicos que indican compactación como la RMP y DA, con parámetros que indican fertilidad química como COT y N. Cuando los tratamientos no se diferenciaron por estas propiedades, lo hicieron por P y CE y las variables que tuvieron mayor peso en la CP 3 fueron la infiltración y el CDMP relacionados a la porosidad del suelo y por ende al movimiento del agua y aire.

CAPÍTULO III

Análisis de componentes principales para el espesor de 10 a 20 cm

Las tres primeras CP explicaron un 70,4 % de la variabilidad total. Las variables que más contribuyeron a la construcción de la CP 1 fueron el COT y el N en el eje positivo y la RMP en el eje negativo. Para la CP 2, la mayor carga la tuvieron el P, el pH, la DA y la CE y para la CP 3 el pH en el eje positivo y el P y la CE en el eje negativo. Se observa que en la CP 1 se oponen parámetros que indican fertilidad química como COT y N, con la RMP que está relacionada a cuestiones físicas como compactación subsuperficial. Cuando los tratamientos no se diferenciaron por estas propiedades, lo hicieron por P, pH, DA y CE y las variables que tuvieron mayor peso en la CP 3 fueron el pH, el P y la CE, todas de índole químico.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos, al comparar las Series de suelos representativas del sector sur del Impenetrable Chaqueño, mediante la cuantificación de parámetros edáficos, permitieron desarrollar la siguiente discusión de cada uno de ellos.

Los valores de DA se incrementaron cuando los lotes se destinaron a la producción de cultivo de soja, siendo luego de seis años donde se detectó la mayor DA en los tres espesores estudiados. Numerosos autores (Sanzano *et al.*, 2012; Rojas *et al.*, 2016; Álvarez Arteaga *et al.*, 2017; Hernández Jiménez *et al.*, 2017) mencionan incrementos de la DA cuando se destinan a la producción agrícola, en especial, en sistemas de monocultivo y bajo SD. Las menores DA encontradas en superficie (0 - 5 cm), en todos los tratamientos, estarían relacionadas con las mayores concentraciones de COT presentes en los suelos de bosques y, en los suelos cultivados se adiciona la estratificación producida bajo este sistema de labranza (Franzluebbers, 2002; Duval *et al.*, 2016). Así también, la mayor compactación en los espesores inferiores podría deberse al constante tránsito de maquinarias (Botta *et al.*, 2007; Labelle y Jaeger, 2011; Schmidt y Amiotti, 2015), a la textura franco limosa predominante en estos suelos, como así también, a la realización de operaciones agrícolas con niveles inadecuados de humedad (Rojas *et al.*, 2016), y a los menores contenidos de COT.

CAPÍTULO III

El estudio de la DA en diferentes Series de suelos y distintas condiciones de uso evidencia que suelos con presencia de horizonte E, pero con diferencias de textura, posición en el relieve y de COT, revelaron disímiles compactaciones frente al uso agrícola. En la Serie Avía Terai, las diferencias se evidenciaron luego de seis años de monocultivo bajo SD, probablemente como consecuencia de condiciones de hidromorfismo que se producen por su drenaje algo pobre, que potencian la compactación del suelo por el tránsito de la maquinaria (Ledesma y Zurita, 2003). Sin embargo, en la Serie Tolosa aumentó luego del primer año, no obstante, se mantuvo constante tras seis años; este aumento inicial, podría ser explicado, por la disminución del COT, producto de la mezcla del horizonte A con el horizonte E por las labranzas durante la habilitación del suelo, favorecida por la baja resistencia de esta Serie al tránsito de la maquinaria, provocando el consiguiente aumento de la DA (Brest *et al.*, 1999).

En general, la RMP aumentó con los años de uso agrícola, al igual que lo informado por Draghi *et al.* (2005) y Rey Montoya *et al.* (2017), siendo la compactación menos intensa en el espesor superficial que en el subsuperficial, lo que podría estar asociado a diferencias texturales, estratificación del COT, al sistema SD (Duval *et al.*, 2016; Bonel *et al.*, 2018), y al tránsito de maquinarias asociadas a la habilitación de tierras (Aparecida Silva y Simões de Castro, 2015). Dado que RMP mayores a 2 MPa son consideradas impedancias mecánicas críticas para muchas especies (Letey, J., 1985.), se advierte que esta variable presentó altos valores en el espesor subsuperficial.

Las concentraciones de COT, disminuyeron con el cambio de uso, los años de producción agrícola y el espesor de suelo considerado. Las mayores concentraciones de COT estuvieron asociadas a los valores más bajos de DA y RMP. Estos resultados concuerdan con lo mencionado por numerosos autores (Six *et al.*, 2002; Sanzano *et al.*, 2005; Taboada y Micucci, 2008; Álvarez Arteaga *et al.*, 2017; Zúñiga Ugalde *et al.*, 2018) que asocian los atributos del COT en la agregación del suelo, aireación, actividad de macrofauna en los primeros centímetros del suelo, y la estratificación bajo SD.

Las mayores concentraciones de COT se observaron en el espesor superficial, en la condición de bosques. Sin embargo, el análisis que incluyó a los suelos diferenció a las

CAPÍTULO III

Series Tolosa y Luz, con mayores contenidos, de Pampa y Avía Terai. Estas mayores concentraciones de COT de Tolosa y Luz, estarían asociadas al tipo de bosque, ya que, en los bosques altos hay mayores aportes de restos orgánicos y la tasa de descomposición es más lenta debido a las menores temperaturas en la superficie del suelo por el efecto del sombreado (Prause *et al.*, 2012; Toledo *et al.*, 2013; Galicia *et al.*, 2015). No obstante, luego de un año de producción agrícola, todas las Series de suelo mostraron una disminución de las concentraciones de COT. Esto se debería, principalmente, a la mineralización de la fracción lábil o particulada del COT del bosque que se encontraba protegida en los agregados del suelo y que fue expuesta por las prácticas de habilitación de las tierras. (Six *et al.*, 2002; Roldán *et al.*, 2014, 2015; Conti *et al.*, 2014; Rojas *et al.*, 2016). Asimismo, las menores e iguales concentraciones de COT determinadas, en todas las Series de suelos, luego de 6 años de producción bajo monocultivo de soja, estarían más asociadas a la baja cantidad y calidad de los rastrojos aportados al suelo en el espesor superficial (Arolfo *et al.*, 2010).

La concentración de N, al igual que ocurrió con el COT, disminuyó con el cambio de uso, los años de producción agrícola, y la profundidad, tanto en el espesor superficial como en el subsuperficial (Rojas, 2012; Toledo *et al.*, 2013). Sin embargo, en éste último, al año de producción de soja se observó un mayor contenido de N. Las condiciones generadas por la presencia del bosque, permiten en el espesor superficial del suelo, la acumulación de restos orgánicos en distintos grados de descomposición, que se traduce en suelos bien provistos de materia orgánica y N. Estos elementos, al ingresar los suelos a producción agrícola, y modificarse el ambiente que los generó, sufren un proceso acelerado de descomposición y mineralización (Silberman *et al.*, 2015; Delgado Restrepo *et al.*, 2016; Álvarez Arteaga *et al.*, 2017). Las menores concentraciones de N, en el espesor subsuperficial, determinadas en el bosque, están en concordancia con la estratificación del material orgánico en los primeros centímetros del suelo y, a la distribución natural de la biomasa radical (Arzuaga *et al.*, 2016). Sin embargo, en este espesor, luego de un año de producción agrícola, los contenidos de N aumentan respecto al observado en el bosque,

CAPÍTULO III

lo cual estaría vinculado a la mineralización de la materia orgánica, por exposición del material orgánico protegido y la probable lixiviación.

Las concentraciones de P, en el espesor de 0 - 20 cm, en todos los tratamientos estudiados permitieron categorizar a los suelos como muy bien provistos de P (> 30 ppm) (García *et al.*, 2014b). Los suelos con un año de cultivo de soja, mostraron concentraciones de P significativamente mayores en relación a los suelos prístinos, poniendo en evidencia, la activación de algún *pool* de P no disponible anteriormente, por el efecto de la habilitación de las tierras (Six *et al.*, 2002; Galantini *et al.*, 2007). Por otra parte, el cambio de uso produjo un aumento del pH, lo cual podría deberse a una menor actividad de los iones de hierro (Fe) y aluminio (Al), en la disolución de P inicialmente precipitado (García *et al.*, 2014b). Asimismo, el incremento del pH del suelo estuvo acompañado por el de la CE, lo que hace suponer un aumento de P disponible, atribuido a las cenizas (Certini, 2005; Varela Teijeiro, 2007), producto de la quema de restos de vegetación en la habilitación de tierras (Sánchez, 1981; Paruelo *et al.*, 2004).

Sin embargo, las menores concentraciones de P observadas luego de seis años de monocultivo de soja en la capa superficial, podrían estar asociadas principalmente a las pérdidas por remoción de los productos de cosecha y, a la insuficiente reposición de los rastrojos aportados por la soja (Buschiazzo *et al.*, 2007; Aimar *et al.*, 2010).

Las mediciones de pH realizadas en los suelos bajo estudio, permitieron determinar que, al ser éstos cultivados se producen cambios en el estrato superficial. El pH del suelo se modificó, de levemente ácido a neutro (USDA, 2017), cuando la condición de uso cambió de bosque a producción agrícola. Estos cambios en el pH, podrían tener múltiples causas, siendo una de ellas, como ya se mencionó anteriormente, el efecto de las cenizas en la solución del suelo, provenientes de las actividades de habilitación posteriores al desmonte, condición coincidente con lo encontrado en suelos de bosques recientemente habilitados para uso agrícola en Chaco (Varela Teijeiro, 2007; Rojas, 2012).

La CE también se incrementó ligeramente en el primer año de cultivo en relación a los bosques, en todos los suelos, con valores superiores en la capa superficial respecto a la subsuperficial. Esto, al igual que el aumento del pH y P, podría atribuirse a la presencia

CAPÍTULO III

de cenizas producto de la quema de restos en el desmonte. Posteriormente, después de seis años de monocultivo, la CE disminuye, posiblemente debido al lavado de las sales solubles. No obstante, todos los valores son muy bajos (siempre en el rango de suelos no salinos), en coincidencia a lo encontrado por Campitelli *et al.* (2010) y Rojas *et al.* (2016).

Las mediciones de INF realizadas, no permitieron determinar diferencias entre condiciones de uso, sin embargo, se observaron discrepancias importantes entre tratamientos. Estas modificaciones en los estratos superficiales afectan propiedades físicas e hidráulicas, y podrían tener múltiples causas. En Tolosa, al año de la siembra, disminuyó la INF, posiblemente por la menor porosidad total del suelo y al aumento de la DA, como consecuencia del efecto de la mezcla del horizonte A con el horizonte E en las operaciones de habilitación, lo cual coincide con lo hallado por Rojas (2012) en igual Serie de suelos. En Pampa sucedió lo contrario, inicialmente la INF presentó valores bajos, lo cual ya fue descrito por Brest *et al.* (1999), y luego de uno y seis años de agricultura la INF se incrementó, ello podría deberse al cambio de uso, el cual reduciría el efecto del encostramiento superficial presente en este suelo en condiciones prístinas.

La EEA, determinada a través del CDMP, fue directamente proporcional a las concentraciones determinadas de COT. Numerosos autores, (Tisdall y Oades, 1982; Buchmann y Schaumann, 2018), mencionan que la EEA depende de los materiales orgánicos del suelo, pudiendo ser éstos transitorios, temporarios y persistentes y mencionan al COT como el principal agente ligante de las partículas minerales del suelo. El CDMP fue menor en los tratamientos con bosques respecto a las otras condiciones de uso, lo que estaría en concordancia con los mayores niveles de COT evaluados en éstos, con respecto a los determinados bajo cultivo. Cacchiarelli *et al.* (2008) y Tiwari *et al.* (2018), mencionan que los agregados son frecuentemente expuestos a una disrupción física, producto de la actividad agrícola, resultando en una menor cantidad de agregados estables al agua. Tal como se esperaba, los resultados muestran una marcada disminución de la EEA al año de siembra, debido al gran disturbio ocasionado por las actividades de desmonte, y habilitación de las tierras (Caruso y Miranda, 2012). Por otra parte, luego de seis años de cultivo, las diferencias observadas entre tratamientos podrían deberse a las

CAPÍTULO III

concentraciones originales de COT (0 - 10 cm), donde aquellas Series de suelos con mayores contenidos fueron resilientes (To) o se mantuvieron estables (Lj) (Studdert *et al.*, 2005; Rojas *et al.*, 2015; Duval *et al.*, 2016).

Las mediciones de algunas variables, pusieron en evidencia la importancia de tomar la Serie de suelo como determinante para la evaluación de indicadores de suelo, ya que, de no hacerlo, las diferencias entre condiciones de uso podrían quedar enmascaradas.

El análisis de correlación de las variables edáficas indicó que a mayores contenidos de COT y N hay menores valores de DA y RMP; esto podría relacionarse a las propiedades del COT en la estructuración del suelo y su efecto en la dinámica del N (Blanco Sepúlveda, 2009; Campitelli, *et al.*, 2010; Hernández Vigoa, *et al.* 2018).

Los resultados de los ACP contribuyeron a detectar y seleccionar las variables COT, DA, RMP, INF y CDMP y revelar interrelaciones, confirmando su utilidad ya mencionado por numerosos autores (Jaramillo *et al.*, 2011; Rojas *et al.*, 2015; Villazón Gómez *et al.*, 2017), suministrando información para la diferenciación de los tratamientos.

Se ha puesto de manifiesto que las Series de suelos estudiadas presentan distintos comportamientos al ser destinadas al uso agrícola, específicamente al monocultivo de soja. Estas diferencias se dan fundamentalmente por causas debidas a la degradación ocurrida producto de la gestión productiva (Studdert *et al.*, 2005; Duval *et al.*, 2016), lo cual fue claramente manifestado en las variables analizadas, que redundan en la provisión de agua, aire y oferta de nutrientes. Al considerar las distintas Series de suelos, Avía Terai es la que mayores cambios presenta en los indicadores medidos desde que es destinada a la producción agrícola y luego de seis años de monocultivo. Lo contrario sucede con Tolosa en la que, se modifican algunos valores muy levemente, no afectando su aptitud de uso, al menos en el período estudiado. En Luz y Pampa ocurren cambios que afectan sus desempeños productivos, fundamentalmente en las impedancias mecánicas; en la primera, probablemente asociados, en parte, a su textura rica en limo (Zurita *et al.*, 2012); y en la segunda, posiblemente debido a características genéticas propias inherentes a su conformación morfológica, tales como el escaso espesor del horizonte A y un horizonte B

CAPÍTULO III

moderadamente textural (Ledesma y Zurita, 1995b; Brest *et al.*, 2007) que inciden en la profundización y exploración de las raíces del cultivo.

Los resultados obtenidos indican que los suelos estudiados, luego del desmonte, y al ser destinados al uso agrícola con cultivo de soja, con diferentes años de antigüedad, son afectados negativamente en los parámetros analizados.

5. CONCLUSIONES

Se confirmó que los suelos destinados al cultivo de soja luego del desmonte poseen distinta susceptibilidad a la degradación, y que la conformación morfológica y las propiedades físicas y químicas, condicionan el desempeño ante el impacto del uso agrícola, revelado fundamentalmente por incrementos en la manifestación de las impedancias mecánicas.

Se demostró la importancia de considerar la Serie de suelo como determinante para la comparación de indicadores de suelo entre condiciones de uso, además del tipo de cobertura. Las Series de suelos deberían ser tenidas en cuenta en la planificación de las actividades productivas, dado que inciden en el resultado de los emprendimientos y en la conservación de los recursos naturales.

La tendencia de degradación de los suelos indicó claramente que el monocultivo de soja en SD, impacta negativamente sobre las propiedades del suelo, de manera diferente según el tipo de suelo. Sería conveniente continuar las investigaciones para verificar si la tendencia que manifiestan los indicadores persiste en el tiempo.

Esta investigación aporta conocimientos tendientes a la conservación de la calidad de los suelos de la región, generando elementos técnicos y científicos, que apoyen la creación de políticas adecuadas para la planificación del uso sustentable de las tierras.

6. AGRADECIMIENTOS

La información presentada en este trabajo es parte de la Tesis de Maestría del primer autor, como parte de los requisitos para optar al grado académico de Magister en Manejo y Conservación de Recursos Naturales, de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

CAPÍTULO III

Este trabajo fue financiado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y está disponible con acceso abierto en el Repositorio Hipermedial UNR de la Universidad Nacional de Rosario (<http://rephip.unr.edu.ar/>) y en INTA Digital (Repositorio Institucional-Biblioteca Digital) (<https://repositorio.inta.gob.ar/>).

REFERENCIAS

- Aimar, S.B., Iturri, A., Rojas, J. M., Guevara, G. y De Buschiazzo. (2010). Nutrient losses by wind erosion in an Entic Haplustoll of Chaco, Argentina. Conferencia; ICAR VII International Conference on Aeolian.
- Álvarez Arteaga, G., García Fajardo, B., Orozco Hernández, ME; Mireles Lezama, P. y Contreras Martínez, J. (2017). Estimation of carbon stocks under different soil uses in the central highlands of Mexico. *Acta Agronómica*, 66 (1): 21-26.
- Aparecida Silva, A. y S Simões De Castro. (2015). Transformações no uso da terra e na estrutura de solos no Cerrado em áreas de expansão da canade- açúcar: o caso da microrregião de Quirinópolis, Goiás. *Revista Ateliê Geográfico* 9 N°2: 114. Complementary Index, EBSCOhost.
- Arolfo, RV., Bedano, JC y Becker, AR. (2010). Effects of transgenic soybean cultivation under no-tillage on soil mite taxocenosis in Haplustolls of Central Córdoba. *Ci. Suelo*, 28 (2): 191-200.
- Arzeno, J. (2008). Guía Técnica. Proyectos de habilitación de tierras para su uso sustentable. INTA EEA Salta.
- Arzuaga, SA., Toledo, DM., CONTRERAS LEIVA, SM y VÁZQUEZ, S. (2016). Stocks y relaciones de estratificación del carbono y nitrógeno en Oxisoles bajo sistemas forestales. *Ci. Suelo*, 34 (1): 13-20.
- Blanco Sepúlveda, R. (2009). La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*, 43(3), 231-239.
- Boletín Oficial DE Chaco. (2018). Disposición N° 300/18. Subsecretaría de Recursos Naturales. Novedades normativas en materia ambiental.

CAPÍTULO III

- Bonel, BA., NC Di Leo y Montico, S. (2018). Evaluación de la compactación de suelos en sistemas de producción del sur de Santa Fe. Capítulo 11. Compactaciones Naturales y Antrópicas en Suelos Argentinos. 344-374.
- Botta, GF., O Pozzolo, O., Bomben, M., Rosatto, H., Rivero, D., Ressia, M., Tourn, M., Soza, E. y Vazquez, J. (2007). Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil & Tillage Res.* 96: 145-154.
- Brest, EF., Melgratti, MR., López, AE. y Zurita, JJ. (1999). Evaluación del impacto ambiental en áreas transformadas. Proyecto 510. Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación. Convenio SRNyDS-INTA-GTZ.
- Brest, EF, López, AE. y Zurita, JJ. (2007). Zonificación agroedáfica. Atlas climático Región Noreste. Oficina de Riesgo Agropecuario. http://www.ora.gob.ar/eval_atlas_nea.php.
- Brest, EF; López, AE. y Zurita, JJ. (2018). Fragipanes en la provincia del Chaco: identificación, propiedades y distribución. Capítulo 2. Compactaciones Naturales y Antrópicas en Suelos Argentinos. pp. 58-88.
- Buchmann, C. y Schaumann, GE. (2018). The contribution of various organic matter fractions to soil–water interactions and structural stability of an agriculturally cultivated soil. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 181: 586-599.
- Buschiazzo, DE; Zobeck, TM. y Abasca, SA. (2007). Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina. *Journal of Arid Environments.* 69: 29–39.
- Cacchiarelli, J., Galantini, JA., y Rosell, RA. (2008). Estabilidad estructural y P en fracciones de agregados en la cuenca del Aº El Divisorio (Coronel Pringles, BA). *Ci. Suelo*, 26 (1): 71-79.
- Campitelli, P., Aoki, A., O Gudel, O., A Rubenacker, A. y Sereno, R. (2010). Soil quality indicators of the effects of land use and agricultural practices in a pilot area of the central region of Córdoba. *Ci. Suelo*, 28 (2): 223-231.
- Caruso, H. y Miranda, S. (2012). Efecto del método de desmonte sobre los indicadores de calidad del suelo y la condición de las pasturas en el Chaco semiárido salteño. *AgriScientia*, v. 29, n. 2, 2012.

CAPÍTULO III

- Casas, R. y Michelena, R. (1983). La degradación de los suelos y la expansión de la frontera agropecuaria en el Parque Chaqueño Occidental. Séptima Reunión Nacional para el Estudio de las regiones áridas y semiáridas. San Luis. Buenos Aires. IDIA N°36:141-146.
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. USDA, 2017. Soil Survey Manual. Handbook No. 18. (3). *Oecología* 143: 1–10.
- Conti, ME., González, MG., Gómez, E., Ferrero Holtz, E. y Moreno, G. (2014). Soil organic carbon fractions as influenced by soybean cropping in the humid Pampa of Argentina. *Terra Latinoamericana*, 32(3): 195-200.
- Cuadra, DE. (2012). La problemática forestal en la provincia del Chaco, Argentina. Un análisis desde la geografía. *Revista Geográfica Digital*. IGUNNE. Facultad de Humanidades. UNNE. Año 9. N° 18. <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/default>.
- Cuadra, DE y Mónaca, NA. (2016). El centro-sudoeste de la provincia del Chaco (Argentina): Un bastión agrícola. *Revista Geográfica Digital*. IGUNNE. Facultad de Humanidades. UNNE. Año 13. N° 26. <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/default.htm>.
- De Boodt, M. y De Leenheer, L. (1967). West European Methods for Soil Structure Determination, VII. The State Faculty Agricultural Sciences. Gent. Bélgica. 60-62.
- Delgado Restrepo, OM., Menjivar Flores, JC. y Muñoz Arboleda, F. (2016). Influence of management systems on the nitrogen mineralization and fertilization of sugarcane. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69 (1): 7755-7762.
- Di Rienzo, JA., Casanoves, F., MG Balzarini, MG., González, L. Tablada, M. y Robledo, CW. InfoStat versión (2016). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL.
- Draghi, LM; Botta, GF., Balbuena, RH, Claverie, JA. y H Rosatto, H. (2005). Differences in mechanical conditions of a clayey soil under different tillage systems. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9 (1): 120-124.
- Duval, ME., Galantini, JA., Martínez, JM. y Iglesias, JO. (2016). Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico. *Ci. Suelo*, 34 (2): 197-209.

CAPÍTULO III

- Franzluebbers, AJ. (2002). Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Res.* 66: 95-106.
- Galantini, JÁ., Suñer, LG. y Iglesias, JO. (2007). Sistemas de labranzas en el sudoeste bonaerense: efectos de largo plazo sobre las formas de fósforo en el suelo. *RIA.* 36 (1): 63–81. INTA. Argentina.
- Galicia L., Saynes, V. y J Campo, J. (2015). Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Bot.* 93 (3): 473-484.
- García, M., Román, M. y González, MC. (2014a). Desmonte y soja en una provincia del norte argentino: implicaciones ecosistémicas y socioeconómicas. *Ambiente y Desarrollo,* 18 (34): 109-124.
- García, FO; Picone, LL. y Ciampitti, IA. (2014b). Fósforo. en: Echeverría, HE y FO García (eds.). *Fertilidad de suelo y fertilización de cultivos.* 2da. Ed. Ediciones INTA. 229–264.
- Gil, RC. (2006). Infiltrómetro-Permeámetro de disco. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy.
- Hernández Jiménez, A., Vera Macías, I., Naveda Basurto, CA., Guzmán Cedeño, Á., Monserrate, M., Vivar Arrieta, Roberto Zambrano, T., Mesías Gallo, F., Ormanza, K., Aguilar, L., Venancio, R. y López Alava, GA. (2017). Variations in some soil properties because of the land use change in the middle and low parts of the Membrillo micro-watershed, Manabi, Ecuador. *Cultivos Tropicales,* 38 (1): 50-56.
- Hernández Vigoa, G., Cabrera Dávila, G., Izquierdo Brito, I., Socarrás Rivero, AA., L Hernández Martínez, L., y JA Sánchez Rendón, JA. (2018). Indicadores edáficos después de la conversión de un pastizal a sistemas agroecológicos. *Pastos y Forrajes,* 41(1), 3-12.
- Iram-Sagyp 29570-1. (2010). Determinación de fósforo extraíble en suelos - Parte 1 - Método Bray Kurtz 1 modificado (Extracción con solución de fluoruro de amonio - ácido clorhídrico). Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Iram - Sagpya 29571-2. (2011). Determinación de materia orgánica en suelos. Parte 2: Determinación de carbono orgánico oxidable por mezcla oxidante fuerte, escala semi-micro. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

CAPÍTULO III

- Iram-Sagyp 29574. (2011). Determinación de pH en suelo para uso agropecuario. Esquema A1. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Jaramillo, DF., Anaya Gómez, ML., Restrepo Moná, CA., González Sánchez, HÁ. y Álvarez Mejía, F. (2011). Variables físicas que explican la variabilidad de suelo aluvial y su comportamiento espacial. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 46 (12): 1707-1715.
- Jorajuría Collazo, D. (2004). La resistencia mecánica a la penetración como parámetro mecánico del suelo. En: Filgueira, R y F Micucci (Ed.) *Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría*. Editorial de la Universidad de la Plata. Colección Naturales. pp. 43-53.
- Klingebiel, AA. y Montgomery, PH. (1964). Clasificación por Capacidad de Uso de las Tierras. Departamento de Agricultura de EE.UU. Servicio de Conservación de Suelos. Manual de Agricultura Nº 210. Centro Regional de Ayuda Técnica (AID) Méjico.
- Labelle, ER y Jaeger, D. (2011). Soil Compaction Caused by Cut-to-Length Forest Operations and Possible Short-Term Natural Rehabilitation of Soil Density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75 (6): 2314-2329.
- Ledesma, LL. y Zurita, JJ. (1995a). Los suelos de la Provincia del Chaco, República Argentina. INTA - Gobierno del Chaco.
- Ledesma, LL. y Zurita, JJ. (1995b). Carta de suelos de la República Argentina. Los suelos del Departamento General Belgrano. INTA - Gobierno del Chaco. (<https://inta.gob.ar/documentos/mapa-de-suelo-departamento-belgrano>).
- Ledesma, LL. y Zurita, JJ. (2003). Carta de suelos de la República Argentina. Los suelos del Departamento Comandante Fernández. INTA - Gobierno del Chaco. (<http://cedei.produccion.chaco.gov.ar/cartas-de-suelos/>).
- Letey, J. (1985). Relationship between soil properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1:273-294.
- Moro, EC., Ingaramo, OE., Venialgo, CA. y Gutierrez, NC. (2005). Infiltración en un Argiustol Údico con diferentes sistemas de uso en el departamento 9 de Julio, Chaco. *Agrotecnia* 14. pp. 14-19.

CAPÍTULO III

- Olivares, R., Zurita, J., Parera, J., Brest, EF. y López, AE. (2005). Evaluación de tierras. Regulación de la Frontera Agropecuaria. Ministerio de la Producción del Chaco.
- Olivares, R. y Mansilla, CN. (2010). Evaluación de la situación actual de los suelos de la Provincia del Chaco. Dirección de Suelos y Agua Rural. Subsecretaría de Recursos Naturales. Ministerio de Producción y Ambiente.
- Paruelo, JM., Oesterheld, M. Del Pino, F., Guerschmann, JP., Verón, SR., Piñeiro Guerra, G., Volante, J., Baldi, G., Caride, C., Arocena, D., Vasallo, M., Porfirio, L. y Durante, M. (2004). Patrones Espaciales y Temporales de la Expansión de Soja en Argentina: Relación con Factores Socio-Económicos y Ambientales. Informe final LART/ FAUBA al Banco Mundial.
- Pennock, D., Yates, T. y Braidek, J. (2008). Soil Sampling Designs. In: Carter, MR & EG Gregorich (eds.). 2008. Soil Sampling and methods of analysis. 2nd. Ed. Taylor & Francis Group. LLC. 25-39.
- Perucca, SC. y Kurtz, DB. (2016). Evaluación de tierras para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en el noroeste de la provincia de Corrientes, Argentina. *Agrotecnia* 24: 11-16.
- Pla, I. (2013). Análisis crítico de la calidad de suelos y sus indicadores. *Suelos Ecuatoriales*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 43 (1): 1-81.
- Prause J.; Fernandez López, C., Contreras Leiva, SM. y Gallardo Lancho, JF. (2012). Aporte y descomposición de hojas y re-absorción de N, P y K en un bosque primario de *Schinopsis balansae Engler* con y sin manejo silvopastoril en el Parque Chaqueño Húmedo. FACENA. Revista de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura. FACDYA, Vol. 28, pp. 41-50.
- Rey Montoya, TS., Paredes, FA., Dalurzo, HC., Fernández Lopez, C. y Kersting, RM. (2017). Propiedades Físicas de un Argiudol Ácuico bajo diferentes sistemas de manejo. *Ci.Suelo*, 35 (1):171-180.
- Rojas, JM. (2012). Indicadores de calidad de suelos desmontados y destinados a la producción agrícola en el Área piloto de la Ecorregión Chaqueña. Tesis Maestría en

CAPÍTULO III

- Ciencias Agrarias Orientación: Producción Sustentable. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Universidad Nacional de Tucumán.
- Rojas, JM., Roldán, MF. y Guevara, GS. (2015). Influencia de rotaciones en la calidad del suelo en la zona central del Chaco y su relación con la producción de algodón. *Ci. Suelo*, 33 (2): 239-246.
- Rojas, JM., Prause, J., Sanzano, GA., Arce, OEA y Sánchez, MC. (2016). Soil quality indicators selection by mixed models and multivariate techniques in deforested areas for agricultural use in NW of Chaco, Argentina. *Soil & Tillage Res.* 155: 250-262.
- Rojas, JM. y Zurita, JJ. (2017). Ecorregión Chaqueña. Agricultura de secano en siembra directa sobre suelos forestales sujetos a cambios en el uso del suelo. Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina. pp. 19– 199.
- Roldán, MF., Studdert, GA., Videla, C., Picone, L. y San Martino, S. (2015). Cambios de distribución de las fracciones de carbono orgánico en agregados del suelo en relación a su situación prístina. En: Impacto de los sistemas actuales de cultivos sobre las propiedades químicas del suelo. (Eds. Sa Pereira *et al.*), pp. 118-122.
- Sánchez, PA. (1981). *Suelos del trópico: características y manejo. 1ra. Ed. IICA. Costa Rica.* 354-421.
- Sanzano, GA; RD Corbella; JR García y GS Fadda. (2005). Degradación física y química de un Haplustol Típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Ci. Suelo*, 23 (1): 93-100.
- Sanzano, GA; C Hernández; M Morandini; F Sosa; H Rojas Quinteros; C Sotomayor y J Romero. (2012). Evaluation of soil compaction under no tillage systems in the Chacopampeana Plain in Tucumán, Argentina. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 89 (1): 31-38.
- Schmidt, E; y N Amiotti. (2015). Propiedades edáficas superficiales en sistemas de agricultura de conservación en la región pampeana semiárida sur. *Ci. Suelo* 33 (1): 79-88.
- Silberman, JE; AL Arinques; JA Domínguez Núñez; CG Kunst y AS Albanesi. (2015). La cobertura arbórea en un sistema silvopastoril del Chaco y su contribución diferencial al suelo. *Ci. Suelo* 33 (1): 11-17.

CAPÍTULO III

- Six, J; RT Conant; EA Paul y K Paustian. (2002). Stabilization mechanisms for soil organic matter: implications for C saturation of soils. *Plants Soil*, 141: 155–176.
- Sobral, R. (2009). Proyecto Específico: Aplicación de sistemas de evaluación de la aptitud actual y potencial de las tierras para el ordenamiento territorial (OT). Programa Nacional ecorregiones. INTA.
- Stengel, P. (1983). *Analyse de la porosité. Séminaire CEE - Agrimed, 14-18 p. Mars, INRA, Avignon.*
- Stolf, R. (1991). Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 15 (2): 229-35.
- Studdert, GA; Domínguez, GF., Eiza, MJ. y VIDELA, CC. (2005). Manejo de cambios en el suelo a través de rotaciones de cultivos y labranzas en el sudeste bonaerense: algunos resultados de ensayos de larga duración. Simposio Impacto de la intensificación de la agricultura sobre el recurso suelo. Sociedad Uruguaya de la Ciencia del Suelo - Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Colonia del Sacramento, R.O. Uruguay.
- Taboada, MA y Micucci, FG. (2008). Impedancias mecánicas y compactación en suelos agrícolas. En: Taboada, MA y CR Álvarez (eds). *Fertilidad física de los suelos*. 2da. Ed. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires. Argentina. pp. 94–151.
- Tisdall, JM, y Oades, JM. (1982). Organic matter and water - stable aggregates in soils. *Soil Sci.* 33 (1):141-163.
- Tiwari, R; Naresh, RK., Vivek, Jat, L., Purushattom, Suniti y Singh, A. (2018). Soil aggregation and aggregate associated organic carbon fractions and microbial activities as affected by tillage and straw management in a rice-wheat rotation: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7 (5): 2865-2893.
- Toledo, DM., Galantini, JA., Ferreccio, E., S Arzuaga, S., Gimenez, L. y Vázquez, S. (2013). Indices and indicators of soil quality in natural and cultivated red soil systems. *Ci. Suelo*, 31 (2): 201-212.

CAPÍTULO III

- United States Department of Agriculture (USDA, 1999). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Departamento de Agricultura Servicio de Investigación Agrícola. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Instituto de Calidad de Suelos.
- United States Department of Agriculture (USDA, 2017). Soil Survey Manual. Handbook N° 18. (3).
- Varela Teijeiro, MF. (2007). Efectos de los incendios forestales en la degradación física de los suelos de Galicia. Universidad de Vigo. Departamento de Biología Vegetal y Ciencia del Suelo. Facultad de Biología. (<http://www.cesam.ua.pt/files/TESIS%20M.E.%20VARELA.pdf>).
- Villazón Gómez, JA., Gutiérrez, GM. y Cobo Vidal, Y. (2017). Análisis multivariado de las propiedades químicas de los suelos pardos erosionados. *Revista Centro Agrícola*, 44 (1): 56-62.
- Volante, JN., MJ Mosciaro, MJ., Alcaraz Segura, D., Vale, LM., Viglizzo, EF. y Paruelo, JM. (2014). Dinámica del avance de la frontera agropecuaria y cambios funcionales en ecosistemas del Noroeste de Argentina. *Suelos, producción agropecuaria y cambio climático: avances en la Argentina*. Capítulo 27. Argentina. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca.
- Walkley, A. y Black, A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, as a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Zerpa, G. (2006). Degradación de suelos de uso pasturil. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Rosario.
- Zúñiga Ugalde, F., Huertas, J., Guerrero, G., Sarasty, J., Dörner, J. y Burbano Orjuela, H. (2018). Propiedades morfológicas de los suelos asociadas a los ecosistemas de Páramo, Nariño, Sur de Colombia. *Revista Terra Latinoamericana*. [S.l.], 36 (2): 183-196.
- Zurita, JJ. (2007). Carta de suelos de la República Argentina. Los suelos del Departamento General Güemes. INTA - Gobierno del Chaco. <https://inta.gob.ar/documentos/mapa-de-suelo-departamento-guemes>.

CAPÍTULO IV

IDENTIFICACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE REGULACIÓN, CLAVE PARA EL ENTENDIMIENTO DE LA GEOGRAFÍA DEL SUELO EN EL PARQUE NACIONAL NATURAL SUMAPAZ, COLOMBIA

IDENTIFICACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE REGULACIÓN, CLAVE PARA EL ENTENDIMIENTO DE LA GEOGRAFÍA DEL SUELO EN EL PARQUE NACIONAL NATURAL SUMAPAZ, COLOMBIA

IDENTIFICATION OF THE ECOSYSTEM SERVICES OF REGULATION, KEY FOR THE UNDERSTANDING OF THE GEOGRAPHY OF THE SOIL IN THE PARQUE NACIONAL NATURAL SUMAPAZ, COLOMBIA

IDENTIFICAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS DE REGULAÇÃO, CHAVE PARA A COMPREENSÃO DA GEOGRAFIA DO SOLO NO PARQUE NACIONAL NATURAL SUMAPAZ, COLÔMBIA

Grace Andrea Montoya-Rojas¹, Natalia Forero Patiño² y Brian Sandoval Montaña³

¹Autor correspondiente: Agróloga, Ph.D , Universidad de Salamanca, España & Postdoc del National Geophysical Research Institute, India. Ingeniería Geociencia y Sostenibilidad – INGEOS SAS,

CAPÍTULO IV

grace.montoya@utadeo.edu.co. <https://orcid.org/0000-0001-9284-1111>.

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001442009.

Cel: +57 3102426205

²Ingeniera Geógrafa y Ambiental. Esp. Gestión Ambiental y Desarrollo Comunitario del Centro de Educación Militar – CEMIL, Ingeniería Geociencia y Sostenibilidad – INGEOS SAS, nataliaforeropatino@cedoc.edu.co, 0000-0003-2297-2102-ORCID https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001562983

³Capitán del Ejército Nacional de Colombia. Centro de Educación Militar – CEMIL brian.sandoval@buzonejercito.mil.co. 0000-0003-4661-9688-ORCID https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001723125

Proyecto de investigación

Estudios edafoclimáticos para el desarrollo sostenible hacia la transformación de la economía circular. Grupo de Investigación innovación en BioGeociencia y Sostenibilidad – InBiGS, Entidad financiadora: INGEOS SAS.

Resumen: Este artículo determina y analiza los servicios ecosistémicos de regulación de los suelos del Parque Nacional Natural Sumapaz (PNNS), uno de los más grandes del mundo, localizado en la región andina de Colombia. A partir, de la clasificación taxonómica del orden y suborden del suelo, en conjunto con la caracterización por unidad de paisaje, clima, relieve y capacidad de drenaje de las unidades cartográficas del suelo, la información fue procesada y analizada mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica, adicionalmente, se tuvo en cuenta las percepciones de la comunidad aledaña al Parque Nacional Natural, y las del personal militar de Batallón de Alta Montaña N°1-TC “Antonio Arredondo”, quienes actualmente se desempeñan como guardianes del páramo y ejecutan proyectos de compensación frente a los impactos del que hacer militar. En dicho batallón, se encuentra el vivero que cultiva frailejones, una de las especies endémicas de mayor significancia del páramo, debido a la retención de humedad en el suelo. Según los análisis aplicados, el procesamiento de imágenes, la taxonomía de suelos y los demás datos geográficos, se encuentra que el principal servicio ecosistémico de los suelos del PNNS es el control biológico de plagas, les sigue el de secuestro y almacenamiento de carbón, después la regulación del clima local y regional. Con base en el tipo de suelo, la regulación de flujos de agua es fundamental también para los páramos. En gran medida, esto se relaciona con los procesos de adaptación que afronta este ecosistema debido al cambio climático, la ampliación de la frontera agrícola, la urbanización y los procesos de minería.

Palabras Clave: Edafología, Ejército Nacional, Geodatabase, Páramos, Servicios Ecosistémicos, Sistema de Información Geográfica (SIG), Taxonomía de suelo.


CAPÍTULO IV

Abstract: This article determines and analyzes the ecosystem services that regulate the soils of the Sumapaz National Natural Park (PNNS), one of the largest in the world, located in the Andean region of Colombia. Starting from the taxonomic classification of the order and suborder of the soil, together with the characterization by unit of landscape, climate, relief and drainage capacity of the cartographic units of the soil, the information was processed and analyzed through the use of Systems of Geographic Information, additionally, the perceptions of the community surrounding the National Natural Park were taken into account, and those of the military personnel of the High Mountain Battalion No. 1-TC "Antonio Arredondo", who currently serve as guardians of the moor and execute compensation projects against the impacts of military action. In said battalion, there is a nursery that grows frailejones, one of the most significant endemic species of the páramo, due to the retention of moisture in the soil. According to the applied analyses, image processing, soil taxonomy and other geographic data, it is found that the main ecosystem service of the PNNS soils is the biological control of pests, followed by carbon sequestration and storage, after local and regional climate regulation. Based on the type of soil, the regulation of water flows is also fundamental for the moors. To a large extent, this is related to the adaptation processes that this ecosystem faces due to climate change, the expansion of the agricultural frontier, urbanization and mining processes.

Keywords: Edaphology, National Army, Geodatabase, Moors, Ecosystem Services, Geographic Information System (GIS), Soil Taxonomy.

Resumo: Este artigo determina e analisa os serviços ecossistêmicos que regulam os solos do Parque Natural Nacional Sumapaz (PNNS), um dos maiores do mundo, localizado na região andina da Colômbia. A partir da classificação taxonômica da ordem e subordem do solo, juntamente com a caracterização por unidade de paisagem, clima, relevo e capacidade de drenagem das unidades cartográficas do solo, as informações foram processadas e analisadas através do uso de Sistemas de Geografia. Informação, adicionalmente, foram tidas em conta as percepções da comunidade envolvente ao Parque Natural Nacional e dos militares do Batalhão de Alta Montanha n.º 1-TC "Antonio Arredondo", que actualmente actuam como guardiões da charneca e executam projetos de compensação contra os impactos da ação militar. No referido batalhão existe um viveiro que cultiva frailejones, uma das espécies endêmicas mais significativas do páramo, devido à retenção de umidade no solo. De acordo com as análises aplicadas, processamento de imagens, taxonomia do solo e outros dados geográficos, verifica-se que o principal serviço ecossistêmico dos solos da PNNS é o controle biológico de pragas, seguido do sequestro e armazenamento de carbono, após regulação climática local e regional. Com base no tipo de solo, a regulação dos fluxos de água também é fundamental para os mouros, mas os serviços ecossistêmicos mencionados são preponderantes. Em grande parte, isso está relacionado aos processos de adaptação que esse ecossistema enfrenta devido às mudanças climáticas, à expansão da fronteira agrícola, à urbanização e aos processos de mineração.

Palavras-chave: Edafologia, Exército Nacional, Geodatabase, Mouros, Serviços Ecossistêmicos, Sistema de Informação Geográfica (SIG), Taxonomia do solo.



CAPÍTULO IV

INTRODUCCIÓN

Sobre la línea ecuatorial al norte de América del sur y al sur de Centro América; es decir, en Perú, Venezuela, Ecuador, Costa Rica y Colombia, se encuentra localizado uno de los ecosistemas de mayor importancia ambiental, el páramo, ecosistema que es considerado como el principal regulador de flujos de agua y del ciclo hidrológico (Pombo 1989), junto con las funciones hidrosistémicas de el área de ciudades como Bogotá (Rubiano Arámbulo, 2020; Betín Urrego & Orjuela Sánchez, 2020; Quimbayo Miranda, D. 2018), además de ser centro de fauna y flora endémica, donde de cada diez especies de plantas allí presentes seis son endémicas (IAvH & Universidad de Distrital Francisco José de Caldas, 2015), lo cual también se ve reflejado en los ecosistemas estratégicos en el departamento de Cundinamarca (Montoya-Rojas & Rivera-Marroquín, 2021); con especies únicas en el mundo como la danta de páramo (*Tapirus pinchaque*) y el frailejón (*Espeletia grandiflora*). Del total de páramos el 37% se encuentra en Ecuador y el 42, 4% en Colombia (FLACSO, 2003), donde se localiza el páramo más grande del mundo, el páramo de Sumapaz, con una extensión aproximada de 308.888,8 hectáreas (Resolución 1434 de 2017).

Los páramos entre los diferentes ecosistemas del mundo también se caracterizan por su excepcional capacidad para recepcionar grandes cantidades de carbono, debido a las diversidad taxonómica de sus suelos (Montoya-Rojas, 2018; Montoya Rojas, 2011a), los cuales son de origen volcánico, conformados por grandes cantidades de materia orgánica y compuestos benéficos para la dinámica de la biota del suelo, convirtiéndose de este modo sus suelos en una fuente para la mitigación y adaptación a los impactos del calentamiento global, generado en gran medida por el aumento de los gases de efecto invernadero, la deforestación, alta producción de residuos y las actividades agropecuarias, actividades que no son ajenas al estado actual de los páramos en Colombia, donde el aumento de la frontera agrícola, la urbanización y los proyectos de minería (Alba et al, 2014) han generado un impacto significativo sobre el suelo de este ecosistemas, ya que estas actividades dejan al “suelo menos espacio poroso, afectando negativamente a la densidad

CAPÍTULO IV

aparente, la capacidad de retención de agua, la permeabilidad, la estructura, la porosidad y la consistencia” (Pinzón, 1993, citado por Daza, Florez y Triana, 2013, p.2), razón por la cual, los suelos del páramo deben adaptarse para afrontar estos cambios y a su vez potencializar otros servicios ecosistémicos.

Otra situación que ha impactado negativamente el páramo de Sumapaz es el conflicto armado, aunque este hecho no suela ser muy evidenciado, ha generado grandes transformaciones al ecosistema (Dulce, 2019), ya que al ser una zona estratégica ubicada en la cordillera oriental la cual comunica los departamentos de Meta, Huila, Tolima con Cundinamarca, y a su vez, con Bogotá, en 1970 esta zona fue utilizada por la organización terrorista denominada Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia -FARC-, como zona de tránsito de guerrilleros, armas y secuestrados (Moreno & Romero,2018), razón por la cual, en el año 2001 el Ejército Nacional de Colombia estableció el Batallón de Alta Montaña No 1-TC. Antonio Arredondo, el cual fue eje para la ejecución de operaciones militares en contra de esta estructura armada ilegal, donde desafortunadamente se causó impacto al ambiente debido al establecimiento de la tropa, no obstante el Ejército Nacional consiente de su impacto y comprometido por salvaguardar y proteger este ecosistema creo un proyecto de propagación de frailejones, el cual, es direccionado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Parques Nacionales Naturales de Colombia y el Jardín Botánico de Bogotá.

Debido a las situaciones expuestas anteriormente y a la alta importancia que estos ecosistemas representan para el país, la legislación Colombiana ha generado diferentes mecanismos para su conservación y protección, como lo es la Ley 99 de 1993, en la cual se expresa la necesidad de proteger las áreas de paramo, subpáramo, nacimientos de agua y zonas de recarga de acuíferos, además de ser incluidos en los procesos de ordenamiento territorial como espacios vitales a partir del 2002 (Garzón, 2015; Montoya-Rojas, 2021 y Montoya Rojas, 2007), debido a la identificación de los servicios ecosistémicos que le presta tanto a Bogotá D,C, como al territorio nacional, pues el agua que fluye de este páramo abastece al río Magdalena, que es la principal fuente hídrica del país .

CAPÍTULO IV

La variada gama de servicios ecosistémicos que ofrecen los páramos a la sociedad son subvalorados o pasan desapercibidos al no ser tangibles (De Groot et al, 2002), más aun cuando se trata de los servicios ecosistémicos del suelo que van más allá de la producción agrícola y que prestan una función de planeación estratégica cuando se aplica la geografía del suelo en diferentes ambiente biogeográficos como en zonas costeras, ciudades, paisajes montañosos, ambientes selváticos entre otros (Mina Galeano, & Palencia, 2017; León Bello, 2020 y Montoya-Rojas et al, 2020).

Los servicios ecosistémicos de regulación, cumplen un papel fundamental en la mitigación de los impactos del cambio climático, debido a que dentro de esta categoría se encuentra el secuestro y almacenamiento de carbono, la regulación del clima local y calidad del aire, control biológico de enfermedades, regulación de flujos de agua, moderación de eventos extremos, tratamiento de aguas residuales, prevención de la erosión y polinización (FAO,2000). Muchos servicios ecosistémicos del suelo también son bioindicadores de calidad ambiental y microbiológica, fundamental para las funciones ecológicas de cuencas hidrográficas en escalada de gran magnitud (Pochiraju et al, 2019; Montoya-Rojas, 2019; Montoya Rojas, 2014).

En este sentido, el objetivo de esta investigación fue identificar y analizar los servicios ecosistémicos de regulación prestados por los suelos del Parque Nacional Natural de Sumapaz (PNNS), mediante el análisis taxonómico del orden y suborden y, la caracterización por unidad de paisaje, clima, relieve y capacidad de drenaje, para lo cual, se emplearon los estudios oficiales de suelos, datos recolectados in situ y percepciones de la comunidad, información que fue procesada mediante los Sistemas de Información Geográfica en el software ArcGIS, con el propósito de obtener una salida gráfica, la cual se convierte en una herramienta de apoyo para la posterior toma asertiva, eficaz y eficiente de decisiones relacionadas con la gestión y el ordenamiento de este territorio.



CAPÍTULO IV

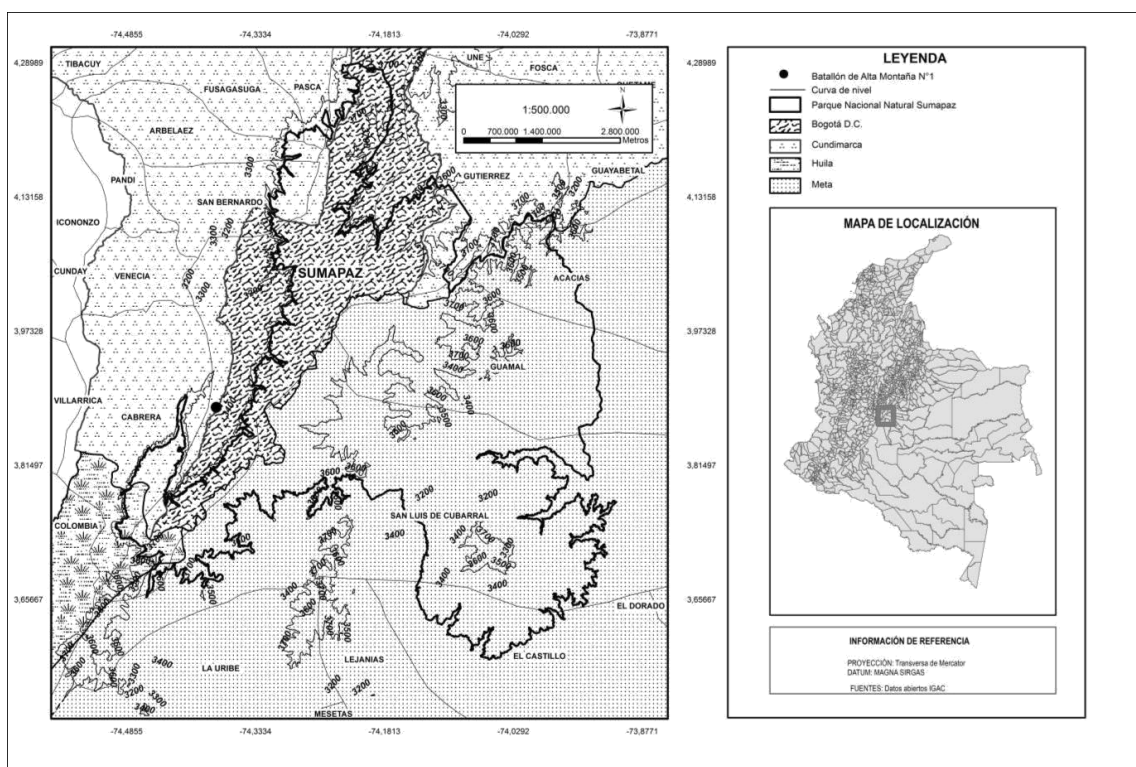
METODOLOGÍA

ÁREA DE ESTUDIO

La determinación de los servicios ecosistémicos prestados por el suelo se realizó en el Parque Nacional Natural Sumapaz (PNNS), el cual, se encuentra ubicado en la Cordillera Oriental de los Andes colombianos al suroeste del departamento de Cundinamarca, al noroeste del Meta y al norte del Huila (**Figura 1**). De acuerdo a la Resolución 1434 de 2017 “este páramo tiene una extensión de 308.888,8 hectáreas que en su mayoría, pertenecen a la zona rural de la ciudad de Bogotá D.C” (p.5).

Figura 1

Localización del Parque Nacional Natural Sumapaz.



Fuente: IGAC & PNNS. (2017).

Datos empleados: División Político Administrativa (DIVIPOLA) y Límite del PNNS.

CAPÍTULO IV

La localización del PNNS está entre los 3° 45´ - 4° 10´ de Latitud Norte y los 74° 10´ - 74° 30´ de Longitud Oeste, delimitado por la cota de altura de los 3.300 msnm y una cota máxima de 3.700 msnm, tal como se aprecia en la Figura 1, de acuerdo al Instituto Alexander von Humboldt (IAvH, 2017).

El área total es del parque es de 223.179 hectáreas y se encuentran en 13 municipios, 5 en el departamento de Cundinamarca (Pasca, Arbeláez, San Bernardo, Gutiérrez y Cabrera), en el departamento del Meta (Cubarral, Acacías, Guamal, Lejanías, El Castillo y La Uribe), en el departamento del Huila (Colombia) y la localidad 20- Sumapaz del Distrito Capital; el total de hectáreas del parque es de 141.282 hectáreas, es decir el 63% del parque, corresponde a ecosistemas de páramo, área de conservación estricta, con prohibiciones claras, y sin posibilidad de sustracción es decir, que el 37% restante corresponde a subpáramo y bosque alto andino.” (IAvH, 2017, p.20).

Dentro de las características ambientales más representativas de esta área está que provee agua a la región hidrográfica del río Magdalena, región hidrográfica del río meta y región hidrográfica del rio Guaviare. (PNNC, 2005); la temperatura media anual oscila entre los 19°C y 2°C, como máxima y mínima respectivamente, los regímenes de lluvias son transicionales entre bimodal y unimodal, en cuanto a la vegetación, el paisaje es dominado por:

Pajonales compuestos por gramíneas que forman macollas de hasta 40 – 50 cm de alto y los frailejonales, que están dominados por diferentes especies del genero *Espeletia*, siendo la “*Espeletia grandiflora* la especie dominante, se encuentra también *espeletia chizacana*, especie endémica del páramo de Sumapaz. (Neira et al, 2001, p.8).

En cuanto a la fauna se destacan los anfibios, con varias especies de ranas y una especie de salamandra (*Bolitoglossa adspersa*), reptiles como el lagarto collarejo (*Stenocercus trachcephalus*) y las lagartijas (*Anadia bogotensiis* y *proctoophorus striatus*), en aves, sobresale el águila real (*Geranoaetus melanoleucus*) y para mamíferos, hay registros de conejos de paramo, venado blanco (*Odocoileus virginianus*), ratones silvestres (*Oryzomys dryas*), danta de páramo (*Tapirus pinchaque*), oso de anteojos (*Termactus ornatus*), entre otros. (PNNC, 2005).

CAPÍTULO IV

MÉTODOS

La determinación y análisis de los servicios ecosistémicos de regulación (Tabla prestados por los suelos del PNNS se desarrolló en 4 fases (Figura 2), tales contemplaron el manejo de información secundaria, la cual fue procesada mediante el empleo de Sistema de Información Geográfica, y el análisis de información primaria obtenida a través de la percepción de la comunidad aledaña al PNNS, las visitas de expertos profesionales y la experiencia del personal del Batallón de Alta Montaña N°1-TC Antonio Arredondo.

Tabla 1

Servicios Ecosistémicos de Regulación Establecidos por la FAO.

Servicios Ecosistémicos de Regulación	Descripción
Clima local y calidad del aire	Proporcionan sombra, los bosques influyen en las precipitaciones y en la disponibilidad de agua, tanto a escala local como regional, asimismo las plantas permiten la eliminación de contaminantes de la atmósfera.
Secuestro y almacenamiento de carbono	Los ecosistemas regulan el clima mundial mediante el almacenamiento de gases de efecto invernadero.
Moderación de fenómenos extremos	Los ecosistemas y los organismos vivos crean amortiguadores contra las catástrofes naturales. Reducen los daños causados por inundaciones, tormentas, avalanchas, desprendimientos de tierras y sequías.
Tratamiento de aguas residuales	Algunos ecosistemas como los humedales filtran efluentes, descomponen residuos mediante la actividad biológica de los microorganismos y eliminan agentes patógenos nocivos.
Preservación de la erosión y conservación fertilidad del suelo	La cubierta vegetal previene la erosión del suelo y garantiza la fertilidad del suelo mediante procesos biológicos naturales como la fijación del nitrógeno.
Polinización	Los insectos y el viento polinizan las plantas y los árboles, lo cual es fundamental para el desarrollo de las frutas, hortalizas y semillas.
Control biológico de plagas	Actividades de los depredadores y parásitos en los ecosistemas que sirven para controlar las poblaciones de posibles vectores de plagas y enfermedades.
Regulación de los flujos de agua	La regulación de los flujos de agua es un servicio clave proporcionado por la cobertura y la configuración del suelo.

Fuente: Adaptado por los autores con base en conceptos de la FAO. (2000).

CAPÍTULO IV

Fase 1: Datos del área de estudio

Se descargó en formato shape la División Político Administrativa (DIVIPOLA) de Colombia, del aplicativo de datos abiertos del SIGOT (Sistema de Información Geográfica para el Ordenamiento Territorial), el cual pertenece al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la delimitación del PNNS en el mismo formato, a escala 1:100.000 de la página del PNNC, estos dos insumos fueron cargados al software ArcGIS para generar el área de corte de los departamentos y respectivos municipios que hacen parte de la jurisdicción del Parque.

Luego se descargaron las capas de suelos de Cundinamarca, Huila y Meta, las cuales se obtuvieron en formato shape a escala 1:100.000 del aplicativo SIGOT; estas capas se cargaron al ArcGIS para realizar la unificación de información y así, obtener el shape de suelos del PNNS, que fue cortado con el del límite de parque, para obtener el de suelos del PNNS, adicional a los shapings mencionados anteriormente, se obtuvo el de la ubicación de Batallón de Alta Montaña N°1(BAMAR N°1), el cual fue obtenido de la dirección de Geomántica de Ejército.

Fase 2: Caracterización y clasificación taxonómica de los suelos

Haciendo uso del metadato de la unidad cartográfica del shape de suelos del área de estudio, se procedió a realizar la unificación de este parámetro, para agrupar los suelos con características similares en sus propiedades físicas, químicas, mineralógicas y biológicas (Montoya Rojas, 2018).

Teniendo definidas las unidades cartográficas, se procedió a determinar los siguientes parámetros: taxonomía a nivel del orden y suborden (Tabla 2), en donde se expresan todos los órdenes del suelo, de acuerdo a las directrices emitidas por la USDA (United States Department of Agriculture) en su documento Keys to Soil Taxonomy (2014) y su caracterización por unidad de paisaje, clima, relieve y capacidad de drenaje, información que se obtuvo mediante la revisión de los estudios generales de suelos y zonificación de tierras de Cundinamarca, Meta y Huila, elaborados por el IGAC (2000).

CAPÍTULO IV

Adicionalmente, en ArcGIS se realizó el cálculo del total de hectáreas por unidad cartográfica de suelos y su respectivo porcentaje respecto al área total del PNNS. La Tabla 2, expresa los subórdenes específicos del área de estudio para esta investigación.

Tabla 2

Determinación Taxonómica de los Suelos

ORDEN	TERMINACIÓN	CARACTERÍSTICA
ALFISOL	Alf	Suelos con marcados procesos de translocación de minerales arcillosos (iluvación de arcilla), sin pérdida de bases (sodio, potasio, calcio o magnesio).
ANDISOL	Ands	Suelos oscuros y desarrollados a partir de materiales volcánicos y otros ricos en materiales amorfos.
ARIDISOL	Id	Suelos típicos de zonas áridas, con limitada disponibilidad de agua en todo el año.
ESPODOSOL	Od	Suelos ácidos de clima húmedo con procesos de iluvación de materia orgánica con Fe y Al.
ENTISOL	Ents	Son los suelos más jóvenes de esta clasificación, principalmente de composición mineral.
GELISOL	El	Suelo permanentemente helados donde están los termafrost y permafrost.
HISTOSOL	Sts	Suelos con alto contenido de materia orgánica (20-30%) en los primeros 80 cm.
INCEPTISOL	Epts	Suelos jóvenes con un desarrollo incipiente. Presentan agua disponible para las plantas por más de medio año o por más de tres meses consecutivos durante la estación seca.
MOLLISOL	Oll	Suelos ricos en materia orgánica y altamente productivos. Se encuentran en estepas o praderas de Europa, Asia, Norteamérica y Sudamérica.
OXISOL	Ox	Suelos extremadamente intemperizados y ácidos, ricos en óxidos de Fe y Al, pobres en bases, escasa cantidad de minerales alterables. Son característicos de regiones tropicales y subtropicales muy lluviosas.
ULTISOL	Ult	Suelos subtropicales y tropicales muy evolucionados y pobres en bases, con iluviasión de arcillas. Últimas etapas de meteorización y evolución.
VERTISOL	Ert	Suelos muy fértiles, con alto contenido de arcillas expandibles que forman grietas que se abren y cierran con cambios de humedad.

Nota: Fuente: Modificado de Porta *et al.* 2003. Adaptado de <https://intagri.com/articulos/suelos/clasificacion-del-suelo-WRB-y-soil-taxonomy>. Esta información es propiedad intelectual de INTAGRI S.C.

CAPÍTULO IV

Fase 3: Determinación de servicios ecosistémicos de regulación

Habiendo establecido el suborden de los suelos, se procedió a generar una relación entre este parámetro y el servicio ecosistémico (Tabla 3), relación que fue establecida de acuerdo a la información suministrada por Montoya (2018; 2021); teniendo en cuenta que la mayoría de Unidades cartográficas agrupan varios tipos de suelos, se determina un servicio ecosistémico de regulación principal y unos servicios ecosistémicos complementarios.

Para la determinación del servicio ecosistémico predominante, se tuvo en cuenta la frecuencia del suborden en la agrupación de los suelos por unidad cartográfica. Para la determinación de los servicios ecosistémicos complementarios se analizaron las propiedades bioquímicas y físico-bióticas encontradas para esta investigación y otros estudios edafoclimáticos realizados en Colombia (Miranda Muñoz, 2016; Hernández Guzmán, 2018).

Tabla 3

Relación Entre Servicio Ecosistémico y Suborden del Suelo

SERVICIO ECOSISTÉMICO	SUBORDEN
Secuestro y almacenamiento de carbono	Humic
Clima local y calidad del aire	Cry
Regulación de los flujos de agua	Udands
Control biológico de plagas	Tropo
Moderación de fenómenos extremos	Umbre

Nota: Montoya (2021)

CAPÍTULO IV

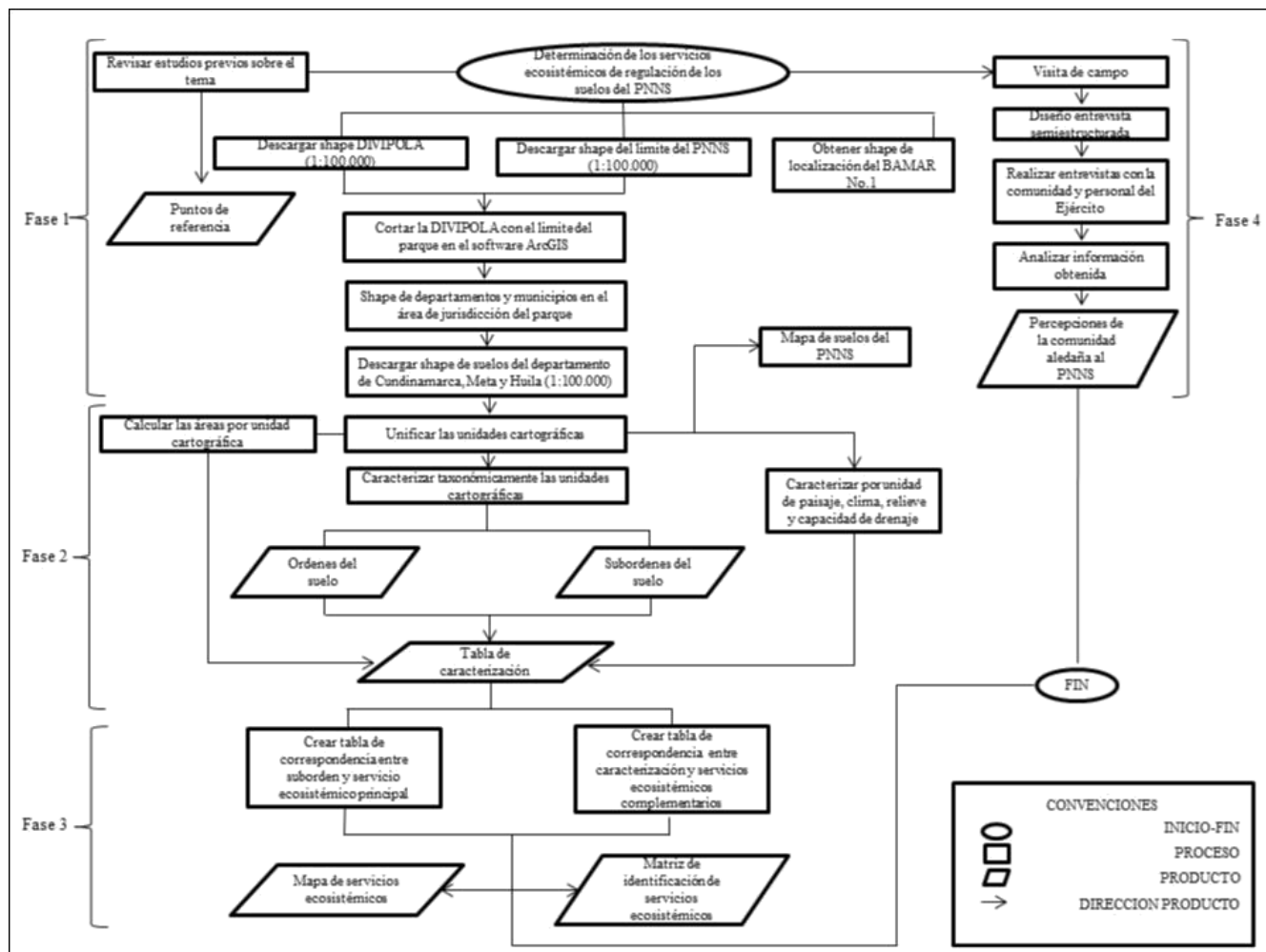
Fase 4: Reconocimiento en campo

Teniendo en cuenta que la determinación y valoración de los servicios ecosistémicos, que debe ser un conjunto entre el trabajo científico y la percepción de la gente como lo expone Caro & Torres (2015), Pacha (2014) y Valencia *et al.* (2017), se realizó una visita, en la cual se plantearon dos objetivos, el primero, conocer mediante la aplicación de una entrevista semiestructurada, como se explica en la Fase 3 más adelante, utilizando preguntas cerradas y abiertas asociadas con entender, qué servicios ecosistémicos y cambios ambientales percibe la comunidad y, el segundo, conocer que proceso de mitigación realiza el Ejército Nacional, como medida de compensación a los impactos negativos causados por el que hacer militar sobre este ecosistema. La Figura 2 ilustra todo este marco metodológico. Las entrevistas se aplicaron a la mitad de los miembros del Ejército que estaban en el Batallón en ese momento y a cuatro habitantes rurales que se encuentran en el trayecto de la vía principal de la cota que supera los 3900 msnm dentro del parque en proximidades al batallón. Por lo tanto, se entrevista la mayoría de habitantes de estas zonas, teniendo en cuenta que al ser un Parque Natural Nacional, no hay más pobladores, ni se permiten por ley, en estas zonas protegidas tan remotas. De hecho, gracias a la logística con el Ejército Nacional, es que se tuvo acceso a la zona para apoyar esta investigación.

CAPÍTULO IV

Figura 2.

Flujograma de la metodología.



Resultados

El desarrollo de las cuatro fases planteadas en la metodología permitió obtener resultados tanto analíticos como gráficos, los cuales se desagregan a continuación:

Fase 1: Datos del área de estudio

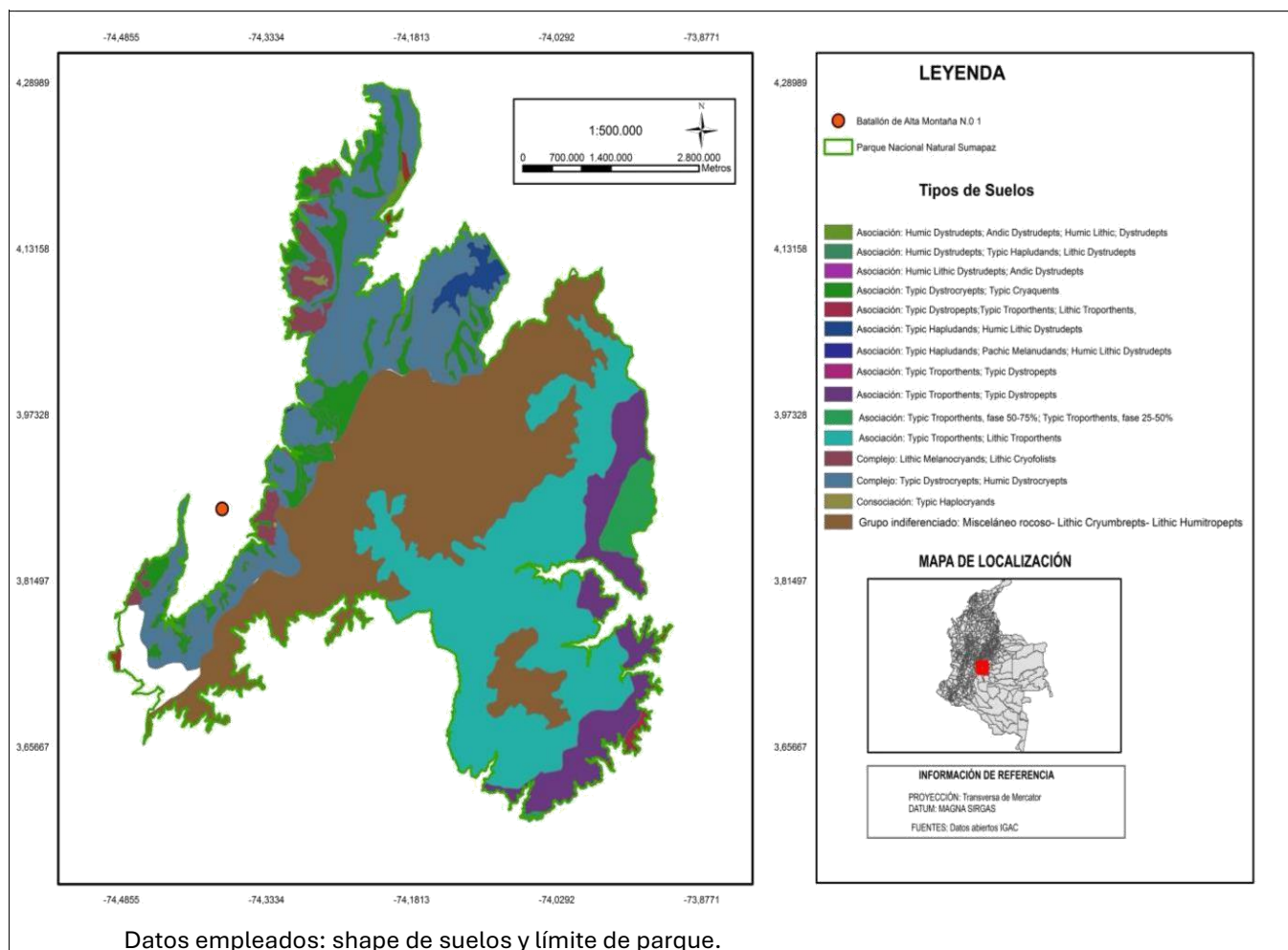
Se evidenció que al unificar los shapes de suelos de los tres departamentos había un área de 5.219 hectáreas sin información, las cuales corresponden al 2.3% del total del

CAPÍTULO IV

área del PNNS, este espacio sin información se presenta entre los departamentos de Cundinamarca y Meta; situación que fue consultada con la dependencia de agrología del IGAC, la cual, informó que dicha falla se debía a que la información de los shapes fue capturada en diferentes años, presentándose así un desempalme. Este desempalme es en los bordes del PNNS, por lo que no afecta de manera representativa el análisis de la investigación, teniendo en cuenta la escala de trabajo, por lo tanto para la escala de trabajo, esto no se evidencia de manera cartografica en el mapa de suelos.

Figura 3

Mapa de Suelos del PNNS.



CAPÍTULO IV

Entre los tres shapes de suelos se encontraron 168 tipos de suelos, los cuales al realizar el proceso de unificación por orden de la unidad cartográfica se agruparon en quince tipos de suelos y un cuerpo de agua, como se aprecia en la Figura 3.

Fase 2: Caracterización y clasificación taxonómica de los suelos

Teniendo en cuenta la unificación de las Unidades cartográficas se obtuvieron los órdenes y subórdenes, adicionalmente, se especificaron las características y correspondientes áreas de estas, datos que se describen en la Tabla 4.

Tabla 4

Taxonomía y Caracterización de los Tipos de Suelos Presentes en el PNNS

Unidad cartográfica	Símbolo	Orden	Suborden	Características	Hectáreas	% Distribución
Asociación Humic Lithic Dystrudepts- Andic Dystrudepts	MGSg	Inceptisol	Udepts	Suelos profundos a superficiales, pobremente drenados, fertilidad baja, paisaje de montaña, con un clima muy frío muy húmedo, relieve en crestas y escarpes mayores con pendientes superiores al 75%	69,51	0,03
Asociación Humic Dystrudepts-Andic Dystrudepts- Humic Lithic Dystrudepts	MGF _e ,MGFF	Inceptisol	Udepts	Suelos profundos a superficiales, bien a excesivamente drenados, fertilidad moderada a baja, paisaje de montaña, con un clima muy frío muy húmedo, relieve en crestones con pendientes del 25 al 75%.	519,2	0,24
Asociación Humic Dystrudepts-Lithic Dystrudepts-Typic Hapludans	MLlf	Inceptisol	Udepts	Suelos moderadamente profundos a Inceptisol udepts superficiales, bien drenados .fertilidad baja paisaje de montaña, con un clima frío relieve en filas y vigas con pendientes del 23 al 50%.	103,83	0,05
		Andisol	Udands			
Asociación Typic Dystrocrepts-Typic Cryaquents	MEAd-MEAc	Andisol	Udands	Suelos profundos a superficiales, bien y pobremente drenados, fertilidad baja a moderada, paisaje de montaña, con un clima extremadamente frío húmedo, relieve en artesas con pendientes del 7 al 12%	13.468	6,18
		Inceptisol	Cryepts			
		Entisol	Aquents			
Asociación Typic Hapludands-Humic Lithic Dystrudepts	MGlf	Andisol	Udands	Suelos profundos a superficiales, pobremente drenados, fertilidad baja a moderada, paisaje de montaña, con un clima muy frío muy húmedo, relieve en filas y vigas con pendientes del 25 al 75%	2.831	1,3
		Inceptisol	Udepts			
Asociación Typic Hapludands- Pachic Melanudands- Humic Lithic Dystrudepts	MGTe	Andisol	Udands	Suelos profundos a superficiales, pobremente drenados, fertilidad baja amoderada, paisaje de montaña, con un climamuy frío muy húmedo, relieve de glacis de acumulación y lomas con pendientes del 12 al 25%.	49,66	0,02
		Inceptisol	Udepts			
Complejo: Lithic Melanocryands-Lithic Cryofolists	MEUe	Andisol	cryands	Suelos profundos a superficiales, pobremente drenados, fertilidad baja a moderada, paisaje de montaña, con un clima extremadamente frío húmedo, relieve de campos morrénicos con pendientes del 25 al 75% .	6.013	2,76
		Histosol	folists			

CAPÍTULO IV

Cont.:

Complejo Typic Dystrocryepts- Humic Dystrocryepts	MEFg y MEFf	Inceptisol	cryepts	Suelos profundos a superficiales, bien y pobremente drenados, fertilidad baja a moderada, paisaje de montaña, con un clima extremadamente frío húmedo, relieve de espinazos, crestas y escarpes mayores con pendientes superiores al 23%.	41.900	19,22
Consociación: Typic Haplocryand	MENc	Andisol	cryands	Suelos moderadamente profundos a muy superficiales, bien drenados, fertilidad moderada a baja, paisaje de montaña, con un clima extremadamente frío húmedo, relieve en vallecitos con pendientes del 3 al 12%.	168	0,08
Asociación: Typic Dystropepts- Typic Troprothents- Lithic Troprothents	MPHe	Inceptisol	tropepts	Suelos excesivamente drenados, fertilidad baja, susceptibles a erosión y deslizamientos localizados, paisaje de montaña fluvio-gravitacional, con un clima cálido y muy húmedo, relieve en filas y vigas con pendientes de 25-75%.	888,56	0,41
		Entisol	Orthents			
Asociación: Typic Troprothents- Typic Dystropepts	MTEf	Entisol	Orthents	Suelos superficiales a profundos, bien drenados, fertilidad baja, afectados por deslizamientos y desprendimientos puntuales, paisaje de montaña fluvio-gravitacional, clima medio pluvial y cálido muy húmedo, relieve en filas y vigas con pendientes superiores al 25%.	17143,56	7,87
		Inceptisol	Tropepts			
Asociación: Typic Troprothents	MPMe	Entisol	Orthents	Suelos superficiales, excesivamente drenados, fertilidad baja, afectados por fase 50-75%.	4.057	1,86
Asociación: Typic Troprothents- Lithic Troprothents	MJDg	Entisol	Orthents	clima cálido muy húmedo, relieve en crestas y crestones con pendientes del 25 a 75% Suelos superficiales a muy superficiales, fertilidad baja, suelos afectados por deslizamientos puntuales, escurrimientos, paisaje de montaña plegada.	56.753	26,04
Grupo indiferenciado: Misceláneo rocoso Cryumbrepts, Lithic Humitropepts,	MGA	Inceptisol	Umbrepts	paisaje de montaña fluvio-gravitacional, clima frío pluvial, relieve en filas y vigas con pendientes del más del 50%.	73.757	33,84
Asociación: Typic dystropepts; Typic troprothents	MLBf	Entisol	Tropepts	Suelos profundos a superficiales, fertilidad moderada, paisaje de montaña gravitacional, clima frío húmedo, relieve de lomas altas y laderas con pendientes entre 50 y 75%.	219,7	0,1
	Cuerpo de agua	N/A	N/A	N/A	19,35	0,01
				Total	217.960	100,00

Fuente de datos: Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca (IGAC, 2000).

Del total de órdenes del suelo la mayoría corresponden a *Inceptisoles* con un 45,8%, seguido de los *Entisoles* con un 29,2%, luego los *Andisoles* con un 20,8% y por último, los *Histosoles* con un 4,2%.

La distribución de subórdenes se da de la siguiente manera, *Orthents* con un 20%, *Tropepts* con un 20%, *Udepts* con un 20%, *Udans* con un 12%, *Cryands* con un 8%, *Cryepts* con un 8%, *Aquens* con un 4%, *Folists* con un 4% y *Umbrepts* con un 4%.

CAPÍTULO IV

Fase 3: Determinación de Servicios ecosistémicos

Como primer resultado de esta fase, se debe mencionar que la información se obtuvo en un 97.7%, debido a la ausencia de información reportado anteriormente. En la Tabla 5, que se muestra más adelante, se evidencian tanto el servicio ecosistémico principal determinado por el suborden, como los servicios complementarios, determinados de acuerdo con la caracterización de la Unidad cartográfica.

De acuerdo con el suborden, los principales servicios ecosistémicos de regulación prestados por los suelos del PNNS son: secuestro y almacenamiento de carbono, clima local y calidad del aire, regulación de los flujos de agua, control biológico de plagas y moderación de fenómenos extremos; su distribución espacial se evidencia en la Figura 4.

Tabla 5

Servicio Ecosistémico de Regulación Principal y Servicios complementarios de los Suelos del PNNS.

COMPONENTES TAXONÓMICOS	SÍMBOLO DE SUELOS	ORDEN	SUBORDEN	SERVICIO ECOSISTÉMICO PRINCIPAL	SERVICIOS ECOSISTÉMICOS COMPLEMENTARIOS							
					CLCA	SAC	MEE	TAR	PEFS	PN	CBP	RFA
Asociación Humic Lithic Dystrudepts-Andic Dystrudepts	MGSg	Inceptisol	Udepts	SAC	x		x	x	x	x	x	
Asociación Humic Dystrudepts-Andic Dystrudepts-	MGFe,MGFf	Inceptisol	Udepts	SAC	x			x	x			x
Asociación Humic Dystrudepts-Lithic Dystrudepts-Typic Humic Lithic Dystrudepts Hapludans		Inceptisol	Udepts	SAC	x		x	x	x	x	x	x
Asociación Typic Dystrycryepts-Typic Cryaquepts	MEAd-MEAc	Inceptisol	Cryepts	CLCA		x	x	x	x	x	x	x
		Entisol	Aquepts			x	x		x			x
Asociación Typic Hapludands-Humic Lithic Dystrudepts	MGf	Andisol	Udands	RFA		x	x		x			
		Inceptisol	Udepts		x	x	x	x	x			
Asociación Typic Hapludands- Pachic Melanudands-Humic Lithic Dystrudepts	MGTc	Andisol	Udands	RFA		x	x	x		x	x	
		Inceptisol	Udepts			x	x		x	x		
Complejo: Lithic Melanocryands-Lithic Cryofolists	MEUe	Andisol	Cryands	CLCA		x	x					x
		Histosol	Folists			x	x	x	x			x
Complejo Typic Dystrycryepts- Humic Dystrycryepts	MEFg,MEFf	Inceptisol	Cryepts	SAC	x		x	x	x	x	x	x
Consociación: Typic Haplocryands	MENc	Andisol	Cryands	CLCA		x	x	x	x			x
Asociación: Typic Dystropepts- Typic Troprothents-Lithic Troprothents	MPHe	Inceptisol	Tropepts	CBP	x	x			x			x
		Entisol	Orthents		x	x	x		x			x
Asociación: Typic Troprothents- Typic Dystropepts	MTEf	Inceptisol	Tropepts	CBP	x	x	x		x			x
Asociación: Typic Troprothents fase 50-75%-Typic Troprothents fase 25-50%	MPMe	Entisol	Orthents	CBP	x	x	x		x			x
Asociación: Typic Troprothents- Lithic Troprothents	MJDg	Entisol	Orthents	CBP	x	x	x		x			x
Grupo indiferenciado: Misceláneo rocoso- Lithic Cryumbrepts	MGA	Inceptisol	Umubrepts	MEE	x	x			x	x	x	x
Asociación: Typic Dystropepts; Typic Tropopsamments	MLBf	inceptisol	Tropepts		x	x					x	x
		Entisol	Psamments	CBP		x	x	x				x

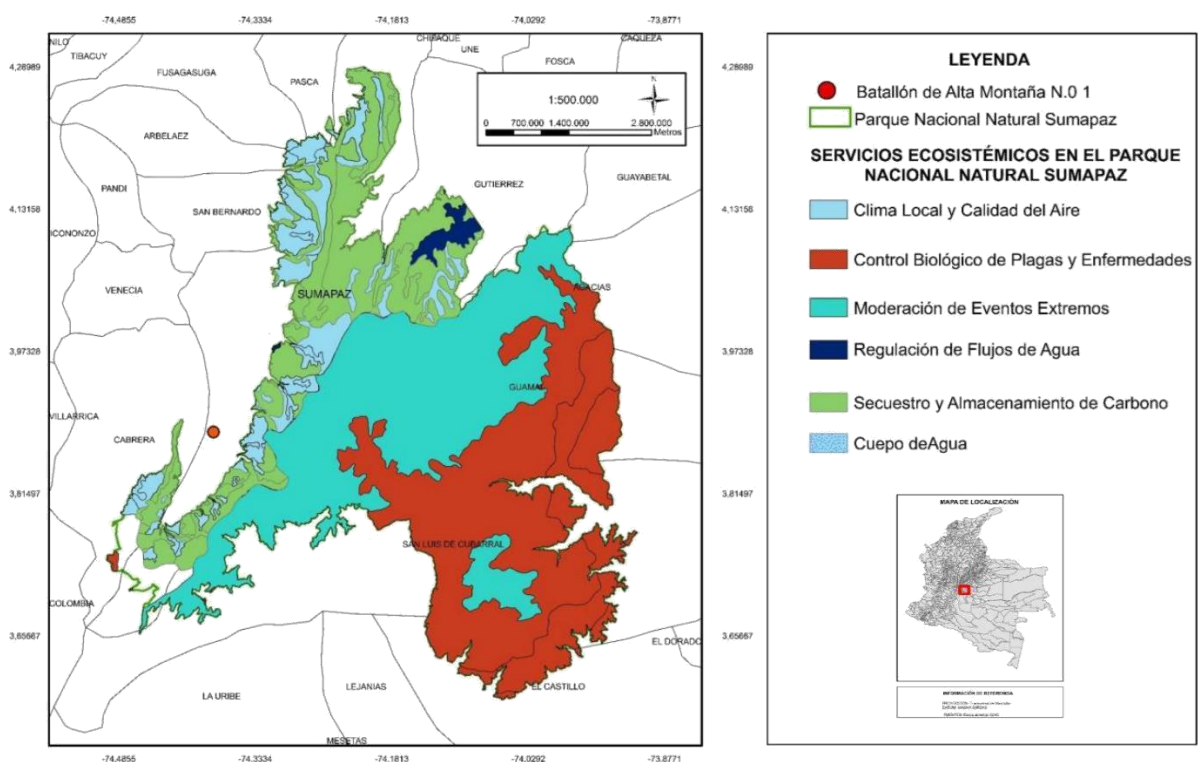
Nota: las siglas corresponden a CLCA: Clima Local y Calidad del Aire, SAC: Secuestro y Almacenamiento de Carbono, MEE: Moderación de Eventos Extremos; TAR: Tratamiento de Aguas.

CAPÍTULO IV

Residuales, PEFS: Protección de la Erosión y Fertilidad del Suelo, PN: Polinización, CBP: Control Biológico de Plagas y RFA: Regulación de Flujos de Agua.

Figura 4

Mapa de servicios ecosistémicos presentes en el PNNS.



Datos empleados: shape de suelos y límite de parque.
Fuente: IGAC.

La frecuencia de distribución de los servicios ecosistémicos en el PNNS se da de la siguiente manera: control biológico de plagas con el 37,4%, secuestro y almacenamiento de carbono con el 25%, clima local y calidad de aire con el 18,8%, regulación de flujos de agua con el 12,5% y moderación de eventos extremos con el 6,3%. Por otra parte, la distribución por hectáreas de acuerdo al servicio ecosistémicos se presenta así: control biológico de plagas con 79.061,82 hectáreas (36,27%), secuestro y almacenamiento de carbono con 42.592,46 (19,54%), clima local y calidad de aire con 19.649 hectáreas

CAPÍTULO IV

(9,01%), regulación de flujos de agua con 2.880,66 hectáreas (1,32%) y moderación de eventos extremos con el 73.757 hectáreas (33,85%) y cuerpo de agua con 19,35 hectáreas (0,01%).

Fase 4: Reconocimiento en campo

Durante la visita in situ se realizaron diez entrevistas semiestructuradas, donde el 70% corresponde a las realizadas con la comunidad aledaña al páramo y el 30% al personal del Batallón, teniendo en cuenta que uno de los objetivos de aplicar estas entrevistas era conocer que servicios ecosistémicos percibe la población, se determinó que el 100% de la muestra percibe como principales servicios ecosistémicos la calidad del aire, la recreación mediante la apreciación del paisaje y las excursiones, y por último, el abastecimiento de agua; al consultar porque percibían en menor percepción lo relacionado con el agua, indicaron que han evidenciado durante el último decenio la disminución en el volumen del agua que el páramo generaba, aunque se reconoce que es un servicio ecosistémico muy importante, a su vez, indicaron que en un 40% esto se debe al aumento de la frontera agrícola, 30% deforestación y el 30% se debe al aumento de las temperatura, lo cual ha ocasionado sequías.

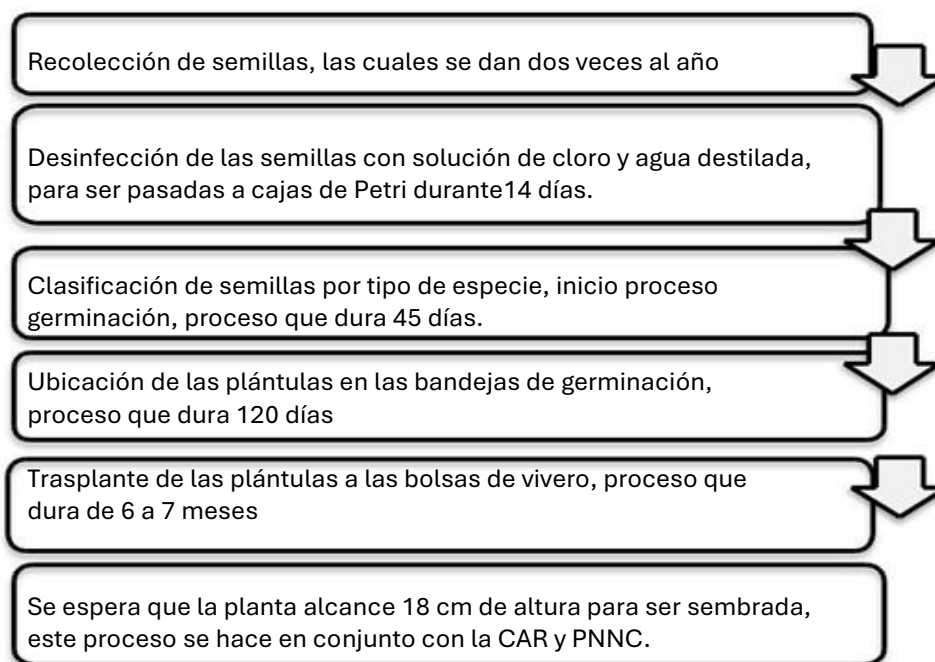
También se determinó que la población civil evidencia que no existe la suficiente presencia del Estado, debido a que han visto amenazado el ecosistema por proyectos de minería, aumento de actividades extractivas y la dinámica de conflicto en la región que abarca el páramo; el personal militar indico que evidencia como principal amenaza del páramo la presencia de cultivos en zonas de conservación, donde ellos realizan controles, pero que desafortunadamente la población no atiende a los requerimientos.

Por otra parte, se conoció el proceso que realiza el personal del batallón para la propagación de frailejones en vivero, el cual se evidencia en la Figura 5, este proceso lo desarrollan desde el año 2012, lo tanto como medida de compensación frente a los impactos inherentes al que hacer militar sobre la zona, como de un acto de compromiso por la protección del ambiente acordado por las Fuerzas Militares.

CAPÍTULO IV

Figura 5

Proceso de Propagación de Frailejón en el Batallón de Alta Montaña N°1.



Fuente: Personal del Ejército Nacional de Colombia, 2019.

Discusión

Los resultados obtenidos muestran desacuerdo frente a las nociones expuestas por Díaz & Navarrete (2005), Garavito (2015) y Chaparro & Chaparro (2012) en las cuales, se expresa que el principal servicio ecosistémico y de mayor relevancia que presta el ecosistema de páramo es la regulación de flujos de agua, ya que mediante la aplicación de la metodología quedo en evidencia que los suelos de esta área del PNNS tienen otras funciones ecológicas como el servicio del control biológico de plagas, de modo, que para evaluar de forma integral esto servicios de una región, es importante determinar los servicios ecosistémicos del suelo Montoya (2018; 2021; Rusinque Quintero, L. et al, 2022) y, aunque “los ecosistemas de páramo juegan un papel importante como reguladores del recurso hídrico”(Hammen, Pabon, Gutierrez & Alarcon, s.f, p.163) hay muchos más beneficios ecológicos, como los asociados con el cambio climático, la regulación de la actividad biológica, las dinámicas de las propiedades físico-químicas, entre otras. Adicionalmente, la calidad del hábitat del páramo redundo en el

CAPÍTULO IV

bienestar de los servicios ecosistémicos de las zonas de piedemonte y los llanos orientales de la región (Rusique Quintero et al, 2022; Montoya-Rojas et al, 2021: Montoya Rojas, 2011 a y 2011b), la cual provee gran riqueza paisajística a tal sector del país.

También es importante resaltar que estos ecosistemas sirven para capturar y almacenar grandes cantidades de carbono y regular el clima local y regional, servicios de regulación, los cuales en su mayoría son subvalorados, aunque cumplan un papel fundamental en la mitigación de los impactos del cambio climático, debido a que los servicios que más son tenidos en cuenta son los de aprovisionamiento, al ser tangibles. (De Groot et al, 2002).

De igual modo, los resultados obtenidos dejan a la luz los efectos causados sobre los suelos del ecosistema de páramo, ya que este ecosistema se está viendo abocado a potencializar servicios ecológicos como secuestro y almacenamiento de carbono, lo cual, se puede deber a la necesidad de adaptación del ecosistema al uso de sus suelos para la ampliación de la frontera agrícola y ganadera, los procesos de urbanización sobre esta área y el aumento de la temperatura, procesos que han sido investigados por Álvarez (2003), Giraldo (2008), Laverde (2008) y Van der Hammen et al, (2002). De igual modo, el evidenciar que estos suelos están prestando el servicio ecosistémico de control biológico de plagas y enfermedades coincide con los hallazgos de “polillas, hongos y escarabajos, que están afectando a las plantas emblemáticas de los páramos en zonas como Chingaza, Sumapaz y Cocuy, desde 2009.” (Revista Semana Sostenible, 2018).

También es oportuno mencionar, que, aunque los resultados no se obtuvieron al 100%, debido a la ausencia de la información disponible, la realización de este ejercicio permite dimensionar la importancia de que las entidades oficiales cuenten con información disponible actualizada, porque mediante esta se hace posible hacer investigaciones que conduzcan a generar herramientas que apoyen la toma de decisiones para la planificación y ordenamiento ambiental del territorio, sin embargo, teniendo en cuenta la importancia y el auge que han tomado los páramos a nivel nacional a causa de las problemáticas que enfrentan, como la ganadería extensiva, la agricultura, en especial cultivos de papa y cebolla, la minerías de oro y

CAPÍTULO IV

carbón y el turismo no controlado (El nuevo siglo,2018), el IGAC en conjunto con la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) se encuentra realizando el “levantamiento de suelos de más de 180.000 hectáreas de páramos en Cundinamarca y Boyacá, con el objetivo de conocer la calidad de los suelos y las actividades relacionadas con sus coberturas y usos”. (IGAC, 2019).

La valoración científica y de expertos es relevante, sin embargo, se evidencio que las percepciones de la comunidad aledaña al páramo coinciden con las halladas por Laverde (2008), en las cuales la comunidad expresa que el páramo debe ser evaluado de acuerdo al conocimiento de la comunidad, ya que son ellos los que conocen la oferta, amenazas, potencialidades y cambios de este ecosistema , lo cual, reafirma lo postulado por Hofstede (2005, p.3) donde menciona que en la toma de decisiones sobre estos ecosistemas, “debe tenerse en cuenta a sus habitantes, puesto que es importante desarrollar dentro de estas áreas un manejo participativo de los recursos naturales, que favorezca la relación entre las instituciones, organizaciones y habitantes”.

Conclusión

Infortunadamente, los suelos no revisten la importancia que merecen en cuanto a la determinación y evaluación de los servicios ecosistémicos que prestan, ya que en la mayoría de las metodologías existentes para abordar este tema, se manejan principalmente variables como el tipo de cobertura, ecosistemas presentes, variaciones climáticas y oferta versus demanda entre otros (Castañeda, s.f) y, en una baja frecuencia la caracterización y la taxonomía del suelo. No obstante, se evidencia que a raíz del auge de los impactos al ambiente en medio del cambio climático se ha empezado a hablar de seguridad del suelo, con un significado e importancia similar a la de la conservación del agua, por lo cual, los suelos cobrarán cada vez más importancia en la cultura de los pueblos y naciones a nivel global (Montanarella, 2015). Burbano (2016), adicionalmente, menciona que el aumento de las investigaciones que reflejan un abanico de servicios ecosistémicos prestados por los páramos, como paisajes de alta montaña son de alta significancia ambiental, ya que son

CAPÍTULO IV

proveedores de servicios ecosistémicos a los suelos y paisajes subandinos (Hofstede, s.f, Boyano, 2015 y FEDESARROLLO, 2013).

Sin embargo, también los resultados obtenidos nos permiten concluir que existen entidades preocupadas por conservar y mitigar los efectos de actividades del deber por la protección del territorio nacional, como lo es el Ejército Nacional, quienes mediante su política interna han asumido la responsabilidad de ser los guardianes de los páramos, responsabilidad que ejecutan mediante el desarrollo de proyectos como la propagación de frailejones en vivero y el patrullaje constante de los límites de estos ecosistemas, para controlar la presencia de actividades lícitas y evitar las ilícitas que puedan afectar este frágil, pero relevante ecosistema (Gutiérrez Alfonso, 2016; Camargo Moyano, 2017; Montoya- Rojas et al, 2014; Montoya-Rojas et al, 2016).

Conocer y reconocer la importancia de los servicios ecosistémicos que presta el suelo se convierte en una herramienta que facilita la planificación y el ordenamiento del territorio, debido a que como lo expone Cotler *et al.* (2007) y Burbano (2010) sobre el suelo es que se soportan todas las actividades que permiten el desarrollo de la sociedad y su conservación debe ser de interés público y gubernamental. Adicionalmente, el suelo, es la base de la biodiversidad, en el se desarrollan funciones ecológicas que proporcionan servicios ecosistémicos beneficiosos para la sostenibilidad regional (Montoya-Rojas et al, 2022).

Agradecimientos

Al personal del Ejército Nacional orgánico del Batallón de Alta Montaña No. 1, al personal del Centro de Educación Militar. A la Ingeniera Leticia Guerrero, directora de la Especialización en Gestión Ambiental y Desarrollo Comunitario del Centro de Estudios Militares en el 2019, por su apoyo y orientaciones asociadas a los actores clave de la región, además, por su respaldo en la investigación. A la empresa INGEOS SAS por permitir ser parte de este proyecto de investigación. A la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales – U.D.C.A, por permitir socializar los resultados de investigación y apoyar investigaciones previas lideradas por la Dra. Grace Andrea Montoya Rojas.

CAPÍTULO IV

REFERENCIAS

- Alba, A., Burgos, A., Cárdenas, J., Lara, K., Sierra A., Montoya Rojas, G. (2014): *Research panorama on the second green Revolution in the world and Colombia*. Colombia. Tecciencia. Vol. 8 núm.15, p. 69-90 June. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-36672013000200007, DOI:<http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2013.15.6>.
- Ávila, E. (2000). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca, Tomo 3: Descripción de los suelos (pp. 141- 339). Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi Subdirección de Agrología Colombia.
- Betín Urrego, Y. y Orjuela Sánchez, D. (2020). “Propuesta de zonificación agroecológica para la disminución del conflicto socioambiental en el complejo de páramos tota-Bijagual-Mamapacha, en el departamento de Boyacá”. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales – U.D.C.A, Colombia. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/3384>
- Boyano, P. (2015). Servicios ecosistémicos de la criósfera y de los páramos de la cordillera Blanca, Perú. Colegio de Geógrafos del Perú. Consultado en <http://siar.minam.gob.pe/ancash/sites/default/files/archivos/public/docs/servicios-ecos.pdf>
- Burbano, H. (2010). El Suelo al Servicio de la Sociedad y su Rol en el Contexto de los Cambios Globales. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas*, 11(2), 53-62. Recuperado de <file:///D:/descargas%20disco%20D/Dialnet-ElSueloAlServicioDeLaSociedadYSuRolEnElContextoDeL-3640660.pdf>.
- Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista ciencias agrícolas*, 33(2), 117-124. Consultado en <http://www.scielo.org.co/pdf/rcia/v33n2/v33n2a11.pdf>.

CAPÍTULO IV

- Camargo Moyano, F.A. (2017). “La transformación del bosque seco desde la mirada geográfico-ambiental, en la Cuenca hidrográfica del río César”. Universidad de Ciencia Aplicadas y Ambientales – U.D.C.A, Colombia <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/813>
- Caro y Torres (2015). Servicios ecosistémicos como soporte para la gestión de sistemas socioecológicos: aplicación en agroecosistemas. Grupo de investigación GIGAS, Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana. Consultado en <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v19n2/v19n2a11.pdf> .
- Castañeda, A. (s.f). Diseño de una Metodología para Evaluar el Estado de los Servicios Ecosistémicos. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. Consultado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/10960/Dise%F1o%20de%20una%20metodolog%EDa%20para%20evaluar%20el%20estado%20de%20los%20Servicios%20Ecosist%E9micos.pdf;jsessionid=B09ED38FC4C2AE929A8857475E033A65?sequence=2>
- Centro Hábitat. Bogotá. D.C. Moreno, M y Romero, C. (2018). El batallón de Alta Montaña del Sumapaz. TC. Antonio Arredondo Centro Nacional de Memoria Histórica. Bogotá, Colombia.
- Chaparro, J y Chaparro, N. (2012). Beneficios del ecosistema páramo, organizaciones y políticas de conservación Aproximaciones al páramo El Consuelo del municipio de Cerinza, Boyacá. *Desarrollo, Economía y Sociedad*, 1(1), 57-76.
Consultado de: <https://jdc.edu.co/revistas/index.php/deyso/article/view/505> .
- Cotler, H, et al. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, 83, 5-71. Instituto Nacional de Ecología, México. Consultado de file:///D:/descargas%20disco%20D/La_conservacion_de_suelos_un_asunto_de_interes_pub.pdf .

CAPÍTULO IV

- Daza, M., Florez, F. y Triana, F. (2013). Efecto del uso suelo en la capacidad de almacenamiento hidrico en el páramo de Sumapaz-Colombia. *Revista facultad nacional de agronomia Medellin*. DOI: <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642> .
- De Groot, R., Wilson, M. y Boumans, R. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393-408. Consultado en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800902000897> .
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2014). Claves para la taxonomía de suelos. Decima segunda edición. Montecillo, Estado de México. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas.
- Díaz-Granados, M., Navarrete, J., y Suárez, T. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. *Revista de Ingeniería*, (22), 64-75. ISSN 0121-4993.
- Dulce, L. (2019). Sumapaz, una víctima no reconocida de la guerra. Periódico El Espectador. Consultado en <https://www.elespectador.com/colombia2020/justicia/verdad/sumapaz-una-victima-no-reconocida-de-la-guerra-articulo-857848> .
- El Nuevo Siglo*. Extraña enfermedad carcomen a los frailejones (04 de marzo de 2018). Consultado em <https://elnuevosiglo.com.co/articulos/03-2018-extrana-enfermedad-carcomen-a-los-frailejones> .
- Food and Agriculture Organization (FAO, 2019). Servicios ecosistémicos y biodiversidad. Consultado de <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/regulating-services/es/> .
- Fundación para la Educación Superior y el Desarrollo (FEDESARROLLO, 2013). Valoración de los bienes y servicios ambientales provistos por el páramo de Santurbán. Consultado en https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/332/Repor_Febrero_2013_Garcia.pdf?sequence=7&isAllowed=y .

CAPÍTULO IV

- Garavito, L. (2015). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. INGENIARE, Universidad Libre-Barranquilla 11(19), 127-136. Consultado en Dialnet- LosParamosEnColombiaUnEcosistemaEnRiesgo-5662382%20(1).pdf .
- Garzón, J. (2015). Relaciones entre el ordenamiento territorial y el ordenamiento ambiental. Estudio de caso: páramo de Rabanal (Tesis inédita de maestría). Universidad Nacional de Colombia Consultado en <http://bdigital.unal.edu.co/52195/1/juancarlosgarzoncamacho.2015.pdf> .
- Gutiérrez Alfonso, K. J. (2016). “Transformación del paisaje en el Departamento del Meta una zona de conflicto armado” Universidad de Ciencia Aplicadas y Ambientales – U.D.C.A, Colombia <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/1043>
- Hernández Guzmán, L. F. (2018). “Arqueografía una herramienta para la arqueología preventiva en el proceso de la planeación territorial”. Universidad de Ciencia Aplicadas y Ambientales – U.D.C.A. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/1106>
- Hofstede, R. (2005). *El manejo del páramo como ecosistema estratégico*. Ponencia presentada en el V Simposio Internacional para de desarrollo sustentable de los Andes, San Salvador de Jujuy, Argentina.
- Hofstede, R. (s.f). Los servicios del ecosistema de páramo: una visión desde la evaluación de ecosistemas del Milenio. Unión internacional para la conservación de la naturaleza. Consultado en https://www.portalces.org/sites/default/files/references/097_Hofstede%202011b%20Milenio.pdf .
- Hofstede, R., Segarra, P. y Mena, P. (2003). Los Páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia. Quito. Consultado en <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56486.pdf> .
- Instituto Alexander von Humboldt (IEAVH, 2017). Recomendación para la delimitación, por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, del Complejo de Páramos

CAPÍTULO IV

- de Sumapaz-Cruz verde a escala 1:25.000. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt— Fondo Adaptación.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2019). El IGAC adelanta el estudio de los Páramos de Cundinamarca y Boyacá. Página oficial del IGAC. Consultado en <https://www.igac.gov.co/es/noticias/el-igac-adelanta-el-estudio-de-los-paramos-de-Cundinamarca-y-Boyacá>.
- La Verde, C. (2018). Servicios ecosistémicos que provee el páramo de la cuenca alta del río Teusacá: Percepción de los actores campesinos y su relación con los planes ambientales en la vereda Verjón Alto Bogotá D.C. (Tesis inédita de pregrado). Universidad Pontificia Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Las extrañas plagas en los frailejones que tienen preocupados a los científicos colombianos (19 de febrero de 2018). *Revista Semana sostenible*. Consultado en <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/frailejones-con-plagas-tienen-preocupados-a-los-cientificos-colombianos/39518>.
- León Bello, E. M. (2020) “Los servicios ecosistémicos de regulación del suelo y riqueza escénica en las ciudades puerto-frontera de la cuenca baja del Magdalena”. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales – U.D.C.A <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/3734>
- Mina Galeano, M. F. & Palencia, J.D. (2017). “Transformación del bosque seco tropical y del servicio ecosistémico de apoyo "hábitat para especies" en los municipios pertenecientes a la jurisdicción de la hidroeléctrica el Quimbo (Huila, Colombia) durante los años 2000 y 2016”. Universidad de Ciencia Aplicadas y Ambientales – U.D.C.A, Colombia. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/687>
- Miranda Muñoz, R. (2016). "Revisión panorámica del uso del pasto vetier (*Chrysopogon zaizanioides*) en restauración de taludes como técnica de bioingeniería del suelo". Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/1757>

CAPÍTULO IV

- Montanarella, L. (2015). Agricultural policy govern our soils. *Nature*. 5(28), 32 - 33.
<https://doi.org/10.1038/528032a> .
- Montoya-Rojas, G. A. (2011c). Zonificación Ambiental en la Cuenca Hidrográfica media de Río Negro. Un caso práctico en el Municipio de Útica. Colombia. Editorial Académica Española & Academic Publishing GmbH. Pp. 304. <https://www.eae-publishing.com/catalog/details/store/gb/book/978-3-8454-8408-2/zonificaci%C3%B3n-ambiental-en-cuencas-hidrogr%C3%A1ficas>
- Montoya-Rojas, G. (2007). Environmental Zoning, Management and Sustainable Use of Natural Resources in Territory Planning. En: Research output, International report of Programme AlBan of High Level Scholarships in the European Union for Latin America. Porto, Portugal. ASSOCIACAO GRUPO SANTANDER - REPRESENTAO EM PORTUGAL. P. 64.
https://www.researchgate.net/profile/Grace_Montoya_Rojas/publication/315829468_Environmental_Zonification_Management_and_Sustainable_Use_of_Natural_Resources_in_Territory_Planning/links/58e990aea6fdccb4a8322491/Environmental-Zonification-Management-and-Sustainable-Use-of-Natural-Resources-in-Territory-Planning.pdf.
- Montoya-Rojas, G. (2011a): La edafología en la planeación ambiental y el desarrollo territorial. Colombia. Tecciencial. ed: v.6 num.11, p. 56-65.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5113293>.
- Montoya-Rojas, G. (2011b). Zonificación Ambiental en la Cuenca Hidrográfica media de Río Negro. Un caso práctico en el Municipio de Útica. Colombia. Universidad de Salamanca, Spain. <https://gredos.usal.es/handle/10366/110545>
- Montoya-Rojas, G. Barragan, C, Aranguren, M., Martínez, N., Rodríguez, R., Villamil, R. (2014): *Discussion on the implications upon the environment of some technologies from the second green revolution*. Colombia. Tecciencia. ed: vol.9 num.17, p. 49-64 June. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-

CAPÍTULO IV

36672014000100003. DOI:<http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2014.16.2>
<http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2014.16.2>.
- Montoya-Rojas, G., Moyano Molano, A. y Rusinque Quintero, L. (2022). La Rizosfera, clave para la Biomimesis fuerte y la sostenibilidad de los paisajes en el Caquetá, Colombia. *Revista de Biomimesis, Transdisciplinariedad en Armonía con la Naturaleza*. Volumen 1. 13-25. Red Internacional, Interuniversitaria e Interinstitucional de estudios sobre Biomimesis RI3BIOMIMICRY NETWORK. ISSN: 2938-0944 <https://redinternacionalbiomimesis.org/revista-biomimesis-2/>
- Montoya-Rojas, GA. *et al.* (2014). Latin America and the Caribbean Technical Dialogue on Intended Nationally Determined Contributions to the 2015 Agreement under the UNFCCC. UNDP P. 34. Bogota, Colombia. <http://www.undp.org/content/dam/LECB/events/2014/201404-lac-regional-dialogue-indcs-bogota-columbia/201404-lac-regional-dialogue-indcs-bogota-columbia-final-report.pdf>
- Montoya-Rojas, G., (2018). “El suelo, una ciencia clave para el análisis frente la adaptación al cambio climático”. En: Periódico Institucional de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. Año 10 No. 25. Bogotá, D.C. <https://es.calameo.com/read/000897567dfaec0dcd08c>
- Montoya-Rojas, G. (2018). Lineamientos Epistemológicos para la aplicación de la Geografía del Suelo. Sociedad Geográfica Colombiana – SOGEOCOL. ISBN 978-958-59711-7-2. PP.1- <http://sogeocol.edu.co/lineamientos.htm>
- Montoya-Rojas, G., and Kushal P.S (2019). Geoderma: interrelations between soil ecosystem quality and groundwater. Federation of India Geosciences Associations, 2nd Triennial Congress of FIGA, Geosciences for Sustainable Development Goals. CSIR – NGRI, Hyderabad, India. DOI: 10.13140/RG.2.2.10546.96960/1
- Montoya-Rojas, G A. (2021): Lineamientos Epistemológicos para la aplicación de la Geografía del Suelo. 2ª Edición. Sociedad Geográfica Colombiana – SOGEOCOL. ISBN 978-958-52628-9-8.

CAPÍTULO IV

- Montoya-Rojas, G., Posada, A., Martín, J., Garnica, L., Peña, P. y Ramírez. (2017). Gestión integral de la industria cauchera en el municipio de San José del Guaviare, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, pp. 89-110. <http://revistas.uptc.edu.co/revistas/index.php/perspectiva/article/view/5854>, DOI:<https://doi.org/10.19053/01233769.5854>.
- Montoya-Rojas, G.A., Almario García, M., Bello-Escobar, S., and Singh, K.P. (2020). Analysis of the interrelations between biogeographic systems and the dynamics of the Port-Waterfront Cities: Cartagena de Indias, Colombia. *Ocean and Coastal Management*, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.105055>.
- Montoya-Rojas, G.; Moyano-Molano, A.; Rusinque-Quintero, L. (2021). Microplastics in the Landscapes of Marine-Coastal Environments. Case study Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), Colombia, *En Giannetti, B.F.; Almeida, C.M.V.B.; Agostinho, F. (editors): Advances in Cleaner Production, Ferrara, Italy.* http://www.advancesincleanerproduction.net/10th/files/proceedings_10th.pdf
- Montoya-Rojas, G. y Rivera-Marroquín, M. (2021). Los componentes ambientales de la cuenca Torca: un insumo para el análisis de los escenarios de variabilidad climática en la ciudad de Bogotá, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1). DOI: 10.31910/rudca.v24.n1.2021.1833.
- Moyano-Molano Angie, Rusinque-Quintero Linda Linney y Montoya-Rojas G.A. (2022) Análisis de la conectividad de las áreas protegidas a través del paisaje del departamento de Caquetá, Colombia. *Revista Cartográfica* 102. DOI: <https://doi.org/10.35424/rcarto.i104.980> <https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar/article/view/980/1856>
- Neira, A. et.al. (2001). Guía territorial de la Localidad Rural No.20. Universidad Nacional de Colombia.
- Pacha, M. (2014). Valoración de los servicios ecosistémicos como herramienta para la toma de decisiones: Bases conceptuales y lecciones aprendidas en la Amazonía. Brasilia: World Wildlife Fund

CAPÍTULO IV

- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2005). Plan de Manejo Parque Nacional Natural Sumapaz. Bogotá, Colombia.
- Pochiraju, H., Montoya-Rojas, G.A. and Singh K.P. (2019). Impact assessment of bioclogging on flow of water in porous media. Federation of India Geosciences Associations, 2nd Triennial Congress of FIGA, Geosciences for Sustainable Development Goals. CSIR – NGRI, Hyderabad, India. DOI: 10.13140/RG.2.2.18096.71680
- Pombo, D. (1989). Perfil ambiental de Colombia. U.S. Agency for International Development, Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales “Francisco José de Caldas” Colciencias, y Fondo FEN Colombia, Bogotá.
- Quimbayo Miranda, D. (2018). "Elementos metodológicos para la valoración del riesgo de desastres convergentes en centros urbanos". Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/4119>
- Resolución 1434 del 2017 (14 de julio), *por medio de la cual se delimita el área de Páramos Cruz verde-Sumapaz y de adoptan otras determinaciones.*
- Rubiano Arámbulo, G. F. (2020). “Estudio de la historia ambiental en la cuenca alta y media del Río Bogotá como herramienta prospectiva de adaptación a eventos extremos” Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales – U.D.C.A, Colombia. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/3572>
- Rusínque Quintero, L., Montoya Rojas, G. & Moyano Molano, A. L. y (2022). “Environmental risks due to the presence of microplastics in coastal and marine environments of the Colombian Caribbean” in Marine Pollution Bulletin. ISSN 18793363. doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114357
- Van der Hammen, T., Pabon, J., Gutierrez, H., y Alarcon, J. (s.f.). Paramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en condición Hotspot & Global Climatic Tensor. *El cambio global y los Ecosistemas de Alta Montaña de Colombia* (pp. 163-209). Bogotá: IDEAM.

CAPÍTULO V

SUELOS POLIGENÉTICOS: LA DIMENSIÓN HISTÓRICA EN LA INTERPRETACIÓN DE LA APTITUD Y EL USO DE LAS TIERRAS

SOLOS POLIGENÉTICOS: A DIMENSÃO HISTÓRICA NA INTERPRETAÇÃO DA ADEQUAÇÃO E USO DO SOLO

POLYGENETIC SOILS: THE HISTORICAL DIMENSION IN THE INTERPRETATION OF SUITABILITY AND LAND USE

SUELOS POLIGENÉTICOS: LA DIMENSIÓN HISTÓRICA EN LA INTERPRETACIÓN DE LA APTITUD Y EL USO DE LAS TIERRAS

Jorge Alberto Sánchez Espinosa

Grupo de Investigación Suelos y Ecología. IGAC- Colombia

Docente. Colombia

Notas de autor

Jorge Alberto Sánchez Espinosa. Agrólogo y Antropólogo. Magister y Doctorado en Ciencias Agrarias. Área Suelos. UN. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-6459-2485> jasancheze@unal.edu.co; sanchezespinosaja@gmail.com.



CAPÍTULO V

Resumo: Solos poligenéticos é o produto da pesquisa realizada no âmbito dos estudos de doutorado consignados na tese intitulada "Mineralogia e gênese de solos desenvolvidos sobre materiais não consolidados no leque diluvial de Fusagasugá Colômbia" (Sánchez-Espinosa, J.A. 2017). O objetivo da pesquisa centrou-se na avaliação dos solos do leque diluvial de Fusagasugá (Cundinamarca, Colômbia), da evolução pedológica do leque, tomando como marcadores de edafogênese a mineralogia de argilas e areias, a caracterização físico-química e a micromorfologia. O estudo foi realizado ao longo de um transecto EW, e com base nas diferenças geomorfológicas, pisos climáticos e materiais de origem, foram identificadas a variedade de solos e sua distribuição na paisagem. As condições paleoambientais contrastam com as atuais condições de boa drenagem nos solos, devido à inclinação do talude. Processos dominantes como a iluviação e a oxidação-redução, evidenciados pela presença de feições redox do solo (condições redoximórficas), alternadas com a iluviação da argila, processo fortemente favorecido por estações secas e chuvosas bem marcadas, permitem demonstrar a presença de solos poligenéticos, que se formaram em ambientes totalmente diferentes dos atuais, gerando neles mais de uma origem e evolução, associadas às mudanças climáticas ocorridas durante o Pleistoceno e Holoceno, não coincidindo com sua origem e evolução atuais, pois revelam a realidade de mudanças climáticas e à medida que os estudos de solos de maior resolução avancem, sua presença será mais evidente, isso tem um significado muito importante porque nos dá uma visão de períodos mais chuvosos ou mais secos e nos fornece melhores argumentos técnicos para o uso e manejo atual do solos.

Palavras-chave: Condições redoximórficas, iluviação argilosa, micromorfologia do solo.

Abstract: Polygenetic soils is the product of research carried out within the framework of doctoral studies consigned in the thesis entitled "Mineralogy and genesis of soils developed on unconsolidated materials in the diluvial fan of Fusagasuga Colombia" (Sánchez-Espinosa, J.A. 2017). The objective of the research focused on the evaluation of the soils of the diluvial fan of Fusagasugá (Cundinamarca, Colombia), of the pedological evolution of the fan, taking as tracers of edaphogenesis the mineralogy of clays and sands, the physical chemical characterization and the micromorphology. The study was carried out along an EW transect, and based on geomorphological differences, climatic floors and parent materials, the variety of soils and their distribution in the landscape were identified. Paleoenvironmental conditions contrast with the current conditions of good drainage in the soils, due to the inclination of the slope. Dominant processes such as illuviation and oxidation-reduction, evidenced by the presence of redox soil features (redoximorphic conditions), alternating with illuviation of clay, a process strongly favored by well-marked dry and wet seasons, allow demonstrating the presence of polygenetic soils. which have been formed in environments totally different from the current ones, generating in them

CAPÍTULO V

more than one origin and evolution, associated with climatic changes that occurred during the Pleistocene and Holocene, not coinciding with their current origin and evolution, therefore they reveal the reality of the climate change and as higher resolution soil studies advance, its presence will be more evident, this has a very important meaning because it gives us insight into more rainy or drier periods and provides us with better technical arguments for the current use and management of the soils.

Keywords: Redoximorphic conditions, illuviation of clays, soil micromorphology.

Resumen: Suelos poligenéticos es producto de las investigaciones llevadas a cabo en el marco de los estudios doctorales consignados en la tesis titulada “Mineralogía y génesis de los suelos desarrollados sobre materiales no consolidados en el abanico diluvial de Fusagasuga Colombia” (Sánchez-Espinosa, J.A. 2017). El objetivo de la investigación se centró en la evaluación de los suelos del abanico diluvial de Fusagasugá (Cundinamarca, Colombia), de la evolución pedológica del abanico tomando como trazadores de la edafogénesis la mineralogía de las arcillas y arenas, la caracterización físico química y la micromorfología. El estudio se llevó a cabo a lo largo de un transecto EW, y con base en las diferencias geomorfológicas, en los pisos climáticos y en los materiales parentales, se identificó la variedad de suelos y su distribución en el paisaje. Condiciones paleoambientales contrastan con las condiciones actuales de buen drenaje en los suelos, debido a la inclinación de la pendiente. Procesos dominantes como la iluviación y la oxidación-reducción, evidenciados por la presencia de edaforrasgos redox (condiciones redoximórficas), en alternancia con la iluviación de arcilla, proceso fuertemente favorecido por las estaciones secas y húmedas bien marcadas, permiten demostrar la presencia de suelos *poligenéticos*, los cuales se han formado en ambientes totalmente diferentes a los actuales, generando en ellos más de un origen y evolución, asociados con cambios climáticos ocurridos durante el *Pleistoceno* y *Holoceno*, no coincidiendo con su origen y evolución actuales, por tanto nos develan la realidad del cambio climático y a medida que avancen los estudios de suelos a mayor resolución, será más evidente su presencia, esto tiene un significado muy importante porque nos da luces de periodos más lluviosos o más secos y nos proporciona mejores argumentos técnicos para el uso y manejo actual de los suelos.

Palabras clave: Condiciones redoximórficas, iluviación de arcillas, micromorfología de suelos.



CAPÍTULO V

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la morfología actual del abanico de Fusagasugá, se ha establecido que fue configurado por materiales transportados y depositados desde la parte alta de la región de Pasca, con características de un flujo diluvial con claro sorteamiento, cuyo espesor varía hasta alcanzar los 420 m. en el sector de Chinauta (IGAC, 2000; INGEOMINAS, 2001; Khobzi & Usselman, 1973); según Bürgl (1957) es el principal depósito cuaternario de la zona correspondiente al Pleistoceno tardío.

Posteriormente la acción de los agentes modeladores sobre el abanico, configuró un panorama morfológico complejo, a lo que se aunó la interacción de los factores formadores (*clima, relieve, material parental, organismos y tiempo*) y los procesos de formación (ganancias, pérdidas, transformaciones y translocaciones) del suelo, lo cual generó un mosaico de suelos con pedogénesis distintas y complejas (IGAC, 2000); tales eventos explican la distribución de los diferentes suelos en este piedemonte de origen diluvial, cuyo grado de evolución varía desde moderado (Inceptisoles y Andisoles) hasta avanzado (Ultisoles y Alfisoles).

En el primer caso, los procesos más importantes en la edafogénesis han sido las transformaciones, las ganancias y las pérdidas, mientras que en el segundo ha predominado la acumulación de arcilla iluvial que ha originado un horizonte argílico (Bt) en el suelo; la condición húmeda y la estabilidad de la geoforma explican la presencia de Ultisoles, mientras que en los sectores bajo condición seca, ocurre la presencia de Alfisoles.

La geomorfología del país presenta muchos ejemplos de abanicos diluviales entre los cuales se destacan, entre otros, los macroabanicos de Armenia-Pereira e Ibagué, formados hacia la base de las vertientes occidental y oriental de la Cordillera Central, respectivamente, y la sucesión de abanicos-terrace de Pasca, Fusagasugá-Chinauta y Tolemaida, localizados en depresiones intramontanas a lo largo de la vertiente oeste de la Cordillera Oriental.

CAPÍTULO V

Para el desarrollo de la presente investigación se planteó como objetivo general, evaluar la evolución pedológica del abanico tomando como trazadores de la edafogénesis, la mineralogía de arcillas y arenas y la micromorfología de los suelos.

Los objetivos específicos, con establecer relaciones geopedológicas y climáticas de los suelos con el propósito de esclarecer su origen y evolución, el comportamiento físico-químico de los suelos del abanico de Fusagasugá y establecer la contribución de la micromorfología y su relación con la formación de suelos policíclicos o poligenéticos.

2. LOCALIZACIÓN

El abanico diluvial de Fusagasugá se encuentra ubicado en el departamento de Cundinamarca entre los 4° 21' 00" Latitud Norte y 74° 24' 00", Longitud Oeste y a 64 kilómetros, al sur-occidente de la ciudad Capital Bogotá.

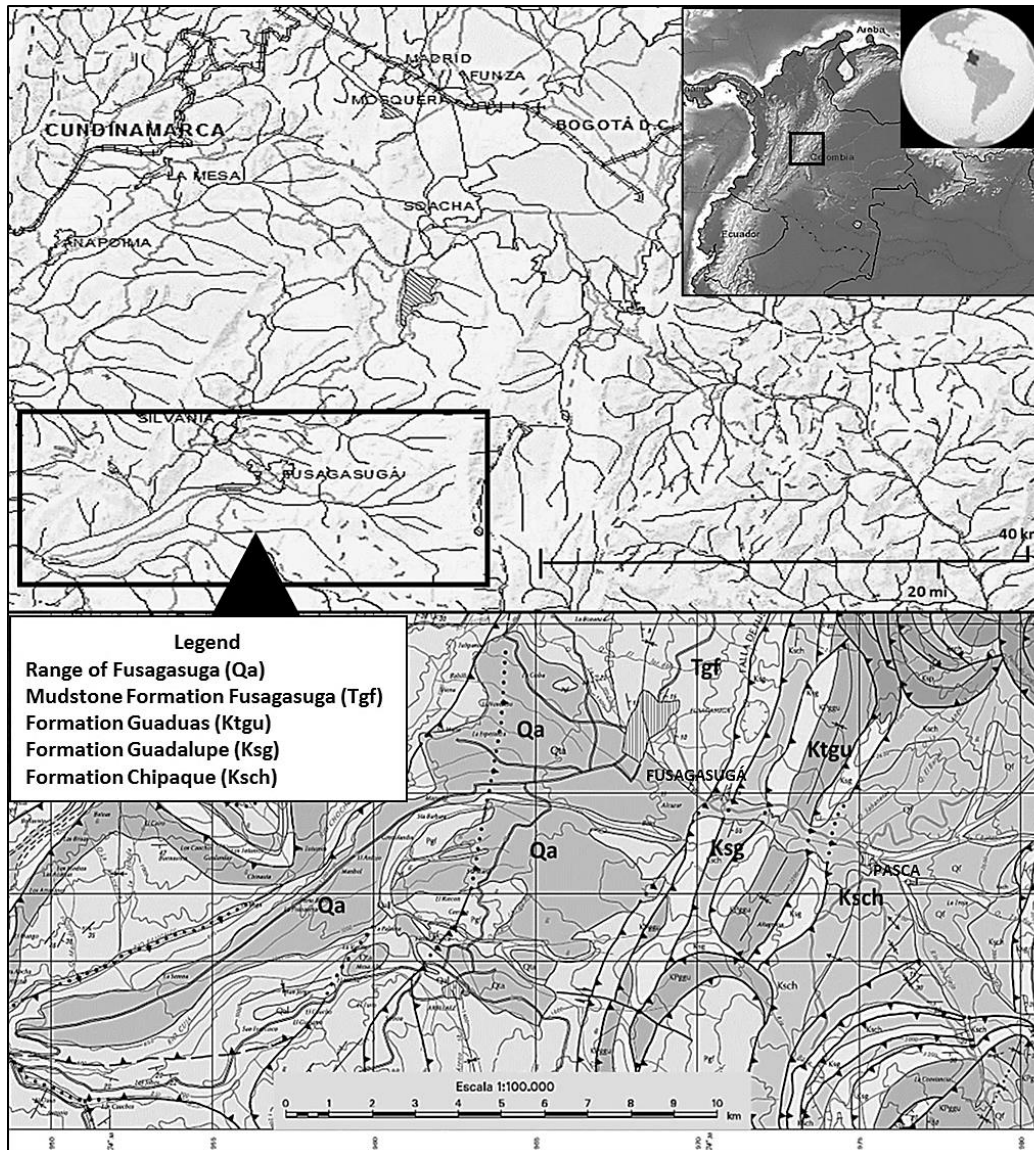
Fusagasugá es la capital de la Provincia del Sumapaz, que junto con el municipio de Pasca hacen parte de la cuenca del río Sumapaz, la cual pertenece al sistema hidrográfico occidental del departamento de Cundinamarca. La superficie actual del abanico diluvial se encuentra a una altitud entre 550 y 3050 metros sobre el nivel del mar; la temperatura media anual varia de 14° a 26° C y la precipitación media anual está entre 1080 y 1840 mm (IGAC, 2009), Ver Figuras 1 y 2.



CAPÍTULO V

Figura 1

Mapa Localización del Área de Estudio (Fuente IGAC).



El área de estudio se enmarca en todo el gran paisaje de piedemonte, principalmente en los paisajes de los planos del abanico correspondientes al ápice, cuerpo, base y a las geofomas montañosas de las partes altas, fuente principal de origen de los materiales no consolidados del abanico de Fusagasugá, los materiales son

CAPÍTULO V

heterométricos, recubiertos o no de cenizas volcánicas y en algunos planos por cantos rodados mezclados con aluviones finos y medios (IGAC, 2000).

Figura 2

Fotografía del cuerpo del abanico, al fondo la ciudad de Fusagasugá (Sánchez-Espinosa, J. 2017).



Dada su extensión, el depósito diluvial (1) sobresale por su relieve plano en medio de montañas fuertemente inclinadas y escarpadas de la cordillera oriental y comprende una sucesión de abanicos de lodo y detritos limitados por grandes escarpes. Los depósitos diluviales cubren en la parte superior la depresión del anticlinal de Fusagasugá-Chinauta entre las cotas de 3.000 y 2.500 m; más abajo, al gran sinclinal de Fusagasugá-Chinauta entre las cotas de los 1.900 y 800 m, y finalmente, al sinclinal de El Nilo, entre 600 y 500 m de altitud. Las tres unidades se comunican a través de estrechos boquerones determinados por fallamiento de los anticlinales y homoclinales que las enmarcan. Tanto su disposición espacial y la continuidad de su declive, como la naturaleza de sus sedimentos y su régimen depositacional, en los cuales no se advierte camino abrupto, sugieren que todos deben proceder de una misma fuente y que su formación debió ser

(1) Sedimentación diluvial, término sugerido por Doeko Goosen (1968) del ITC de Holanda y adoptado por el CIAF (Centro Interamericano de Fotointerpretación IGAC-Colombia). A diluvial se le asigna una connotación de fuerte torrencialidad.

CAPÍTULO V

sucesiva (IGAC, 2009). Según Villota (1980) la fuente de materiales del flujo diluvial es una misma, y su huella puede observarse como un escarpe rocoso (ER) y su depositación debió ser más o menos sucesiva.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

El suelo es definido como *“un cuerpo natural que comprende sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases, que ocurre en la superficie de la tierra, que ocupa un espacio y que se caracteriza por uno o ambos de los siguientes: 1) horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia, o, 2) habilidad de soportar plantas enraizadas en un ambiente natural”* (Soil Survey Staff, 2003). Se puede entender también como la colección de cuerpos naturales en el paisaje, que se origina y evoluciona como consecuencia de la acción de factores bioclimáticos (clima y sus organismos asociados), al actuar sobre materiales geológicos (rocas o formaciones superficiales: sedimentos o productos de alteración) presentes en las diferentes geoformas influenciados por el tiempo de actuación. Ello determina horizontes que permiten su clasificación y, mediante ésta, su representación cartográfica (Zinck, 2012; Plaster, 2005; Buol, Hole & McCracken, 2000; Malagón, 1998; Wildin Smeck & Hall, 1983).

A lo largo de muchos años el suelo ha sido considerado como una mezcla de material suelto producto de la fragmentación de rocas y materiales de origen orgánico, formado por la interacción de los factores de formación como son el clima, la biota, el material parental y la topografía, donde el grado, la intensidad e interacción ocurre a través del tiempo, conllevando al concepto fundamental del suelo como una expresión geográfica. Este modelo básico de edafología es el que hace hincapié en las interacciones de las actividades climáticas y biológicas trabajando sobre un material de origen y que son modificadas por la topografía local y la evolución del paisaje con el tiempo, dando lugar a los horizontes reconocibles del suelo (Wilding *et al.*, 1983).

CAPÍTULO V

En síntesis, los suelos resultan de la respuesta del material parental a los factores ambientales activos, a través del tiempo y de la evolución espacial de acuerdo con las variaciones que en ellos se hayan sucedido (Malagón, 1998; Zinck, 2012).

3.1 GÉNESIS Y EVOLUCIÓN DE SUELOS

De acuerdo con Buol et al, (2000); Malagón (1998) y Wilding et al, (1983), la evolución de los suelos puede ocurrir por efecto de un mismo clima, con sus organismos asociados, que actúa sobre un material parental (monogénesis) o estar supeditada a cambios en éste (poligénesis); a su vez, puede ser progresiva (tendiente al clímax pedológico) o regresiva (generalmente por efecto de erosión o aporte de nuevos materiales).

Durante la génesis y evolución los materiales originales se transforman (alteración, meteorización, mineralización, humificación) de acuerdo con el régimen climático imperante y dada su susceptibilidad ciertas partículas o sustancias cambian de posición (translocación) dentro de la matriz del suelo; algunos elementos y compuestos se pierden de acuerdo a su solubilidad o mediante procesos erosivos, o permanecen si son poco solubles o si no hay agua para movilizarlos. Partículas minerales (sedimentos, cenizas volcánicas) o compuestos orgánicos (residuos de plantas y organismos) pueden adicionarse e integrarse al suelo (Wilding *et al.*, 1983; Malagón, 1998; IGAC, 1995; Buol *et al.*, 2000; Plaster, 2005).

Todos estos eventos, sencillos o complejos, producen la diferenciación de los materiales litológicos y llevan a la formación de los horizontes: son los llamados procesos generales de formación de los suelos (Zapata, 2006; Buol *et al.*, 2000; Malagón, 1998; Wilding *et al.*, 1983).

La génesis del suelo se desarrolla según las condiciones ambientales y de la litosfera. El perfil del suelo es un producto de factores observados por primera vez por Vasily Vasilievich Dokuchaev en 1883 y posteriormente presentado por Jenny en 1941; estos factores constituyen la “ecuación de estado” de los suelos (clima, tiempo, organismos, geomorfología y materiales parentales) (Zinck, 2012) y la variabilidad resulta

CAPÍTULO V

de la interacción de estos factores y su influencia en la formación de los diferentes perfiles de suelos (Zapata, 2006; Buol *et al.*, 1973, 2000; Greenland & Hayes, 1981; Wilding *et al.*, 1983; Zinck, 2012).

De acuerdo con Egli, Mirabella & Sartori (2008) el cambio climático puede tener efectos significativos en el ciclo biogeoquímico mundial al alterar el tipo y la velocidad de los procesos y factores formadores de suelos, la erosión y formación de minerales, o su transformación. Los suelos juegan un papel importante en el ciclo biogeoquímico, incluyendo el intemperismo, el almacenamiento de nutrientes y el carbono. Las rocas formadas por debajo de la superficie terrestre son inestables al quedar expuestas en superficie. El suelo es una fase de transición que va a cambiar a los estados químicos más estables, incluyendo además el proceso de alteración de minerales y la transformación de las fases minerales que son más estables en la superficie de la tierra.

La formación o transformación de minerales, depende de la reactividad de los minerales, el agua y reactivos ácidos. La litología del material parental determina la naturaleza física y mineralógica de los suelos y por tanto, la reactividad del intemperismo. La acidez y la disponibilidad de elementos promueven las reacciones de disolución de minerales primarios y regulan su transformación en minerales secundarios. En gran medida, la lixiviación es controlada por la temperatura, la precipitación, la escorrentía y las tasas de erosión. La vegetación influye en las reacciones de desgaste a través de la producción de la acidez del suelo y de materiales orgánicos (Egli *et al.*, 2008).

3.2 SUELOS POLIGENÉTICOS

Los suelos *poligenéticos* son suelos que se han formado en ambientes totalmente diferentes a los actuales (IUSS, 2022), generando en ellos más de un origen y evolución, asociados con cambios climáticos ocurridos durante el *Pleistoceno* y *Holoceno*, no coincidiendo con su origen y evolución actuales, por tanto nos develan la realidad del cambio climático y a medida que avance el levantamiento o estudio de los suelos a mayor resolución, será más evidente su presencia, esto tiene un significado muy importante

CAPÍTULO V

porque nos da luces de periodos más lluviosos o más secos y nos proporciona mejores argumentos técnicos para el uso y manejo actual de los suelos.

Para lograr lo anterior se requiere información cada vez más especializada y precisa que unida a otras herramientas técnico científicas ayudaran a mejorar su conocimiento y aplicabilidad, es así que el examen de las secciones delgadas que se hace con el microscopio de luz polarizada o también conocido como petrográfico, puede ser considerado como una extensión de los estudios morfológicos de campo, el nivel de resolución se incrementa del examen de campo al examen con el microscópico óptico y finalmente, a las técnicas submicroscópicas (Microscopía electrónica). Los resultados de los estudios micromorfológicos son más útiles cuando se relacionan con la geomorfología del área de estudio, la descripción morfológica de los perfiles modales y los resultados de los análisis de suelos.

La micromorfología se utiliza para identificar los tipos y las secuencias de los procesos activos que ocurren o han ocurrido en los suelos *poligenéticos*, como la intensidad de la meteorización y condiciones redoximórficas, que son indicadores relacionados con estos suelos debido a cambios climáticos. Mediante este análisis de secciones delgadas del suelo se observan además muchos detalles que a veces no son visibles por análisis en el campo.

De acuerdo con la IUSS:

El estudio de los paleosoles es una actividad multidisciplinar, que incluye, además de las Ciencias del Suelo, las Ciencias de la Tierra, Ambientales y Humanas. Los temas cubiertos por la Paleopedología abarcan la comprensión de los procesos de formación del suelo, meteorización profunda y formación de regolitos, mapeo de suelos, conservación de suelos, geología cuaternaria, mapeo geológico, neotectónica y pedoarqueología. El método consiste en comparar las propiedades de los paleosuelos y secuencias de paleosuelos fechados con las de los suelos modernos que están relacionados con el clima conocido y otros factores ambientales para interpretar cambios climáticos y ecológicos pasados y, por lo tanto, predecir los cambios del suelo a lo largo del tiempo. El lema de la Comisión es *rerum cognoscere causas* (conocer la causa de las cosas).

CAPÍTULO V

4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área del estudio geológicamente está conformada por rocas sedimentarias de edad Cretácica y Terciaria de la Cordillera Oriental, que descansan sobre un basamento de rocas paleozoicas con bajo grado de metamorfismo (INGEOMINAS, 2001); las características litológicas actuales están asociadas a la evolución geológica de la cordillera, caracterizada por diferentes eventos tectónicos que la levantaron a más de 4.000 msnm, permitiendo el afloramiento de estas rocas que hoy día muestran un intenso fallamiento y plegamiento. Las unidades litoestratigráficas presentes se dividen en dos grupos que comprenden las unidades de roca de origen sedimentario y los depósitos del Cuaternario.

Las rocas del Cretáceo depositadas en un ambiente marino son muy importantes en la zona de estudio ya que presentan una fuerte relación con la morfología del terreno, a través de su plegamiento y fallamiento; estas rocas constituyen la principal fuente de los sedimentos del Terciario y Cuaternario, y del material de partida de la mayoría de los suelos, tanto de aquellos desarrollados in situ como de otros materiales transportados y depositados ya sea por flujos diluviales, o por gravedad o escorrentía.

Los sedimentos del Terciario rellenaron, sin una nítida discordancia, los fondos de los amplios sinclinales determinados por las rocas del Cretáceo. Estos materiales probablemente sepultaron los anticlinales de algunos sectores, pero la erosión del Cuaternario parece haber removido esas cubiertas casi por completo, quedando únicamente unos cuantos homoclinales afectados por múltiples fallas, a menudo inversas y con cabalgamientos (IGAC, 1999). Según INGEOMINAS (2001), el área de estudio está localizada en el bloque situado entre la Falla de Fusagasugá y el Sistema de Fallas de Quininí, el cual estructuralmente corresponde a un gran sinclinorio afectado en su centro por la Falla de Sylvania y limitado al occidente por la Falla de Piedras Blancas, ver mapa geológico Figura 3.

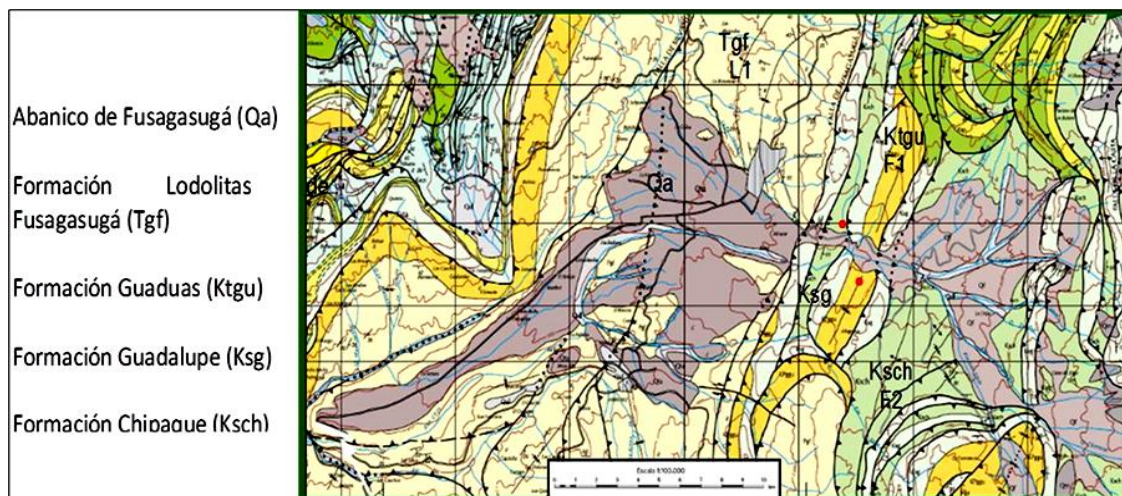
CAPÍTULO V

Los depósitos Cuaternarios hacen referencia a cinco tipos, las terrazas altas, las terrazas aluviales actuales, los depósitos aluviales recientes, los depósitos coluviales y los depósitos de ceniza volcánica (IGAC, 2005).

Terrazas Altas (Qt): Conocidas como la Terraza de Fusagasugá y Terraza de Chinauta, constan de cantos y bloques redondeados de areniscas depositados posiblemente por el río Juan Viejo y transportados desde la región de Pasca, donde los depósitos tienen características de flujos fluvio-glaciares y aluvio torrenciales, su espesor varía hasta alcanzar los 420 m. en el sector de Chinauta y es el principal depósito cuaternario de la zona. De acuerdo con Bürgl (1957), la Terraza de Fusagasugá es del Pleistoceno tardío y en ella fueron encontradas varias partes de esqueleto de *Megatherium spec.*, correspondiente a esta edad (INGEOMINAS, 2001).

Figura 3

Mapa geológico del área de estudio (INGEOMINAS, 2001).



Depósitos coluviales (Qc): Corresponden a los depósitos gravitacionales originados por la fuerte pendiente de las laderas de la montaña y depositados en la base de éstas; son heterométricos y heterogéneos, con bloques angulosos a subangulosos; su origen también está asociado a la actividad tectónica de los sistemas de fallas regionales; se caracterizan por

CAPÍTULO V

su alta inestabilidad que ha ocasionado en el municipio la mayor cantidad de deslizamientos (INGEOMINAS, 2001). Depósitos de ceniza volcánica (Qv): En gran parte del municipio, especialmente hacia el sector oriental, se encuentran depósitos delgados de cenizas volcánicas de espesor variable entre 60 cm y 1.20 m. Estas cenizas proceden de los focos eruptivos del complejo Ruiz-Tolima, en la Cordillera Central; su edad parece estar entre los 30.000 y 9.000 años A.P; no obstante, la actividad del volcán del Ruiz ha continuado durante el Holoceno y el período actual (Van Der Hammen, 1992).

La zona de estudio está caracterizada por la presencia de rocas cretácicas intensamente plegadas cuyos rumbos presentan orientación NNE - SSW a NS, con ligeras deflexiones, donde la erosión de los estratos superiores, activada por numerosas fallas, ha dejado al descubierto las rocas blandas del Cretáceo Inferior. De la sucesión de pliegues se destaca el amplio sinclinal de Fusagasugá cuyo núcleo se encuentra cubierto por sedimentos del Terciario, a su vez fueron recubiertos posteriormente por los materiales oligomícticos del Cuaternario antiguo (IGAC, 2000).

En el Eoceno temprano – medio (55.8 - 40.4 ma) sucedió un evento tectónico compresivo a transgresivo, el cual levantó la región dejándola expuesta a la erosión. Durante el Eoceno medio – Oligoceno (40.4 – 23.0 m. a) ocurrió la depositación de los sedimentos de ríos meandriformes hacia la región de Silvania – Fusagasugá, que se constituyó litoestratigráficamente en las Lodolitas de Fusagasugá (INGEOMINAS, 2001 - IGAC, 2005).

Durante el Pleistoceno Tardío ocurrió la depositación de las terrazas altas conocidas como la “Terraza de Fusagasugá” y la “Terraza de Chinauta”, cuyo origen según diferentes autores es tectónico por los movimientos que afectaron a la región durante las manifestaciones orogénicas del Pleistoceno generando grandes deslizamientos; algunos otros lo asocian a fenómenos de origen glaciárico, como materiales retransportados ladera abajo por las aguas de deshielo; sin embargo, sea cual fuere su origen, se les considera por sus características sedimentológicas como un fenómeno con una dinámica de tipo ultratorrencial (Khobzi & Usselman, 1973).

CAPÍTULO V

Brunnschweiler (1981), considera la posibilidad de que haya habido un descenso hasta unos 3.200 m., de la línea de nieves perpetuas en el páramo de Sumapaz durante la era glacial del Riss/Illinoian, por lo que las geofomas de las cabeceras del río Cuja pueden corresponder a un gran mega circo glaciario, a partir del cual materiales gruesos se desplazaron catastróficamente (Favre, 1988) como un torrente de hielo y detritos (flujodiluvial), similar al de Jungay-Ranrahirca en el Perú o al Volcán Nevado del Huila (2), o más reciente al de Armero (Colombia), pero de una magnitud mucho mayor (IGAC, 2005). Finalmente, los procesos denudativos y agradacionales y la actividad tectónica, volcánica e hídrica de la zona conformaron los actuales depósitos cuaternarios, que a su vez han sidotransformados por la neotectónica actual y también por la actividad antrópica.

Clima actual: Con el fin de identificar el comportamiento climático actual se tomó la información meteorológica del IDEAM, de las estaciones Pasca, Silvania, Fusagasugá, Pandi y Melgar. Para clasificar los pisos térmicos e índice de humedad se siguió la metodología de la clasificación climática ambiental del IGAC (2000) modificada. Para determinar las provincias de humedad se realizaron los balances hídricos climáticos tomando como valor 100 milímetros (mm) como capacidad de almacenamiento promedio para todas las estaciones. Con el fin de establecer el clima del área se utilizaron los valores promedios multianuales de precipitación, temperatura, evapotranspiración e índice de humedad. La distribución de la precipitación se determinó por el método de la interpolación IDW6, generando isoyetas cada 100 mm. La distribución de la temperatura se halló por la regresión lineal $y = -0.00612 X + 29.506$, donde y = temperatura media anual y x = altitud; la evapotranspiración se halló por el método de Holdridge $ETP = 58.93m * T_{bio}$, donde $T_{bio} = (T - 0.3 * \text{Latitud} / 100) * (T - 24) / 6$.

(2) Depósito de avalancha de escombros (DAE) que ocupa el flanco Sur del Complejo Volcánico Nevado del Huila (CVNH) hasta el valle del río Páez, incluye depósitos de flujo de escombros del río Páez que se localiza a lo largo del valle del río Páez (Huila, Colombia). El flanco sur del CVNH colapsó entre hace 46,000 y 200,000 años y formó una avalancha de escombros que viajó 14 km hasta el cauce del río Páez, donde causó el bloqueo del mismo. El depósito de avalancha tiene un espesor promedio de 150 m y cubrió un área de 36 km². (Apartes de la tesis de PULGARIN (2000), sobre el colapso del volcán nevado del Huila en el pleistoceno tardío). Depósitos masivos del pleistoceno tardío asociados al colapso del flanco sur del volcán nevado del Huila (Colombia). Tesis para la obtención del grado de maestro en ciencias (sismología y vulcanología) Ciudad de México, junio del 2000.

CAPÍTULO V

(IGAC, 2009). La información recopilada se muestra en el cuadro 1 de la zonificación climática.

Cuadro 1

Parámetros climáticos para la zonificación climática del abanico de Fusagasuga (IGAC, 2009).

Municipio - Estaciones	Altitud msnm	N	E	T°C	P(mm)	ETP (mm)	Deficit (mm)	Exceso (mm)	ETP7P	Clasificación
Pasca	2256	968777,2	975679,5	15,8	868,8	729,7	0	139	0,84	Frío húmedo
Silvania	1470	977995,7	966432,2	20,5	1240	931,1	0	308,9	0,75	Templado húmedo
Fusagasugá	1728	972465,8	968280,1	18,9	1348	844,5	0	503,5	0,63	Templado húmedo
Pandi	950	955884,0	955320,6	23,7	1197,4	1205	90,8	83,7	1,01	Templado seco

La distribución de las lluvias en el área de estudio se debe primordialmente a los efectos orográficos, de tal manera que las precipitaciones son más altas hacia el oriente, debido a que las masas nubosas que cruzan la Cordillera Oriental chocan con los vientos ascendentes del valle del Río Magdalena, mientras que en la parte occidental, pese a que los vientos del valle desplazan las masas nubosas ladera arriba ocasionan precipitaciones más bajas (IGAC, 2009).

El régimen de lluvias es bimodal (3) con dos periodos de lluvias y sequía bien definidos; los meses más lluviosos se presentan en la primera época del año (marzo, abril, mayo, junio) y en el segundo semestre (octubre, noviembre y diciembre), siendo noviembre el mes más lluvioso; el periodo de verano corresponde a los meses de enero, febrero, julio, agosto y septiembre, con agosto como el mes más seco (IGAC, 2009). En términos generales en el área del estudio, la precipitación promedio multianual es de 1.356.8 mm., la precipitación máxima es de 1.804.5 mm; la mínima precipitación es de 947.2 mm. Entre los 1.000 y 2000 msnm se encuentra el clima templado húmedo, con algunas variaciones locales en cuanto al régimen de humedad, debido a que en esta zona soplan vientos secos que ocasionan una alta

(3) [<http://www.ideam.gov.co/> Página oficial del IDEAM] Categoría: Clima de Colombia.

CAPÍTULO V

evaporación. Por las características del relieve y de acuerdo con el IGAC (2009) se han determinado tres pisos térmicos, así:

-Templado – altura 1.000 – 2.000 msnm, Tº 18 a 24°C corresponde al 65% del área.

-Frío – altura 2.001 – 3.000 msnm, Tº 12 a 18°C corresponde al 28% del área.

-Muy frío – 3.001 – 3.600 msnm, Tº 8 a 12°C corresponde al 0,4% del área.

La clasificación climática resulta de integrar la propuesta metodológica de Caldas (Eslava, J. López, V. Olaya, G., 1986) contempla la variación altitudinal de la temperatura y la relación resultante de dividir la evaporación potencial (ETP) por la precipitación (P); este índice le confiere el carácter húmedo a la propuesta de clasificación.

A partir de la anterior propuesta metodológica y tomando como base el índice (ETP/P), que reporta un valor adimensional, se realizó la zonificación climática, empleando el método geo-estadístico Krigging (IGAC, 2005). Las siguientes unidades consignadas en el cuadro 2 hacen parte de la zonificación climática del abanico, pero no se cuenta con datos suficientes para realizar los balances hídricos climáticos debido a que no existe una estación cercana que arroje datos mensuales en estas zonas; por tanto, sólo se muestra la información disponible.

Cuadro 2

Unidades climáticas de los pisos Muy Frío muy húmedo y Frío muy húmedo de la parte alta del abanico de Fusazgasuga (IGAC, 2009).

Unidad Climática Localizada principalmente en el nor- oriente del abanico	Altitud msnm	Temperatura media multianual (T)	Evapotranspiración potencial multianual (ETP) mm	Precipitación promedio multianual (P) mm
Muy Frío Muy Húmedo (mf – MH)	>3600	10°C - 12°C	Fluctuante 600 - 420	1320 - 1540
Frío Muy Húmedo (f – MH)	2000 - 3000	14°C - 15°C	Fluctuante 1030 - 800	1340 - 1440

A partir de los datos climáticos suministrados por el IDEAM se determinó el índice climático (ETP/P), de la clasificación ambiental propuesta por el IGAC (2000); este valor

CAPÍTULO V

adimensional se integró con los pisos térmicos y se obtuvieron las siguientes zonas climáticas consignadas en el cuadro 3.

Cuadro 3

Unidades climáticas de los pisos Frío húmedo, Templado húmedo y Templado seco del abanico de Fusagasuga (IGAC, 2009).

Unidad Climática	Altitud msnm	Temperatura media multianual (T)	Evapotranspiración potencial multianual (ETP) mm	Precipitación promedio multianual (P) mm	Observaciones
<p>Frío Húmedo (f - H) Localizada principalmente en el nor-orientado del abanico, en el área de influencia de la estación de Pasca</p>	2000 - 3000	14°C - 18°C	Fluctuante 1030 - 800	1100 - 1840	Presenta dos períodos de lluvias comprendidos entre los meses de marzo a mayo y octubre a noviembre. Esta unidad climática presenta excesos hídricos durante todo el año, alcanzando valores de 867.9 mm anuales; no se reportan déficit hídricos. La época de lluvia se presenta en todos los meses del año
<p>Templado Húmedo (t - H) Localizada principalmente en el centro del abanico, las estaciones representativas son Silvania y Fusagasugá</p>	1000 - 2000	18°C - 21°C.	Fluctuante 1240 - 1040	1240 - 1840	Presenta dos períodos lluviosos; el primero en los meses de marzo a mayo, y el segundo entre los meses de octubre y noviembre. Los excesos hídricos se manifiestan en épocas lluviosas, alcanzando valores de 504.4 mm anuales, no presenta déficit hídrico.
<p>Templado Seco (t - S) Localizada en el centro del abanico, en el área de influencia de la estación de Pandí</p>	1000 - 2000	22°C - 23°C	Fluctuante 1410 - 1250	1080 - 1300 mm	Presenta dos períodos de lluvias, el primero en los meses de marzo, abril y mayo y el segundo de octubre a noviembre. El déficit hídrico, alcanza valores de 90.8 mm anuales y se presenta principalmente en los meses de agosto y septiembre. El exceso hídrico alcanza valores de 83.7 mm anuales y se manifiesta principalmente en las épocas de lluvias. Un déficit de humedad se presenta en los meses de julio y agosto, mientras que los meses restantes corresponden a la época húmeda

CAPÍTULO V

4 METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo a lo largo de un transecto EW y con base en las diferencias geomorfológicas, en los pisos climáticos y en los materiales parentales, se identificó la variedad de suelos y su distribución en el paisaje. Las descripciones de los suelos se realizaron de acuerdo con las directrices del Soil Survey Staff (IGAC, 1995).

Se tomaron siete perfiles de suelos desarrollados en diferentes paisajes y pisos altitudinales de acuerdo con la secuencia geomorfoclimática mostrada en la Figura 4, dos perfiles en páramo y subparamo, un perfil en clima frío, dos en clima medio y dos en clima cálido. De cada horizonte se recolectaron muestras para realizar los análisis químicos físicos y mineralógicos, en total fueron 28 muestras y 22 muestras no alteradas para los estudios micromorfológicos.

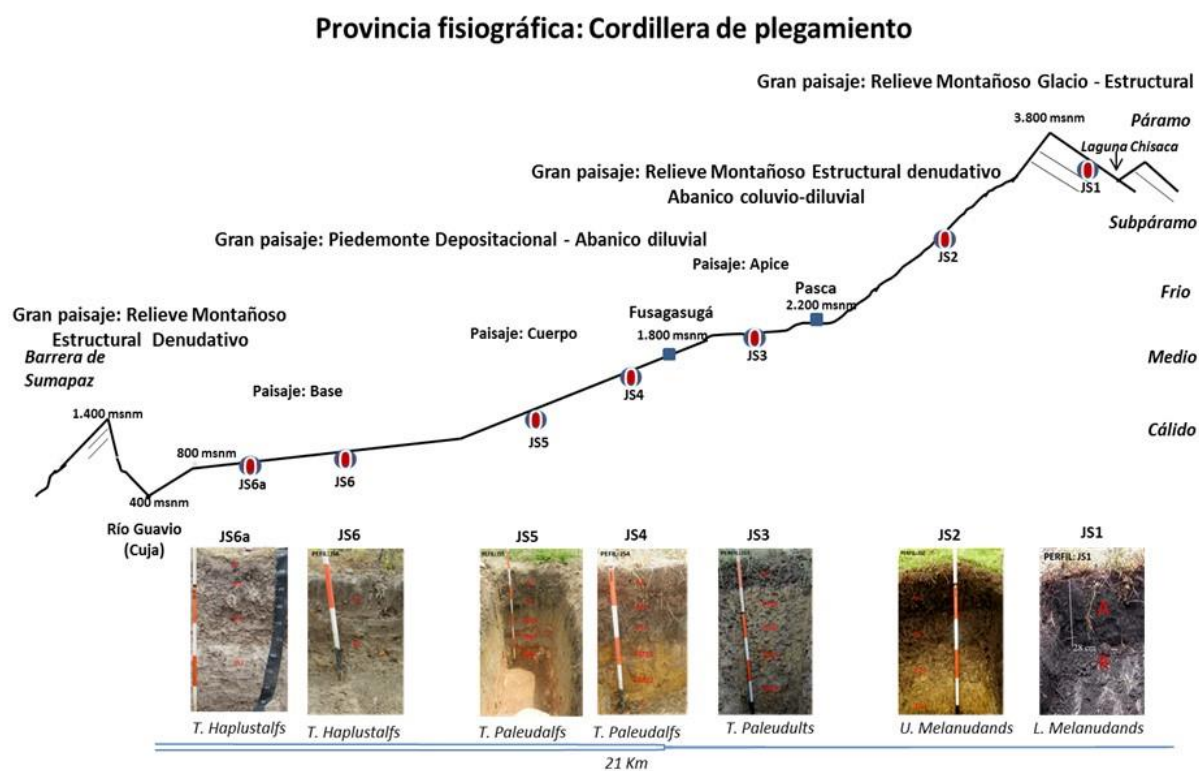
En el páramo de Sumapaz del municipio de Usme en el sector los Tunjos y laguna de Chisaca, se describió el perfil denominado JS1 a una altitud de 3940 msnm y correspondiente al relieve montañoso estructural-glaciario-denudativo; en el municipio de Pasca en la vereda Juan Viejo y a una altitud de 3280 msnm, en el abanico coluvio-diluvial muy inclinado se describió el perfil JS2.

El perfil JS3 se ubica en el municipio de Pasca, vereda Alto del Molino, a 2140 msnm, en el ápice del abanico diluvial parte media. En el municipio de Fusagasugá, vereda Novilleros y a una altitud de 1660 msnm, en el cuerpo del abanico diluvial se escribieron los perfiles JS4 y JS5 y en el sitio del peaje de Chinauta a una altitud de 1100 msnm, en la base del abanico se ubicaron los perfiles JS6 y JS6a.

CAPÍTULO V

Figura 4

Secuencia Geomorfo-Climática del Área de Estudio (Sánchez Espinosa, J. 2017).



En las muestras de suelos correspondientes a la fracción de suelo fino (<2 mm), se determinó: la distribución del tamaño de partículas mediante los métodos de la pipeta y Bouyoucos utilizando como dispersante el hexametáfosfato de sodio; pH por el método potenciométrico en relación suelo: agua 1:1, 1:2, 1:3 y pasta de saturación; carbono orgánico por analizador elemental; la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases extractables mediante Acetato de amonio 1N pH 7,0; cuantificación de las bases por espectrofotometría de absorción y emisión atómica; acidez, aluminio e hidrógeno

CAPÍTULO V

intercambiables por extracción con KCl 1N; acidez extractable con cloruro de bario y trietanolamina pH: 8.2; fósforo disponible por Bray – II modificado; aluminio, hierro y silicio activos por extracción con oxalato ácido de amonio a pH 3, pirofosfato de sodio 0.1M a pH 10 y ditionito citrato bicarbonato y cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica; índice melánico por el método colorimétrico; retención fosfórica por el método de fijación de fosfato y cuantificación colorimétrica con solución de vanadato de amonio – molibdato de amonio – ácido nítrico; densidad aparente por el método del terrón parafinado y densidad real de las partículas con el pentapicnómetro, retención de agua por el método de extractor de presión con platos de cerámica y/o membrana de celulosa para tensiones entre -33 y 1.500 kPa, micro, macro y porosidad total fueron calculadas a partir de la densidad aparente, densidad real y retención de agua a saturación y a -33 kPa (IGAC,2006).

Para el estudio mineralógico se emplearon las técnicas de microscopia óptica y difracción de rayos-X, a fin de establecer la composición mineral de las arenas y las arcillas, respectivamente y determinar cuál es la especie o especies más características de cada suelo (IGAC, 2006).

Para la descripción micromorfológica se utilizan los conceptos y términos técnicos descritos en los manuales especializados de análisis micromorfológico: *Handbook for soil thin section description* de Bullock, Fedoroff, Jongerius, Stoops & Tursina (1985); *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections* de Stoops (2003); *Soil survey laboratory methods manual* de USDA (2011); *Kellogg soil survey laboratory methods manual* de USDA (2014), y para la elaboración de la sección delgada se utilizó la cortadora y desbastadora *Petro-Thin*, dotada de un disco de corte de borde continuo diamantado y copa diamantada con aglomerante sintético, ver Métodos analíticos del laboratorio de Suelos del IGAC (2006).

CAPÍTULO V

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos representados por el perfil **JS1** y clasificados como **Lithic Melanudands** se localizan en la ladera estructural del relieve Montañoso Estructural-Glaciárico-Denudativo, en pendiente inclinada (7-12%); el clima es muy frío muy húmedo y corresponde al páramo, presenta excesos hídricos durante todo el año y no se reporta déficit de humedad, el suelo es uniformemente oscuro o negro, tiene la apariencia de un perfil A-R, donde el horizonte A se caracteriza por una fuerte acumulación de amorfos orgánicos y minerales y presenta fuerte humificación. La textura al tacto es franco limoso y dado la dificultad que tienen estos suelos de dispersarlos eficientemente en el laboratorio, hace que el análisis granulométrico no sea fácil de realizar, por lo que la prueba al tacto o también conocida como *método organoléptico* de campo es fundamental para determinar con una mejor certeza su clase textural. En relación con la profundidad del horizonte este puede variar entre 28, 36 y 41 cm de espesor por lo que para su clasificación se tomó un valor promedio.

Los materiales amorfos, inorgánicos y orgánicos generan en estos suelos propiedades químicas exclusivas, como alta capacidad de cambio catiónico y aniónico (dependiente del pH del medio), alto poder buffer en función del alto valor de las cargas dependientes del pH; alta retención de fósforo; aluminio y hierro activos altos, escaso contenido de bases y, por tanto baja saturación de éstas, cuantificadas con la capacidad de cambio catiónico valorada a pH 7.0. El grado de acidez es fuertemente ácido.

En cuanto a las propiedades físicas, la densidad aparente es inferior a 0.8 Mg/m³, porosidad muy elevada y estructura característica de ensamblaje de microagregados estables que generan bloques subangulares medios a finos de consistencia tixotrópica, es decir, pegajosa y untuosa al tacto en estado húmedo y pulverulento en seco. La capacidad de retención de agua es muy alta, tanto a capacidad de campo como en el punto de marchitamiento.

CAPÍTULO V

Los suelos descritos en el perfil modal **JS2 Ultic Melanudands**, se localizan en el abanico coluvio-diluvial muy inclinado, de pendiente 7 y 12%; el clima es muy frío húmedo y corresponde al subpáramo, también llamado páramo bajo y no presenta déficit de humedad; el perfil del suelo es un Andisol en el que se destaca el color negro de los horizontes Ap y el transicional AB y de color pardo amarillento a marrón pálido los horizontes subyacentes horizontes B de alteración (2Btg), resaltando que los horizontes B no presentan propiedades ándicas, el subíndice 2 en estos horizontes, señala la presencia de capas contrastantes diferentes con un cambio sustancial en la distribución del tamaño de partículas lo cual indicaría diferencias en el material de origen (Soil Survey Staff. 2010). Entre las propiedades químicas es notoria la alta capacidad de cambio catiónico; alta retención fosfórica para los dos primeros horizontes, así como los valores del aluminio y el hierro activos, contrastando con valores muy bajos para los horizontes B, escaso contenido de bases y baja saturación en todo el perfil; el pH corresponde a fuertemente ácido, tanto en los horizontes superficiales como en los horizontes profundos.

En cuanto a las propiedades físicas, la densidad aparente contrasta entre los horizontes superficiales y los subsuperficiales, el primer horizonte es inferior a 0.8 Mg/m³, y en los subyacentes es mayor de 1 Mg/m³; la porosidad es alta en los horizontes superficiales y disminuye en los horizontes subyacentes presentándose allí un aumento en la microporosidad. El ensamblaje de los microagregados estables genera estructuras en bloques subangulares moderados a fuertes en los horizontes A y AB con una variante en el horizonte AB que tiene subestructura granular fina; en los horizontes B la estructura es de bloques angulares moderados a fuertes. La capacidad de retención de agua es alta, tanto a capacidad de campo como en el punto de marchitamiento, en los primeros horizontes, y baja en los horizontes subyacentes (2.2). En estos suelos los horizontes B presentan un croma de 2 o menos con marcas *Redox*.

El perfil **JS3 Typic Paleudults** representa los suelos del ápice del abanico diluvial con pendiente inclinada del 12%; el clima es frío húmedo a muy húmedo, presenta

CAPÍTULO V

excesos hídricos durante todo el año y no reporta déficit de humedad. El perfil es de color café oscuro en el horizonte Ap, con variación en los horizontes subyacentes, de color café grisáceo en un 60% y moteados café amarillento en un 40% en los horizontes 2Btg1 y 2Btg2, café amarillento en un 60% y moteados de color gris en un 40% en los horizontes 2Btg3 y 2Btg4. La morfología del perfil muestra la secuencia Ap-2Btg1-2Btg2-2Btg3-2Btg4. En el anexo 1 se observa el perfil del suelo, en este caso un Ultisol; se destacan entre sus propiedades químicas la alta capacidad de cambio catiónico, el aluminio y hierro activos muy bajos en todos los horizontes, bajos contenidos de bases y baja saturación en todo el perfil; el grado de acidez es muy fuerte (pH: 4.5-4.6), con una saturación de aluminio que varía entre 74 y 87% en todo el perfil, excepto en el horizonte Ap donde se presentan altos contenidos de Ca, Mg, K, bases totales, saturación de bases, fósforo disponible y pH alto, ya que en el momento de su descripción se encontraba recién fertilizado y encalado. La presencia de cutanes de arcilla en los horizontes Bt de los suelos define el horizonte argílico. En los suelos JS2 y JS3 el volumen de argilanes es relativamente pequeño (<1%), lo cual puede sugerir de acuerdo con Faivre (1988) que los cutanes de arcilla formados en el pasado están siendo destruidos por el entorno de la meteorización actual y por una intensa pedoturbación faunística y vegetal (Soil Survey Staff, 2011; Buol et al, 2000).

En cuanto a las propiedades físicas, la densidad aparente en todos los horizontes es mayor de 1 Mg/m³; la porosidad disminuye a menos del 50% presentándose un aumento en la microporosidad en todos los horizontes; la estructura dominante es en bloques angulares moderados a fuertes. La capacidad de retención de agua es baja tanto a capacidad de campo como en el punto de marchitez permanente. En estos suelos el horizonte B presenta un croma de 2 o menos, con evidentes marcas redox, situación ya evidenciada por Villota (1980) y Faivre (1988).

Los suelos representados por los perfiles, **JS4 Typic Paleudalfs**, **JS5 Typic Paleudalfs**, **JS6 Typic Haplustalfs** y **JS6a Typic Haplustalfs**, se localizan en el abanico diluvial, en el cuerpo y la base del mismo, en pendiente plana del 1%; en los suelos JS4 y

CAPÍTULO V

JS5 el clima es templado subhúmedo no reportando déficit hídrico, y templado seco para los suelos JS6 y JS6a, en estos el déficit hídrico alcanza valores de 90.8 mm anuales y se presenta principalmente en los meses de agosto y septiembre. Los horizontes A presentan colores que oscilan entre pardo oscuro, café, pardo, pardo grisáceo muy oscuro, gris oscuro, pardo oscuro y negro, la morfología del perfil tiene la siguiente secuencia: Perfil JS4: Ap-AB-2Btg1-2Btg2-2Btg3; Perfil JS5: Ap-2Btg1-2Btg2-2Btv-2Btg-2Cv; Perfil JS6: Ap-Bt y Perfil JS6a: Ap-AB-Bt1-Bt2-Bt3-Bt4. Presentan baja capacidad de intercambio catiónico con algunas excepciones en los horizontes Bt1, Bt2 y Bt4 del suelo JS6a, el aluminio y hierro activos son bajos, altos contenidos de bases y alta saturación; el pH varía de neutro a básico. Se presentan en su morfología actual cutanes de arcilla delgados en los horizontes Bt.

En cuanto a las propiedades físicas, la densidad aparente en todos los suelos es mayor de 1 Mg/m³, la porosidad disminuye en todos los suelos a valores por debajo del 50% presentándose un aumento en la microporosidad; la estructura en los horizontes A oscila entre bloques subangulares moderados, medianos y finos, bloques subangulares muy finos y medianos, débilmente desarrollados, bloques angulares moderados a fuertes, gruesos, medianos, bloques angulares moderados, medianos y finos y bloques subangulares muy finos, débilmente desarrollados. La capacidad de retención de agua es baja a muy baja, tanto a capacidad de campo como en el punto de marchitez permanente. En estos suelos la mayoría de los horizontes tienen cromas de 2 o menos, que en micromorfología se denominan edaforrasgos redox, las características redoximórficas en las últimas décadas se han denominado con varios nombres los cuales incluyen: moteados rojizos, moteados grises, manchas de gleyzación, concreciones de hierro, nódulos de hierro, plintita, gley (Lindbo et al, 2010) y están definidas como características asociadas con la humedad en el suelo que resultan de la reducción y oxidación del hierro (Fe).

CAPÍTULO V

Discusión Génesis y evolución de los suelos

La génesis y evolución de los suelos está basada en los procesos de andolización, iluviación e hidromorfismo, definidos a partir del estudio morfológico de los suelos y apoyados por los análisis físicos, químicos, mineralógicos y micromorfológicos, permitiendo establecer las relaciones entre factores y procesos formadores de los suelos y así entender la realidad pedogenética en términos de relaciones suelo-paisaje.

Por otra parte, la dinámica de este sistema está relacionada con el movimiento del agua en el suelo, dependiendo de la alternancia de las condiciones climáticas contrastantes de periodos de alta precipitación y de periodos secos.

En la génesis de los suelos que no tienen carbonato de calcio, el clima y el material parental han sido los factores determinantes; el primero, por las condiciones de poca humedad y alta temperatura que generan un impacto leve en el proceso de alteración y transformación de las sustancias inorgánicas y el segundo, por la reducida cantidad de minerales de fácil alteración presentes en los materiales parentales.

La formación del abanico, teniendo en cuenta el significado mismo de “diluvial”, está relacionado con alta torrencialidad, producto de sucesivos flujos de materiales sobre los cuales se depositaron capas más delgadas de aluviones y ceniza volcánica.

De acuerdo con Khobzi & Usselman (1973), el abanico no presenta características únicas de un depósito fluvioglaciario, pero una fuente menor de sedimentos debe atribuirse a materiales retransportados por las aguas producto del deshielo de las partes altas. Sobre estos materiales posteriormente se depositaron capas más delgadas de aluviones y unos mantos de ceniza volcánica provenientes del complejo Ruiz-Tolima de la cordillera Central, los cuales probablemente cayeron entre 30.000 y 9.000 años A.P., (Van der Hammen; Van Geel 1974) y quizás continuaron hasta el siglo XVI de nuestra era, cuando tuvo lugar una de las últimas erupciones importantes del volcán del Ruiz (Van der Hammen; Van Geel 1974).

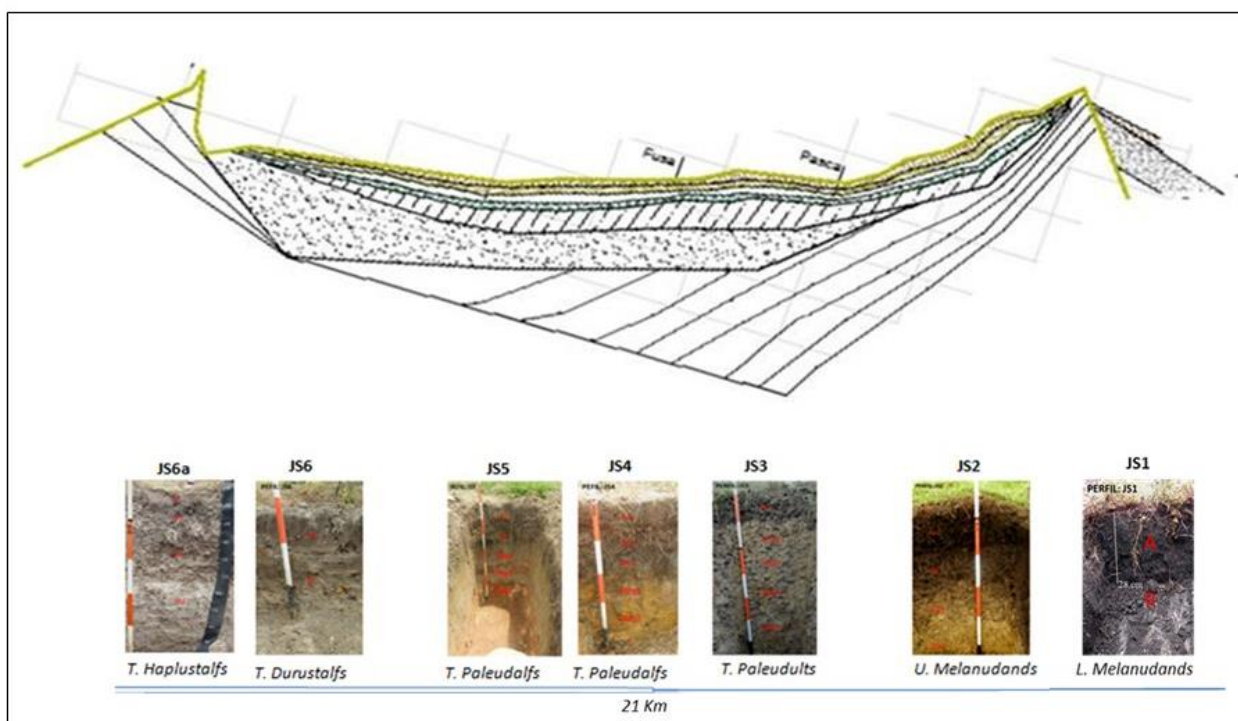
En principio estos sedimentos colmataron y formaron una gran cubeta sometida a procesos sucesivos bajo condiciones de alternancia de periodos húmedos y secos,

CAPÍTULO V

evidenciados en la actualidad por la presencia de condiciones redoximórficas en los suelos características asociadas a periodos de fuerte hidromorfismo (Figura 5).

Figura 5

Sucesivos flujos de materiales sedimentarios rellenando y conformando una gran cubeta de sedimentación (Sánchez-Espinosa, J. 2017).



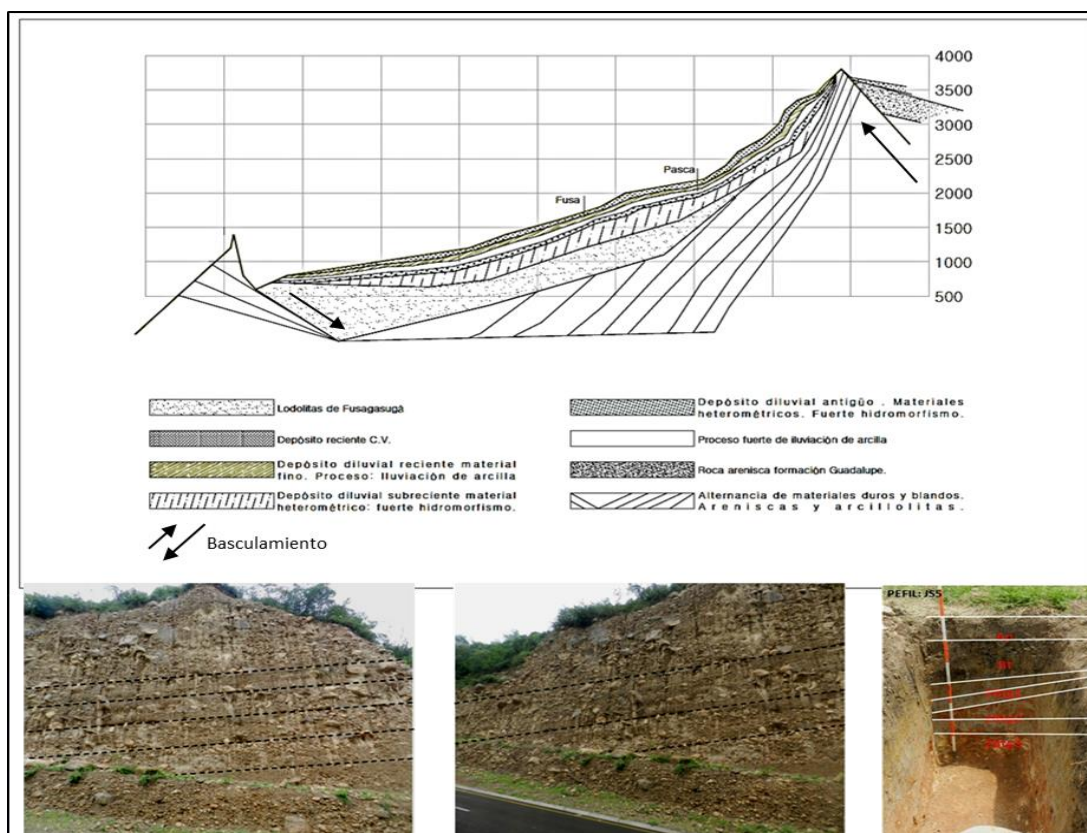
La formación de los suelos implica y corrobora dos aspectos importantes: el primero el efecto significativo de los cambios climáticos del Cuaternario (Van der Hammen, 1992) asociado a una geoforma de cubeta, ya que se presentan suelos poligenéticos o policíclicos, y el segundo referido a las grandes influencias climáticas de muy alta precipitación alternando con periodos secos y/o semiáridos. Pero la configuración misma del abanico se debe y de acuerdo con Jungerius (1976) a la remoción por tectonismo y subsecuente depositación de la masa de sedimentos de Pasca y Fusagasugá, lo cual ya había sido señalado por Da Porta (1965) producto del

CAPÍTULO V

basculamiento hacia el oriente y con el borde occidental hundido de las estructuras sedimentarias, como repuesta a la adaptación tectónica (Figura 6).

Figura 6

Modelo evolutivo de la formación del abanico por basculamiento tectónico (Sánchez Espinosa, J. 2017).



Las dataciones realizadas por Guillet, Faivre, Mariotti & khobzi (1988) muestran que estas formaciones comenzaron a depositarse en no menos de 20.000 años, lo cual es consistente con lo observado, señala Faivre (1988), en otras partes de la región en donde este tipo de material se ha acumulado entre 30.000 y 9.000 años AP, probablemente con acarreo masivo de materiales entre 30.000 y 26.000 años, con una sucesión de otras

CAPÍTULO V

deposiciones posteriores que van hasta alrededor de 10.000 años AP, época en la cual los depósitos se han secado completamente (Faivre, 1988).

Las características redoximórficas están definidas como características asociadas con la humedad e hidromorfismo en el suelo que resultan de la reducción y oxidación del hierro (Fe) después de procesos de saturación y desaturación. Los colores rojo, marrón y amarillo en las secciones delgadas se deben a recubrimientos de óxidos de Fe, los colores púrpura oscuro y colores negros se deben a óxidos de Mn y los colores negros opacos son debido a la materia orgánica. Más específicamente en nicoles paralelos, la goethita y lepidocrocita son de color amarillo, la hematita es de color rojo y los óxidos de Mn son de color negro (Lindbo et al, 2010).

Estas condiciones redoximórficas relacionadas con la marcada evidencia de hidromorfismo en los suelos, fue evidenciado por Villota (1980) y consignado tal como fue mencionado en la descripción de su perfil P18 y corroborado y reportado por Faivre (1988) en el valle glaci-fluvial de Guasca Cundinamarca, donde morfológicamente describe la presencia en los horizontes inferiores, de concreciones de gibbsita y manchas de reducción, incluso dice que *“la reducción en el horizonte de naturaleza arcillosa es tal que toma un aspecto de plintita”* (Faivre, 1988), lo que indica claramente que en ciertas etapas de formación los procesos pedogenéticos se produjeron en condiciones medioambientales diferentes a las que prevalecen en la actualidad, en alternancia con fases climáticas más húmedas y más secas (Faivre, 1988), lo que se evidencia es que este fue un proceso generalizado que abarco toda la región andina de nuestro país.

Por último y para una mayor claridad de la génesis de los suelos del abanico de Fusagasugá, se sigue la secuencia paso por paso del desarrollo de la investigación para llegar a la consideración final sobre la evolución de los suelos:

Lo primero a tener en cuenta es el cómo se formó el abanico. Khobzi & Usselman (1973) y Villota (1980) indican que los materiales fueron transportados y sedimentados producto de la actividad glaciárica desde el páramo. Brunnschweiler (1981) considera la posibilidad de que hubo un descenso hasta unos 3.200 msnm de la línea de nieves

CAPÍTULO V

perpetuas en el páramo de Sumapaz durante la era glacial del Riss/Illinoian, por lo que las geoformas de las cabeceras del río Cuja pueden corresponder a una gran mega circo glaciárico. De acuerdo con Faivre (1988) fueron los materiales gruesos que se desplazaron catastróficamente como un torrente de hielo y detritos (flujo diluvial). Pero Da Porta (1965) anotaba que se debió a la adaptación tectónica, formado por un conjunto de bloques fallados y basculados hacia el oriente y con el borde occidental hundido, coincidiendo con Jungerius (1976) que al estudiar las mismas unidades sostuvo que era evidente la remoción por tectonismo y subsecuente depositación de la masa de escombros de Pasca y Fusagasugá.

Geomorfológicamente dominan las formas de agradación correspondientes a extensos depósitos diluviales situados a diferente altitud y a todo lo largo del río Cuja-Sumapaz, rellorando los sinclinales de Pasca y Fusagasugá, los cuales se presentan interconectados entre sí a través de aperturas producidas por el fuerte fallamiento sobre los monoclinales de arenisca del Cretáceo. Los materiales corresponden a una mezcla de detritos mal seleccionados que incluyen grandes bloques y cantos de arenisca angulosa y subredondeada, gravas y suelo formando un talud con un desnivel de 420 metros en la base del abanico.

Morfológicamente los suelos presentan cutanes de arcilla en los horizontes Bt; la presencia de películas y recubrimientos de arcilla en los poros y en las paredes de los canales de las raíces y de los pedos es la evidencia del proceso de iluviación de arcilla, en estos suelos la mayoría de los horizontes tienen cromas de 2 y menores constatando condiciones de hidromorfismo, lo cual debe corresponder a regímenes acuicos, pero que por las características topográficas actuales no lo favorecerían.

La textura muestra que todos los suelos estudiados presentan incremento en el contenido de arcilla. Pero el alto valor de la arcilla con sólo pequeñas cantidades de limo fino, limo medio y arena muy fina, indica que estos materiales se depositaron en condiciones ambientales diferentes a las actuales, probablemente condiciones muy marcadas de periodos secos y periodos de alta pluviosidad o en condiciones de alta saturación de humedad relacionadas con cuerpos de aguas tranquilas o se dieron las dos

CAPÍTULO V

situaciones simultáneamente. Estos resultados se relacionan con la “actividad” de la fracción arcilla en términos de la superficie disponible para retener el agua a una presión de 1500 kilo Pascales, también conocida como el índice de meteorización de Comerma (Comerma, J. 1968) (valores menores de 0,3 los suelos son muy evolucionados y muy degradados, valores entre 0,3 y 0,4 son moderadamente evolucionados y menos degradados), lo que refleja condiciones edafoclimáticas diferentes a las actuales.

Micromorfológicamente los modelos de los rasgos redoximórficos corresponden al estágnico predominantemente en horizontes más superiores y gléyico en horizontes inferiores, confirmando el encharcamiento desde los horizontes inferiores por una capa freática a escala regional.

Revestimientos de caolinita como moteados, debido a puntuaciones orgánicas de tamaño limo, coexisten con revestimientos microlaminados en algunos casos en el mismo horizonte, dos generaciones/orígenes de revestimientos. A partir de capas orgánicas lacustres y a partir de arcilla iluviada desde horizontes superiores, señalando el posible origen pantanoso. Gravitas lateríticas y fragmentos de areniscas ferruginizadas, por desmantelamiento del material originario durante el movimiento de masa y fábricas de birrefringencia estriadas en horizontes caoliníticos, pueden corresponder a revestimientos muy antiguos y a depósitos lacustres/pantanosos más arcillosos afectados por edafoturbación. Se ratifica que en principio fue una gran cubeta o cuenca de sedimentación, afectada por condiciones de alta saturación de posible origen pantanoso con materiales de características de flujo diluvial que posteriormente y debido al basculamiento tectónico que afectó la región durante las manifestaciones orogénicas del *Pleistoceno* configuraron el relieve actual.

7. CONCLUSIONES

Los principales factores que han influido en la intensidad de los procesos de andolización, iluviación de arcilla y condiciones redoximórficas son: (1) el tiempo para la formación del suelo (con horizonte argílico en los maduros), (2) el rejuvenecimiento (los

CAPÍTULO V

suelos JS2 por la ceniza volcánica y el suelo JS3 formado en condiciones diferentes a las actuales) y más importante (3) la condición de drenaje.

Condiciones paleoambientales contrastan con las condiciones actuales de buen drenaje en los suelos, debido a la inclinación de la pendiente. El abanico se formó en el Pleistoceno y hace 10.000 años AP se consolidó totalmente.

Procesos dominantes la iluviación y la oxidación-reducción evidenciado por la presencia de edaforrasgos redox (condiciones redoximórficas), debe haber sido en alternancia con la iluviación de arcilla, proceso fuertemente favorecido por las estaciones secas y húmedas bien marcadas.

El abanico de Fusagasugá fue una gran cubeta sedimentaria, compuesta por materiales depositados transportados y retransportados desde la parte alta de la región de Pasca con características de un flujo diluvial con claro sorteamiento, posteriormente movimientos tectónicos afectaron la región durante las manifestaciones orogénicas del *Pleistoceno* y configuraron el relieve actual, el cual fue disectado por los ríos “*Panches y Cuja*” y otros cauces, conformando el cuerpo principal del plano diluvial con un espesor de 180 m y en su base de 420 m., el cual fue afectado por periodos contrastantes secos y húmedos y basculado por eventos tectónicos entre 30.000 años AP y consolidado finalmente hace 10.000 años AP. Por lo tanto, el abanico de Fusagasugá corresponde a una planicie de cuenca sedimentaria basculada por tectonismo, pero con características geomorfológicas de un abanico diluvial.

La mineralogía de las arenas está relacionada con la composición original de los piroclastos y en ella reviste especial importancia el vidrio volcánico; los minerales ferromagnesianos, los feldespatos y el cuarzo se presentan variando en cantidades relativas de acuerdo con la naturaleza mineralógica del material volcánico en los suelos localizados en la ladera estructural del relieve Montañoso Estructural-Glaciárico-Denudativo y en el abanico coluvio-diluvial muy inclinado. El cuarzo domina la fracción arenosa en los suelos que se localizan en el abanico diluvial, en el cuerpo y la base del mismo, el cual se presenta en forma subredondeada y subangular.



CAPÍTULO V

La caolinita es el mineral arcilloso dominante en la mayoría de los suelos estudiados, excepto en el perfil JS1. De acuerdo con lo anterior, para la formación de caolinita, se requiere unas condiciones climáticas donde la precipitación exceda la evaporación y un material basal que tenga minerales susceptibles a la acción hidrolítica, como lo son los feldespatos que en este caso están presentes en la fracción arenosa. Es imprescindible también un adecuado drenaje del medio para que almacene y percole eficientemente el agua de la precipitación para que se generen las reacciones químicas y se produzca la pérdida de elementos solubles y relativamente solubles y por último es necesario un tiempo suficiente para la cristalización final de la caolinita. Bajo esta circunstancia, el componente mineral de las arcillas, se ha formado bajo ambientes edafológicos muy diferentes a las del suelo actual que evolucionó a partir de estos materiales, lo que dificulta, muchas veces, explicar la síntesis de las arcillas porque no se encuentra correspondencia entre los minerales arcillosos presentes en el suelo con el ambiente pedoquímico actual del mismo.

El estudio micromorfológico aporta pruebas concluyentes acerca de los modelos de rasgos redoximórficos principalmente estágnico predominantemente en horizontes más superiores y gléyico en horizontes inferiores (excepto en perfil JS5 con horizonte arcilloso en la base, que puede ser responsable de una capa freática colgada), confirman el encharcamiento desde los horizontes inferiores por una capa freática a escala regional, lo cual ha sido evidenciado por los rasgos micromorfológicos que expresan condiciones redoximórficas en los suelos.

Revestimientos de caolinita en moteados coexisten con revestimientos microlaminados en algunos casos en el mismo horizonte, dos generaciones u orígenes de revestimientos. A partir de capas orgánicas lacustres y a partir de arcilla iluviada desde horizontes superiores, señalando el posible origen pantanoso.

Gravas lateríticas y fragmentos de areniscas ferruginizadas, por desmantelamiento del material originario durante el movimiento en masa y fábricas de birrefringencia estriadas en horizontes caoliníticos, pueden corresponder a revestimientos muy antiguos.

CAPÍTULO V

REFERENCIAS

- Brunnschweiler, D. (1981). *Glacial and periglacial form systems of the Colombian Quaternary*. Rev.CIAF, 6(1-3): 53-56.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G. y Tursina, J. (1985). *Handbook for soil thin section description*. Waine Research Publications, England. 152 p.
- Buol, S.W., Hole, F.D. y Mccracken, R.J. (1973). *Soil Genesis and Classification*. The Iowa State University Press. First edition.
- Buol, S.W., Hole, F.D. y Mccracken, R.J. (2000). *Génesis y Clasificación de Suelos*. Editorial Trillas. Tercera reimpresión. México. 417 p.
- Bürgl, H. (1957). *Bioestratigrafía de la Sabana de Bogotá y sus alrededores*. Bol. Geo.Serv. Geo. Col. 5(2):113-185.
- Comerma, J.A. (1968). *Characteristics and genesis of two soil associations in North-Central Venezuela*. Unpublished PhD Thesis, Department of soils science, North Carolina State University at Raleigh. University Inc., Ann Arbor, Mich.
- Da Porta, J. (1965). *Estratigrafía del Cretáceo Superior y el Terciario en el extremo sur del valle medio del río Magdalena*. En: Boletín de Geología No. 19. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Egli, M., Mirabella, A. y Sartori, G. (2008). *The role of climate and vegetation in weathering and clay mineral formation in late Quaternary soils of the Swiss and Italian Alps*. Geoderma 102(3-4): 307-324.
- Eslava, J., López, V., Olaya, G. (1986). *Contribución al conocimiento del régimen térmico y pluviométrico de Colombia*. En: Colombia Geográfica volumen 12 W2.118 p. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Santa fe de Bogotá.
- Faivre, P. (1988). *Lessivage et planosolisation dans les sequences de sols caracteristiques des milieux intransparents de Colombie (Amérique du sud)*. These de Docteur es Sciences Université de Nancy, Francia.
- Greenland, D.J. Hayes, M.H.B. (1981). *The Chemistry of Soil Processes*. A Wiley-

CAPÍTULO V

- interscience Publication. John Wiley Sons Ltd.
- Goosen, Doeko (1968). Interpretación de fotografías aéreas y su importancia en levantamientos de suelos. Roma: FAO.
- Guillet, B., Faivre, P., Mariotti, A. y Khobzi, J. (1988). *The 14C dates and 13/12C ratios of soil organic matter as a means of studying the post vegetation in intertropical regions: examples from Colombia (South America)*. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 65(1-2):51-58.
- Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear. (INGEOMINAS, 2001). *Memoria explicativa plancha 246 Fusagasugá*. Bogotá D.C. Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC, 1995). *Suelos de Colombia*. Bogotá, Colombia. 5 -219.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC, 1999). *Caracterización geomorfo-pedológica del flanco oeste de la cordillera oriental de los andes colombianos. Sector Páramo de Sumapaz - Valle del Magdalena Departamentos de Cundinamarca y Tolima*. Subdirección de Agrología. Bogotá, Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC, 2000). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca*. Subdirección de Agrología. Bogotá D.C. Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC, 2005). *Geomorfología Aplicada a Levantamientos Edafológicos y Zonificación Física de Tierras*. Bogotá D.C. Colombia. 184 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC, 2006). *Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos*. Subdirección de Agrología, Bogotá, Colombia. pp. 487-538.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC, 2009). *Estudio semidetallado de suelos, Municipio de Fusagasugá*. Subdirección de Agrología. Bogotá D.C. Colombia.
- International Union of Soil Sciences (IUSS, 2022). Division 1 – Soils in Space and Time. COMMISSION 1.6 – Paleopedology. Current IUSS-Division and Commission Officers

CAPÍTULO V

(period 2018-2022).

- Jungerius, P.D. (1976). *Quaternary landscape development of the Rio Magdalena basin between Neiva and the quaternary of Colombia*. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 19(2): 89-137.
- Khobzi, J. y Usselman, P. (1973). *Problemes de géomorphologie en Colombie*. *Revue de Geographie Physique et de Geologie Dynamique* 15(1-2): 193–206.
- Lindbo, D.L, Stolt, M.H., Vepraskas, M.J. (2010). *Redoximorphic Features*. In: *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regolihs*. Georges Stoops, Vera Marcelino and Florias Mees (Eds) Elsevier.
- Malagón, D. (1998). *El recurso suelo en Colombia -Inventario y Problemática-*. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 22(82): 13-52.
- Plaster, E. J. (2005). *La Ciencia del Suelo y su Manejo*. Primera Edición. Thomson Editores Spain. Madrid, España. P.151-163.
- Pulgarin, B, A. (2000). *Depósitos masivos del pleistoceno tardío asociados al colapso del flanco sur del volcán nevado del Huila (Colombia)*. Tesis Maestría en Ciencias (sismología y vulcanología), Universidad Autónoma de México. Ciudad de México.
- Sánchez-Espinosa, J.A. (2017). *Mineralogía y génesis de los suelos desarrollados sobre materiales no consolidados en el abanico diluvial de Fusagasugá Colombia*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. Colombia.
- Soil Survey Staff. (2003). *Keys to Soil Taxonomy*. 9th. Ed. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington. 332 p.
- Soil Survey Staff. (2011). *Soil Survey Laboratory Information Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 45, Version 2.0. R. Burt (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. p.89.
- Soil Survey Staff. (2014). *Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. p.186 y 518.

CAPÍTULO V

- Stoops, G. (2003). *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections*. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.
- Van Der Hammen, T. y Van Geel, B. (1974). *Upper quaternary vegetational and climatic sequence of the Fuquene area (Eastern cordillera, Colombia)*. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 14:9-912.
- Van Der Hammen, T. (1992). *Historia, Ecología y Vegetación*. Fondo FEN Colombia, Corporación Colombiana para la Amazonia – Araracuara- Fondo de Promoción de la Cultura. Bogotá, D.C.
- Villota, H. (1980). *Una Metodología para el Análisis Fisiográfico en las Zonas Montañosas del Trópico aplicada al Levantamiento General de Suelos del sector Pasca-Girardot, Cundinamarca, Colombia*. International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences – ITC (Tesis Magister). Enschede, Holanda.
- Wilding L.P., Smeck, N.E. y Hall, G.F. (1983). *Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions*. *Developments in Soil Science* 11 Part A. Preface.
- Zapata, R. (2006). *Química de los procesos pedogenéticos*. Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Zlnc, A. (2012). *Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. ITC Special Lecture Notes Series. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, the Netherlands.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS FISIAGRÁFICO Y ZONIFICACIÓN DE TIERRAS BASES PARA LA PLANEACIÓN DEL USO DEL TERRITORIO. CUENCA DEL RÍO USUMACINTA MÉXICO

**ANÁLISIS FISIAGRÁFICO Y ZONIFICACIÓN DE TIERRAS BASES PARA LA PLANEACIÓN
DEL USO DEL TERRITORIO. CUENCA DEL RÍO USUMACINTA MÉXICO**

**PHYSIOGRAPHIC ANALYSIS AND LAND ZONING BASES FOR LAND USE PLANNING.
USUMACINTA WATERSHED, MÉXICO**

**ANÁLISE FISIAGRÁFICA E ZONEAMENTO DE TERRAS BÁSICAS PARA PLANEJAMENTO
DO USO DA TERRA. BACIA DO RIO USUMACINTA MÉXICO**

Aristides Saavedra Guerrero¹ y Daniel M. López López²

**¹⁻²Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, Ciudad de
México, México.**

Notas de autor

Aristides Saavedra Guerrero. Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, Agrólogo. Técnico Científico Titular "C". <https://orcid.org/0000-0003-1476-7678> asaavedra@centrogeo.edu.mx. Proyecto CONACYT- FORDECyT 273646.

Daniel M. López López. Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, Magister of Science. Técnico Científico Titular "C" <https://orcid.org/0000-0001-7672-7335> dlopez@centrogeo.edu.mx. Proyecto CONACYT - FORDECyT 273646.

CAPÍTULO VI

Resumen: Este trabajo tiene como objetivo el estudio integral del paisaje, desde la perspectiva biofísica, de la cuenca del río Usumacinta en México. Para su ejecución se usó la relación suelo-paisaje y el análisis fisiográfico como modelo integrador del paisaje, mediante el que se analizan e integran los diversos componentes del paisaje. El análisis de la información se hizo mediante técnicas de análisis y modelado espacial. El resultado final son unidades fisiográficas correspondientes a los niveles de análisis, de acuerdo con la metodología mencionada, que en este estudio se incluye hasta grandes paisajes; los resultados se validaron con observaciones de campo. También se realizó una zonificación por aptitud de las tierras mediante el método de clasificación por capacidad de uso USDA (1965) adaptado por IGAC (2001) y los autores (Saavedra & López, 2019). Los resultados se muestran en mapas en los que se identifican las provincias fisiográficas, unidades morfológicas, zonas climáticas y grandes paisajes; en la clasificación por aptitud de las tierras el mapa final muestra las clases y subclases de aptitud.

Palabras clave: Fisiografía; Aptitud de las tierras; Suelos; Análisis del paisaje.

Abstract: The objective of this work is the comprehensive study of the landscape, from biophysical perspective, of the Usumacinta river Watershed in Mexico. For its execution, the soil-landscape relationship, and the physiographic analysis, as an integral model of the landscape was used; through which the different components of the landscape are analyzed and integrated. The information analysis was done through spatial analysis modeling techniques. The final result are physiographic units corresponding to different levels of analysis according to the aforementioned methodology, which, in this study, large landscapes are included; the results were validated with field observations. Land suitability zoning was also performed using the USDA (1965) use capacity classification method adapted by IGAC (2001) and the authors (Saavedra & López, 2019) the results are shown on maps where the physiographic provinces, morphogenetic, climatic units and large landscapes are identified; in the land suitability classification the final map shows the suitability classes and subclasses.

Keywords: Physiography; Land suitability; Soils; Landscape analysis.

Resumo: Resumo: O objetivo deste trabalho é o estudo abrangente da paisagem, do ponto de vista biofísico, da bacia de Usumacinta no México. Para a sua execução, utilizou-se a relação solo-paisagem e a análise fisiográfica como modelo **integrador** da paisagem, através do qual são analisados e integrados os diferentes componentes da paisagem. A análise da informação foi feita por meio de análises espaciais e técnicas de modelagem. O resultado final são unidades fisiográficas correspondentes a diferentes níveis de análise de acordo com a metodologia mencionada, que mesmo grandes paisagens estão incluídas

CAPÍTULO VI

neste estudo; os resultados foram validados com observações de campo. O zoneamento de aptidão da terra também foi realizado usando o método de classificação de capacidade de uso do USDA (1965) adaptado pelo IGAC (2001) e os autores (Saavedra & López, 2019). Os resultados são apresentados em mapas onde são identificadas as províncias fisiográficas, unidades morfogenéticas e climáticas e grandes paisagens; na classificação de aptidão do solo, o mapa final mostra as classes e subclasses de aptidão.

Palavras-chave: Fisiografia; adaptação à terra; Solos; Análise da paisagem.

1. INTRODUCCIÓN

Para el conocimiento y análisis del territorio, la caracterización y el estudio del subsistema físico biótico (componentes del paisaje) implica, desarrollar, adaptar y aplicar propuestas metodológicas, en este caso, se propone la metodología del análisis y la clasificación fisiográfica, que integrado a los conceptos de relación suelo-paisaje (geopedología) facilitan el análisis integral de paisaje, así como la delimitación de unidades fisiográficas a diferentes escalas espaciales, en la cuenca del río Usumacinta México. En este sentido se necesita del conocimiento de diferentes disciplinas especializadas en el estudio de los aspectos sistémicos del paisaje, que incluyan sistemas de clasificación con una visión de conjunto e interdisciplinaria. El resultado del análisis y clasificación fisiográfica es un insumo básico para la zonificación de la aptitud de las tierras, el ordenamiento, la planeación del uso y el diseño de políticas públicas en el marco del desarrollo sustentable, en el territorio objeto de estudio.

Mediante el conocimiento y análisis integral de las inter-relaciones y dependencias que existen entre los componentes naturales del paisaje, mediante el análisis fisiográfico y la zonificación por aptitud de las tierras, es factible razonar, entender y explicar la interacción que existe entre naturaleza y la sociedad, de tal manera que se opte por un uso adecuado y racional de los recursos naturales, en particular del recurso suelo. De esta manera, el enfoque y estudio de la relación suelo-paisaje, el cual está inmerso en el análisis fisiográfico, tiene como objetivo la integración de suelos y geofomas, es decir las relaciones entre geomorfología y pedología (geopedología) para la delimitación de las unidades de paisaje en las que, además, se

CAPÍTULO VI

consideran y analizan las relaciones con los demás componentes físicos y biológicos. Esto facilita conocer, complementar e implementar, con base científica, la ordenación y planeación del uso en el territorio con énfasis en la aptitud de las tierras (conforme a sus limitaciones y cualidades) y la conservación de los recursos naturales (biodiversidad), promoviendo así el uso, manejo y la conservación más conveniente de las tierras.

El texto se estructura en cinco secciones, la primera corresponde a la introducción del tema, en la segunda se describen los aspectos conceptuales y metodológicos contemplados para el estudio integral del paisaje, que incluyen conceptos de fisiografía, geomorfología, geopedología y aptitud de las tierras. En la tercera se presenta una descripción general del área de estudio, que compone la cuenca del río Usumacinta en México. En la cuarta parte se presentan los resultados y su análisis, que incluyen las unidades fisiográficas y las clases y subclases de aptitud de las tierras. Con respecto a las unidades fisiográficas, se definieron y delimitaron en su orden jerárquico: Geoestructuras, Provincias fisiográficas, Unidades climáticas y Grandes Paisajes; siendo este último nivel el considerado en este estudio.

El análisis y la clasificación fisiográfica es una aproximación conceptual y metodológica robusta que facilita estudiar y analizar los componentes del medio natural (clima, geología, geomorfología-relieve, los suelos y la cobertura vegetal) desde una perspectiva integral. La metodología de zonificación por aptitud de las tierras es un método sencillo, que se adaptó a las condiciones de información de suelos, en este caso la carta edafológica y su respectiva base de datos. Los resultados de esta metodología, las clases y subclases de aptitud, conforman unidades de tierra relativamente homogéneas, desde el punto de vista de sus cualidades y limitantes para la producción de alimentos y/o conservación de la vegetación natural, que se espera sirvan de apoyo a la ordenación y planeación del uso sustentable del territorio. Finalmente, en la quinta parte se presentan algunas conclusiones y recomendaciones sobre el análisis integral del paisaje y la zonificación por aptitud de las tierras.

El artículo que aquí se presenta, es producto del trabajo de investigación destinado al conocimiento del medio natural a través del análisis y la clasificación fisiográfica de la región

CAPÍTULO VI

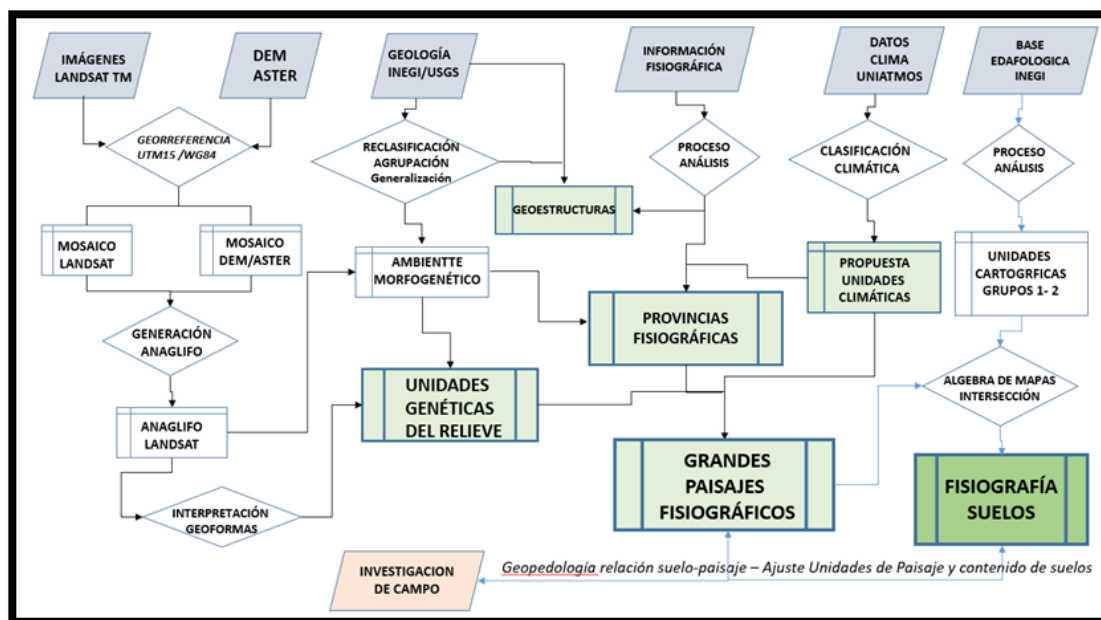
sur del país, como componente básico para la zonificación y planeación del territorio y, en particular, en la cuenca del río Usumacinta en México, que han desarrollado los autores desde hace una década a través del Gobierno federal, por medio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en convenio entre el Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECYT), el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C. (CENTROGEO) y el Centro de Cambio Global y la Sustentabilidad (CCGS). También se incorpora la experiencia y el conocimiento adquirido en diversos proyectos de vinculación a nivel regional y estatal con la Secretarías de Energía, Recursos Naturales y Protección Ambiental (SERNAPAM) del Gobierno de Tabasco, de Medio Ambiente e Historia Natural del Gobierno de Chiapas y, a nivel federal, con la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

2. ASPECTOS CONCEPTUALES Y METODOLÓGICOS

En la Figura 1 se presenta un esquema general de la metodológica utilizada en el estudio. A continuación, se hace una breve descripción de los conceptos y métodos utilizados.

Figura 1

Esquema Metodológico General.



CAPÍTULO VI

2.1 El análisis y la clasificación fisiográfica, una aproximación conceptual y metodológica para el estudio integral del paisaje

A partir de la revolución industrial las actividades humanas tienen un gran auge y, producto de ello, los sistemas naturales han evolucionado y se han transformado a tal punto que hoy prevalece sobre la mayor parte del territorio es lo que se denomina el paisaje cultural, el que corresponde al paisaje natural con diferentes grados de intervención o antropización. Este tipo de paisaje es la expresión explícita de la acción del hombre como factor formador y transformador de este.

Para el estudio y análisis del paisaje con estas características, se propone como marco general el modelo de Paisaje socio-ecológico, entendido este como una entidad compleja con una organización jerárquica, y dos grandes sistemas: el sistema natural que comprende los recursos naturales y ecosistemas, y el sistema humano o la sociedad conformada por los usuarios y las instituciones (Saavedra & López, 2019).

El análisis integral del paisaje es una condición fundamental para lograr un manejo adecuado y sustentable particularmente del recurso suelo y en general de los recursos naturales, lo que viabiliza preservar su funcionalidad y los servicios ecosistémicos que provee, esenciales estos últimos para el bienestar de la sociedad, particularmente de la población establecida en el territorio (Saavedra & López, 2019a).

La geología, la geomorfología (el relieve), el clima, la hidrografía, junto con la flora-fauna y los suelos conforman el sistema natural; estos elementos, vistos desde la perspectiva de la génesis del paisaje constituyen sus factores formadores. Dada la interdependencia e interrelación entre los diferentes componentes del sistema natural, el manejo integral es una necesidad para resguardar y optimizar sus funciones y servicios ecosistémicos, servicios esenciales que constituyen la base del funcionamiento del sistema natural y de la sociedad.

El análisis y la clasificación fisiográfica, una aproximación conceptual y metodológica, se propone aquí para estudiar y analizar el medio natural desde una perspectiva integral. El objetivo de este apartado es presentar los aspectos conceptuales

CAPÍTULO VI

y metodológicos de este enfoque, que asociado a elementos de la relación suelo-paisaje, los autores lo consideran como un marco robusto mediante el que se hace una formalización espacial explícita de los factores formadores del paisaje, para conformar, así, unidades fisiográficas. Se complementa el capítulo con algunos elementos conceptuales de la zonificación por aptitud de las tierras.

2.1.1. Conceptos de geomorfología y fisiografía

La geomorfología es la ciencia encargada del estudio descriptivo y explicativo de las formas del relieve; conocer su génesis, su historia y su dinámica es el objeto de la morfogénesis (Geissert, 1987). Por lo tanto, esta ciencia tiene como fundamento y propósito la descripción de las formas del relieve, su origen y evolución en el tiempo, la definición y naturaleza de los materiales que componen las geoformas y la clasificación de los paisajes en base a su morfología, edad, origen y composición. Por su parte, la fisiografía (Villota, 1997), no solo describe los aspectos concernientes a la litosfera (relieve, edad de los materiales y las formaciones superficiales), como lo hace la geomorfología, sino también aquellos relativos al clima, el agua, y los seres vivos. El mismo autor plantea que desde un enfoque aplicado, la fisiografía hace referencia a la interacción entre aspectos como el clima, la geología, el origen y la edad de los materiales rocosos, la geomorfología, la hidrografía e indirectamente los aspectos bióticos (incluida la actividad antrópica), en la medida en que estos inciden en el origen, la conservación de los suelos, y en su aptitud, uso y manejo. De esta manera, a partir del análisis y la clasificación fisiográfica, se integran y relacionan los elementos que constituyen el sistema natural, para posteriormente analizar los demás procesos en los que interviene e interactúa el ser humano sobre el medio natural (Saavedra y Castellanos, 2013). El resultado del análisis y la clasificación fisiográfica es la definición explícita y delimitación de unidades relativamente homogéneas (regionalización biofísica), las que agrupan áreas con características similares, que determinan un relativo grado de precisión y/o generalización, todo esto enmarcado en un sistema jerárquico y anidado, según el nivel de detalle y categoría a la que se requiera

CAPÍTULO VI

estudiar. La clasificación fisiográfica constituye un punto de partida para los diferentes órdenes (nivel de detalle) de levantamientos de suelos, para la delimitación de unidades ecológicas del paisaje, y para proyectos de zonificación física de las tierras en pro de la planificación de las áreas rurales, bien sean cuencas hidrográficas o territorios adscritos a una entidad administrativa, corporaciones regionales o municipales (Serrato, 2009).

2.1.2 La geopedología relación suelo-paisaje base para la cartografía de suelos y el análisis fisiográfico

El objeto de estudio en común entre la geomorfología y la edafología es la zona que corresponde a la superficie de contacto entre la atmósfera, la litósfera y la biósfera; donde, ninguna de las dos dispone de un campo propio, es decir, comparten el estudio del medio natural con otras disciplinas de las ciencias de la tierra y de la naturaleza (Geissert, 1987).

El análisis morfoedafológico, es un método desarrollado para integrar los aspectos del relieve con los suelos, este posibilita un conocimiento global del paisaje (Kilian, 1974, citado por (Geissert y Rossignol, 1987). Los mapas morfoedafológicos son documentos síntesis que presentan una visión global del paisaje, analizando al mismo tiempo los diferentes aspectos que lo componen y, por lo tanto, no son la sobreposición de los mapas temáticos, sino una síntesis de los diferentes elementos del medio natural (Geissert y Rossignol, 1987a).

La geopedología se refiere a las relaciones entre geomorfología y pedología, con énfasis en la contribución de la primera sobre la segunda, donde las geoformas o formas de terreno son el objeto de estudio de la geomorfología y los suelos son la entidad de estudio de la pedología, que comprende la pedogénesis (el origen y formación del suelo), la clasificación, taxonomía, morfología y sus interacciones con los demás factores geográficos (Zinck, 2012).

Así que, la geopedología es un enfoque metodológico para y al servicio del inventario de suelos, que a la vez provee un marco para el análisis de los patrones de distribución geográfica de los mismos. De acuerdo con el mismo autor, la geopedología tiene como objetivo la integración de suelos y geoformas y hace énfasis en la geomorfología como factor

CAPÍTULO VI

estructurante mayor del paisaje pedológico. La geomorfología incluye una amplia parte del marco físico de formación de los suelos a través del relieve, la morfodinámica y morfogénesis de la superficie, el aspecto morfoclimático, los depósitos superficiales o alterados que sirven de material parental a los suelos, y el factor tiempo (Zinck, 2012a).

Asimismo, la geopedología es un referente e indicador esencial para los levantamientos de suelos, que al integrar aspectos geomorfológicos y pedológicos conforma las unidades cartográficas de suelos que representan su distribución espacial y relación con el paisaje. Consecuentemente, en el mapeo de la distribución de los suelos, es un requisito entender el fundamento científico de las relaciones suelo-paisaje. De esta manera, las unidades geopedológicas corresponden a la relación suelos-paisaje y son un elemento esencial de aproximación a la unidad de paisaje pedológico, con la premisa donde la geomorfología se utiliza para precisar en parte el paisaje fisiográfico.

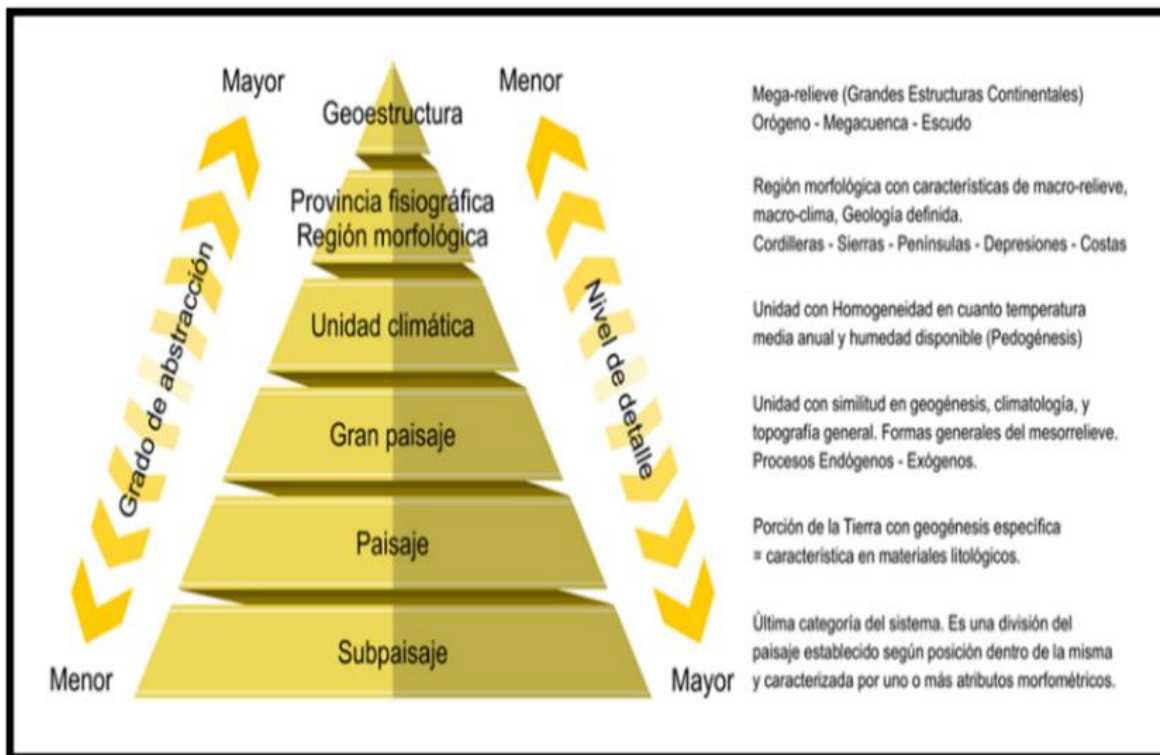
2.1.3 Metodología del análisis y clasificación fisiográfica

La metodología de análisis y clasificación fisiográfica que se menciona a continuación es la desarrollada por el Centro de Investigación y Desarrollo de Información Geográfica (CIAF), y se basa en los criterios y conceptos de fisiografía esbozados inicialmente por su cuerpo de profesores holandeses (Goosen Doeko y Nieuwenhuis Elbersen), y ajustados y complementados posteriormente por los colombianos Botero Pedro y Villota Hugo, de la Unidad de Suelos del CIAF. El sistema de clasificación fisiográfica tiene una estructura piramidal, en cuyo vértice se ubica la categoría denominada Geoestructura (Figura 2), considerada como marco general de la metodología, pero no como una categoría en sí misma y corresponde a los territorios geológicos mayores en un continente (Villota, 1992). Al bajar de categoría en el sistema de clasificación se encuentran las provincias fisiográficas (regiones morfológicas) en cuyo ambiente morfogenético y junto con el clima representan la causa del modelado o desgaste de las geoformas originales hasta su estado actual, siendo estas, factor determinante en la conformación y desarrollo de los grandes paisajes.

CAPÍTULO VI

Figura 2

Sistema de Clasificación Fisiográfica CIAF.



Fuente: Modificada por Saavedra y López, (2019) de Villota, (1997).

2.2 Zonificación por aptitud de las tierras

La zonificación por aptitud de las tierras consiste en delimitar espacios geográficos relativamente homogéneos en función del medio físico y biológico. La utilización de este enfoque como base para la ordenación y regionalización enriquece el conocimiento sobre la distribución de los recursos naturales, su dinámica en el tiempo y la tolerancia del medio a la intervención humana. La zonificación posibilitará evaluar la aptitud productiva del territorio y evaluar los conflictos potenciales entre aptitud y uso actual de la tierra. En este sentido, para este estudio, la zonificación en unidades de tierras constituirá el sustento físico natural para la definición y aplicación de programas de ordenamiento y manejo

CAPÍTULO VI

dentro de las unidades de gestión territorial y ambiental, que en este caso están referidas a las clases y subclases de aptitud.

La clasificación de las tierras por su capacidad de uso contempla un análisis de los diferentes elementos y características del medio físico y el comportamiento de cada unidad de tierra según sus características y de acuerdo con los distintos limitantes que intervienen en el uso y manejo adecuado de las tierras.

En este estudio se usó el método de clasificación por capacidad de uso de la tierra desarrollado por el servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos, USDA, 1965, adaptado (IGAC, 2002), y adaptaciones realizadas por los autores de acuerdo con la información y las condiciones propias de cada país. Este sistema de clasificación agrupa los suelos en tres categorías: clase, subclase y grupo de manejo.

Las clases agrupan suelos con similar grado de limitaciones o riesgos que puedan afectar los suelos y cultivos; son ocho y se designan con números romanos del I al VIII. Las limitaciones de uso son progresivamente mayores de la clase I a la clase VIII; así la clase I reúne todas las características y condiciones de la tierra óptima para cualquier explotación agrícola, con altos rendimientos en las cosechas y el menor riesgo de deterioro de las tierras y la clase VIII que contrasta totalmente con las que la anteceden, ya que agrupa tierras con limitaciones extremadamente severas, que no son aptas para cultivos y solamente deben ser utilizadas para la conservación de la vegetación natural, vida silvestre, investigación, recreación y conservación de los recursos naturales.

Las subclases son divisiones de las clases y agrupan tierras que tienen igual número y grados similares de limitaciones y riesgos en su uso y manejo. Estas se designan añadiendo una letra minúscula a continuación de la clase y se pueden presentar solas o en combinación. Las subclases son cinco: (p) pendiente, (e) erosión, (h) humedad (s) suelos (fertilidad, profundidad efectiva) y (c) clima; se designan añadiendo una letra minúscula a continuación de la clase y se pueden presentar solas o en combinación.

CAPÍTULO VI

2.3. Bases de datos cartográficas procesamiento y análisis

2.3.1 Análisis fisiográfico

Las bases de datos cartográficos esenciales para el análisis y clasificación fisiográfica realizada en este estudio incluyen información básica sobre recursos naturales como la fisiografía, geología, geomorfología-relieve, clima, hidrografía, y cobertura y uso del suelo. Como información climática y bioclimática se utilizó la disponible en el “Atlas Climático Digital de México (ACDM)”, desarrollado por la Unidad de Informática del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNIATMOS), que está basada en las mediciones puntuales de diversas fuentes, principalmente del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua de México, así como en información de bases climáticas del National Climatic Data Center (NCDC) las que fueron interpoladas con métodos objetivos por Hijmans et al (2005) considerando los efectos topográficos (para esto se usó la base de datos de la misión “Shuttle Radar Topography Mission”-SRTM).

Dicha información incluye mapas digitales en formato raster con valores (mm) de precipitación promedio mensual, precipitación máxima y mínima (en mm) y los valores de temperatura media mensual y temperaturas máximas y mínimas (en grados centígrados °C), de la República Mexicana y Centroamérica para el periodo comprendido entre los años 1950 – 2000. La información geológica se obtuvo principalmente del INEGI (escala 1:250.000 y 1:1'000.000) y del Servicio Geológico de Estados Unidos-USGS (escala 1:5'000.000), la que se complementó y unificó a nivel regional, mediante interpretación visual digital y con información de campo adquirida en los recorridos de reconocimiento por el área de estudio.

De acuerdo con los criterios del análisis fisiográfico ya descritos, se implementó el modelo de clasificación fisiográfica para la delimitación y caracterización de las unidades fisiográficas (a nivel de Gran Paisaje).

La historia geológica del área y la configuración general del relieve (a nivel continental), fueron los elementos fundamentales para definir y delimitar las

CAPÍTULO VI

Geoestructuras, que son el marco general del análisis fisiográfico. Con base en la información geológica, geomorfológica, fisiográfica y analizando la extensión y magnitud de las unidades se definieron y delimitaron las provincias fisiográficas. Para la delimitación de las unidades genéticas del relieve, se conformó para el área un mosaico de las imágenes de satélite (LANDSAT-TM) y junto con el modelo digital de elevación (MDE) se elaboraron anáglifos¹, en los que, mediante interpretación visual en pantalla y utilizando la visión en alto relieve, se delimitaron las unidades geomorfológicas (unidades genéticas del relieve) con base en los rasgos geomorfológicos e información geológica. Por último, mediante álgebra de mapas se hace una integración de los elementos: provincias fisiográficas, unidades climáticas y unidades genéticas del relieve, para así construir un mapa de Grandes Paisajes.

2.3.2 Zonificación por capacidad de uso de las tierras

Las unidades por aptitud de uso se definieron mediante el Sistema de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso o Sistema Americano de las 8 Clases agrológicas desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos – USDA, 1965, adaptado (IGAC, 2002); el que se adecuó para el presente estudio de acuerdo con la información edafológica existente (conjunto de datos vectorial Edafológico escala 1:250 000 Serie II, 2008 del INEGI); donde la clasificación de los suelos está referida al sistema de clasificación FAO (Base de Referencia para los Suelos del Mundo. FAO/UNESCO, 1998). La zonificación por aptitud se basa en el análisis de diferentes elementos y características de los suelos y el paisaje, como son condición de drenaje, fertilidad, textura, profundidad efectiva, condiciones de salinidad y/o sodicidad, complementados con el tipo de

¹ El anáglifo es un mosaico de imágenes que provee una visión en alto relieve, útil para la interpretación geomorfológica; se obtuvo mediante el procesamiento digital de imágenes a través del algoritmo “Anaglyph Generation - Terrain” el cual genera una superposición de la imagen de satélite sobre el Modelo de Elevación Digital; se usó el programa ERDAS IMAGINE, versión 2010. (Saavedra y Castellanos, 2013).

CAPÍTULO VI

pendiente (susceptibilidad a la erosión) y la susceptibilidad a inundaciones y encharcamientos.

En la elaboración y escogencia de los criterios utilizados para conformar los factores se eligieron los dos primeros suelos dominantes (Grupos 1 y 2), teniendo en cuenta en el análisis las características principales y secundarias de dichos suelos referidas en la base de datos. Con base en los criterios y rangos que definen los limitantes para cada clase y subclase de aptitud se definieron los rangos para calificar cada factor limitante, y se estructuraron mediante consultas (en lenguaje SQL) a la base de datos los respectivos mapas de cada factor limitante. La pendiente del terreno se calculó a partir de un modelo digital de elevaciones, con resolución espacial de 15 metros. Finalmente, mediante un modelo de decisión se combinan los factores limitantes, obteniendo finalmente el mapa de clases y subclases por aptitud de las tierras. El modelo de decisión se implementó a través de un algoritmo condicional utilizando el programa ERDAS Imagine, versión 10.0. Inicialmente se conformaron consociaciones y asociaciones simples de suelos y posteriormente asociaciones complejas de acuerdo con el grado y similitud de limitación entre las unidades cartográficas de suelos conformadas. El mapa final se generalizó mediante la aplicación de un filtro de 24 hectáreas².

3. ÁREA DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO USUMACINTA EN MÉXICO

Durante las últimas décadas, ha ido en aumento la presión antrópica ejercida sobre los ecosistemas naturales y los terrenos dedicados a actividades productivas en la cuenca del Usumacinta, provocando intensos cambios y efectos ambientales negativos, sobre los recursos suelo, agua, flora y fauna. Bajo estas características y circunstancias se vienen dando diferentes tipos de conflictos y alteración en el medio, como son la expansión y propagación de la población, acompañados de problemas socio-económicos y

² Dado que el mapa de pendientes tenía una resolución espacial mayor que la base de datos de suelos, se generaron unidades muy pequeñas, que se eliminaron con la aplicación del filtro arriba mencionado.

CAPÍTULO VI

tecnológicos no solo para el suministro, la prestación y atención de servicios como el agua potable, salud, educación, etc.; sino también, en la generación de varios impactos, resultado y consecuencia de la interacción entre los asentamientos humanos, sus diversas actividades, el medio ambiente y todo su entorno. Por otra parte, y dadas las particularidades de la región, social y culturalmente se desarrollan y confluyen distintas actividades socio-económicas, que la hacen una importante región de conjunción y concentración de pobladores y comunidades de diferentes regiones, culturas, tradiciones, países, grupos, etnias y religiones (Saavedra y López, 2016).

La cuenca del Usumacinta tiene una superficie de 77,436 km² (Figura 3), donde el 55.8% (43,198.6 km²) se ubican en Guatemala, y el 44.2% (34,237.4 km²) se localiza en México, el área de estudio considerada en esta publicación (Figura 4), una fracción pequeña (31.79 km²), que representa el 0.04% se encuentra en Belice. La cuenca del río Usumacinta en México pertenece a la región hidrológica Grijalva-Usumacinta, la que está conformada por las cuencas de los ríos Grijalva y Usumacinta; comprende la mayor parte de los estados de Chiapas y Tabasco, y en menor proporción, Campeche, Oaxaca y Veracruz. Es considerada como la región más húmeda del país, esta, además hace parte de una de las plataformas continentales carbonatadas más amplias de los mares mexicanos, y de las llanuras costeras de México; contiene uno de los sistemas lagunares, más extensos con áreas de mangle y una de las mayores reservas de aguas dulce; incluye además importantes reservas forestales que albergan una alta diversidad biológica (Saavedra y López, 2016).

El río Usumacinta se considera como el colector principal, es el más largo de Mesoamérica, y el sexto más largo de Latinoamérica. El río Chixoy o Negro, es uno de sus afluentes principales; además del Chixoy, componen el sistema fluvial del Usumacinta otros tres ríos: La Pasión, San Pedro y Lacantún, los dos primeros tienen su área de drenaje en Guatemala, y el último, la mayor área de drenaje en México, sus tributarios principales son los ríos Santo Domingo, Jataté, Tzendales y Lacanjá, todos en territorio mexicano, a excepción del río Santo Domingo, que tiene una pequeña porción en Guatemala.

CAPÍTULO VI

Completan el sistema fluvial del río Usumacinta, en la parte baja de su recorrido dos tributarios, el río Chacamax y el Cháncala.

Figura 3

Cuenca del Río Usumacinta, México.

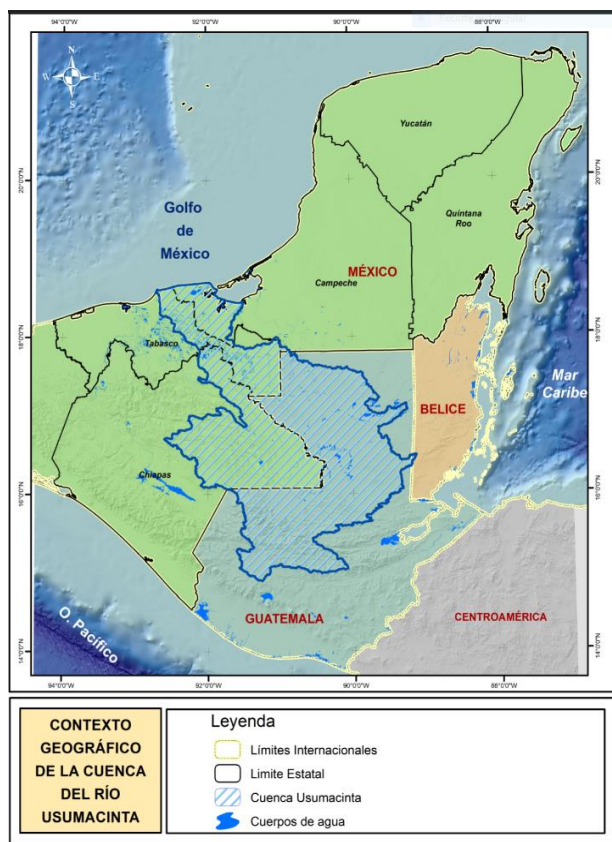
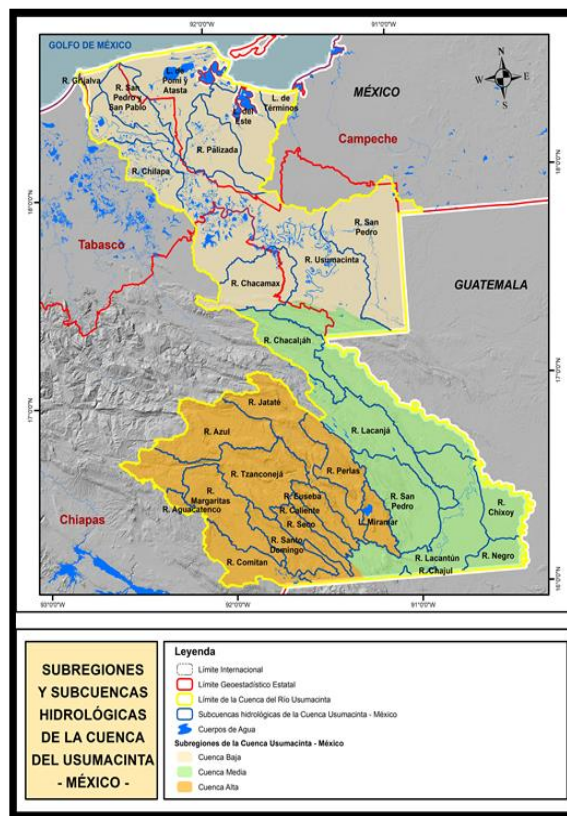


Figura 4

Área de estudio: Cuenca río Usumacinta, México.



Fuente: INEGI (2010).

En la cuenca la precipitación media anual es del orden de 2,068 mm, la media anual mínima es de 875 mm, y la media anual máxima es del orden de 4,343 mm. De acuerdo con la propuesta de clasificación climática elaborada por Saavedra y Castellanos (2013), en la cuenca del Usumacinta se presentan las unidades climáticas que se muestran en la Tabla 1.

CAPÍTULO VI

Tabla 1

Características de las Unidades Climáticas Propuestas para la Cuenca Usumacinta México.

Región Climática	Unidad Climática	Provincia de Humedad	Zona de vida	Atributos del Clima *
Tierras bajas cálidas	Cálido Semi Húmedo	Tropical Subhúmedo	bosque semi húmedo Tropical	PPT 1,000 – 1,500 mm. TmA > 24°C 0 – 500 m.s.n.m.
	Cálido húmedo	Tropical húmedo	bosque húmedo Tropical	PPT 1,500 a 3000 mm. TmA >24°C 0 – 500 m.s.n.m.
	Cálido muy húmedo	Tropical muy húmeda (Perhúmeda)	bosque muy húmedo Tropical	PPT 3,000 a 6,000 mm. TmA >24°C 100 – 1000 m.s.n.m.
Tierras medias templadas	Semi cálido muy húmedo	Templada subtropical muy húmeda (Per húmeda)	bosque muy húmedo Premontano	PPT 2,000 a 4,000 mm. TmA 18 – 24°C 300 – 1,500 m.s.n.m.
	Semi cálido muy húmedo	Templada subtropical húmeda	bosque húmedo Premontano	PPT 1,000 a 2,000 mm. TmA 18 – 24°C 500 – 1,000 m.s.n.m.
Tierras altas templadas	Templado subtropical seco	Templada subtropical seca	Bosque seco Premontano	PPT 500 - 1,000 mm. TmA 12 – 18°C 1,500 – 2,300 m.s.n.m.
	Templado subtropical húmedo	Templada subtropical húmeda	Bosque húmedo Montano Bajo	PPT 1,000 - 2,000 mm. TmA 12 – 18°C 1,500 – 2,300 m.s.n.m
	Templado Subtropical muy húmedo	templada subtropical muy húmeda (Per húmeda)	bosque muy húmedo Montano Bajo	PPT 2,000 a 4,000 mm. TmA 12 – 18°C 1,500 – 2,200 m.s.n.m.

* Los rangos de los parámetros corresponden a una categorización de la propuesta que contienen los valores que presentan las Unidades climáticas (Saavedra, 2013). PPT: Precipitación; TmA: Temperatura media

Anual.

CAPÍTULO VI

Desde el punto de vista geológico la cuenca está circunscrita a tres elementos regionales que constituyen el sureste mexicano y el golfo de México, a saber: a) la Sierra Madre de Chiapas, b) la Plataforma de Yucatán, y c) las cuencas terciarias del sureste, particularmente la cuenca de Macuspana. Como resultado de su evolución geológica, en la cuenca afloran un conjunto de rocas y sedimentos no consolidados con edades que van desde el Mesozoico (Cretácico inferior) hasta el Cuaternario.

La subregión de la cuenca baja está constituida en su mayor parte por sedimentos del Cuaternario (aluviales, fluvio-lacustres (palustres), fluvio-marinos y marinos; otros materiales geológicos importantes en esta parte de la cuenca son las areniscas arcillosas del Plio-pleistoceno y las calizas del Terciario (Mioceno y Paleoceno), y en menor proporción, los conglomerados y areniscas/conglomerados y las areniscas/calizas del Mioceno. En las subregiones de la cuenca media y alta los materiales geológicos que dominan son calizas del Cretácico superior-inferior y del Terciario (Paleoceno), e intercalaciones de lutitas y areniscas (Eoceno) y arenisca-calizas del Terciario. Otros materiales geológicos presentes en esta parte de la cuenca, aunque en extensiones menores son conglomerados del Terciario (Plio-Pleistoceno) y sedimentos aluviales, principalmente asociados con las planicies aluviales de los ríos Lacantún, Chixoy, y la Pasión. En la Tabla 2 se listan las principales características del relieve, en términos de la altitud, la pendiente y formas del relieve, para los sectores bajo, medio y alto de la cuenca.

Tabla 2

Características del Relieve Cuenca Río Usumacinta, México (Saavedra & López, 2019).

Características del relieve	Cuenca baja	Cuenca media	Cuenca alta
Altitud (metros)	0-100 (<50)*	50 – 1,500 (100-+500)	100 – 2,270 (100-+500)
Tipo de relieve	Superficies alomadas planos y plano cóncavos, planicies marina, fluviomarina, fluvio-lacustre y aluvial	Valle alluvial, Lomerios y lomas, Relieve colinado y montañoso	Relieve Montañoso y colinado o lomerío
Pendiente (%)	0- 1- 3; 3-7-;7-12	3-7-12; 12 – 25 y >50	7 – 12; 25 -50; 50-75 y >75

CAPÍTULO VI

*Alturas promedio y dominantes.

La vegetación originaria en la cuenca del río Usumacinta se reduce a tres ecosistemas principales, a saber: vegetación acuática y subacuática (manglares, popal y tular) con una extensión aproximada de 733,626.5 Ha (21.7% del área), bosque de coníferas y encinos (incluye el Bosque Mesófilo de Montaña) con una extensión aproximada 620,764.3 Ha (18.4%) y el Bosque Tropical Perennifolio (selvas), con una extensión aproximada de 2,030,593 Ha (60% del área).

Para el año 2013, las coberturas naturales ocupan una extensión de 1,238,582.1 Ha, y solo representan el 36.2 % del área del cuenca; una parte importante de esta cobertura corresponde a la selva alta perennifolia, cuya conservación ha sido posible gracias a la existencia de una área natural protegida, la Reserva de la Biósfera de Montes Azules; la vegetación secundaria de bosques, selvas y de sabana cubre una extensión de 852,591.2 Ha, que representan el 24.9% y las coberturas antrópicas (tierras agrícolas, pastizales y asentamientos humanos) ya cubren una extensión de 1,331,525 Ha, que representan el 38.3% del área de la cuenca, superando en extensión a las coberturas naturales.

La distribución espacial de los suelos en la cuenca del río Usumacinta está determinada fundamentalmente por dos de los factores formadores, la condición del relieve (y más específicamente la posición fisiográfica) y los materiales parentales. Es así como en la parte baja de la cuenca, es la posición fisiográfica, el factor que explica la presencia de los suelos dominantes (Gleysoles, Vertisoles, Solochaks y Fluvisoles) los que se presentan en los relieves agradacionales (planicie marina, fluvio-marina, fluvio-lacustre y aluvial), mientras que el segundo grupo de suelos en importancia en este sector de la cuenca (Luvisoles, Pheozem, Umbrisoles, Cambisoles y Arenosoles) se localizan en posiciones más estables y en relieves erosionales (areniscas arcillosas) de lomas bajas-medias y superficies alomadas disolucionales de calizas (Leptosoles y Verisoles).

CAPÍTULO VI

De otra parte, en los sectores medio y alto de la cuenca, los materiales parentales y el relieve, son la combinación que explica la distribución de los suelos. En esta parte de la cuenca los suelos dominantes son los Leptosoles, Luvisoles y Pheozems, en el caso de los Leptosoles y Pheozems están asociados principalmente con materiales parentales de calizas y relieves escarpados e inclinados, y en el caso de los Luvisoles se relacionan con relieves más suaves.

Los segundos suelos en importancia en esta parte de la cuenca (Umbrisoles, Vertisoles, y Gleysoles) se localizan en relieves planos. La precipitación media anual (factor climático) aunque en la cuenca presenta variaciones importantes (desde 500 a 4,000 mm) no evidencian las variaciones en la distribución espacial de los suelos. No obstante, la influencia del clima en los suelos se manifiesta primordialmente por la distribución interanual de la precipitación, su patrón monomodal, con una estación seca marcada revela la presencia de los Luvisoles, uno de los grupos de suelos con mayor extensión en el área, ya que en su génesis dicho factor juega un papel esencial.

En segundo lugar, las condiciones de alta humedad en sectores de la cuenca media y alta (precipitación anual de 2000 y mayores) condicionan la presencia de los Umbrisoles y Gleysoles; los primeros suelos propios de los ambientes húmedos y los segundos propios de relieves bajos con mucho aporte de humedad, así como de los subgrupos dístricos (suelos con baja saturación de bases) y húmicos (acumulación de materiales orgánicos). En la Tabla 3 se presentan las principales características de los suelos dominantes.

CAPÍTULO VI

Tabla 3

Características de los Principales Suelos.

Tipos de Suelos	Características Principales
Gleysoles	Suelos saturados con agua por largos periodos de tiempo, nivel freático alto, ambiente reductor con carencia de oxígeno, colores gris/azulado, en relieves bajos (deprimidos).
Vertisoles	Suelos muy arcillosos, pesados, que se contraen y expanden formando grietas profundas y anchas, y requieren de un manejo especial por sus singulares propiedades físicas, fértiles.
Solonchaks	Suelos con alta concentración de sales solubles que afecta el crecimiento de las plantas, tienen propiedades gléyicas y nivel freático superficial.
Fluvisoles	Suelos jóvenes desarrollados en Llanuras, valles, depresiones lacustres y marinas, en condiciones naturales se inundan periódicamente y fértiles.
Luisoles	Suelos enriquecidos en arcilla en profundidad, procesos de migración de arcilla, puede llegar a formar capas muy duras el horizonte árgico y son de fertilidad moderada a alta
Pheozems	Suelos minerales, ricos en material orgánica, profundos, con excelentes propiedades químicas (fértiles) y físicas excelentes tierras para cultivar.
Cambisoles	Suelos jóvenes y de evolución media, con algun grado de desarrollo, fertilidad variable (alta a baja), según su posición en el paisaje.
Leptosoles	Suelos poco profundos, extremadamente delgados sobre roca continua y extremadamente pedregosos, en regiones montañosas de fuertes pendientes, la erosion es su mayor amenaza.
Umbrisoles	Suelos con pH acido, acumulación de materia orgánica en la parte superior del suelo y baja saturación de bases dentro del primer metro y baja fertilidad
Arenosoles	Suelos arenosos profundos, textura gruesa, alta permeabilidad y baja capacidad de retención de agua y almacenamiento de nutrientes.

CAPÍTULO VI

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presenta una descripción general de los resultados obtenidos en el análisis y clasificación fisiográfica, así como en la clasificación por aptitud de las tierras, destacando en cada uno los aspectos más importantes. En la Tabla 4 se presenta la estructura jerárquica de las unidades fisiográficas.

Tabla 4

*Estructura Jerárquica de las Unidades Fisiográficas*³.

Geoestructura	Provincia Fisiográfica	Ambiente Morfogénico	Unidad Climática	Grandes Paisajes
Cuenca de Sedimentación	Llanura del Golfo de México	Depositacional	Cálido húmedo y Cálido semihúmedo	Valle aluvial, Llanura marina, Llanura fluvio-lacustre, ...
		Lacustre, Marino, ...		
	Erosional	Cálido húmedo	Colinado erosional/estructural	
	Península de Yucatán	Disolucional	Cálido húmedo y Cálido semihúmedo	superficies alomadas
Cordillera de Plegamiento	Sierra Madre de Chiapas	Erosional, Estructural Erosional, ...	Semicálido muy húmedo,	Montañoso estructural, Montañoso disolucional, Colinado erosional, ...
			Cálido muy húmedo,...	

4.1 UNIDADES FISIGRÁFICAS DE LA CUENCA DEL RÍO USUMACINTA MÉXICO

a) Geoestructuras y Provincia fisiográficas: Los diversos relieves que conforman la cuenca están contenidos en dos grandes geoestructuras continentales: una cordillera de plegamiento y una gran cuenca de sedimentación, y en tres grandes regiones naturales o provincias fisiográficas: (a) Sierra Madre de Chiapas y Guatemala, (b) Península de Yucatán y (c) Llanura del Golfo de México.

³ En negrillas las unidades que se discuten y analizan en el artículo.

CAPÍTULO VI

b) Ambiente morfogenético: De acuerdo con la configuración general del relieve, en la cuenca Usumacinta, se pueden distinguir dos grandes sectores; el primero lo constituye la parte baja, donde predominan los relieves bajos modelados básicamente por tres tipos de ambientes morfogenéticos: (i) depositacionales (aluvial, fluvio-lacustre, fluvio-marino), (ii) erosional de lomeríos y colinas bajas y (iii) disolucional de superficies alomadas y depresiones cársticas. El segundo sector lo conforman los sectores de la parte media y alta de la cuenca, donde la geogénesis del relieve está determinada por los procesos disolucionales, estructurales, disolucional/estructural y erosional.

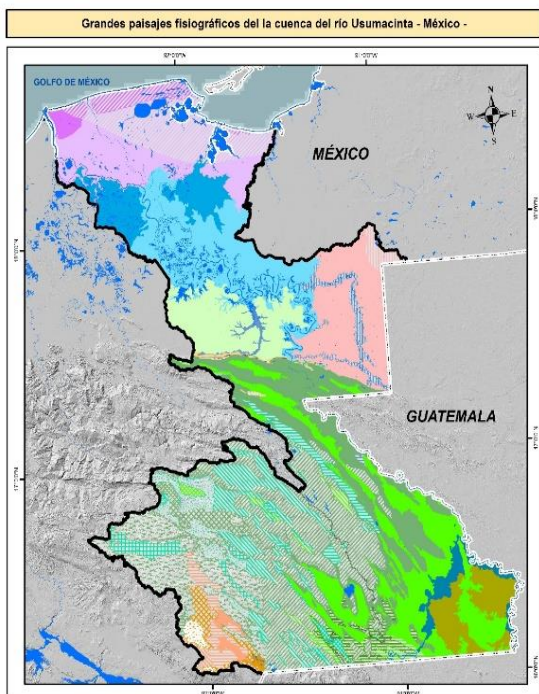
c) Unidad climática: Las unidades climáticas corresponden a las presentadas en el apartado descrito del área de estudio que califican las provincias fisiográficas con homogeneidad climática.

d) Grandes Paisajes: De acuerdo con la metodología utilizada, que tiene establecidas cinco categorías, para este estudio solo se contempla hasta la tercera; es decir, el nivel de grandes paisajes. Esta categoría corresponde, en términos geomorfológicos, a la unidad genética de relieve, comprende unidades con relaciones de afinidad de tipo geogenético, litológico y topográfico. Estas unidades caracterizadas con las unidades climáticas definen los grandes paisajes fisiográficos. En la Figura 5 se muestra la distribución geográfica de los grandes paisajes y su respectiva leyenda (Figura 6) en la zona de estudio.

CAPÍTULO VI

Figura 5

Grandes paisajes, Cuenca del río Usumacinta México.



Fuente: INEGI (2002; 2010 y 2013).

A continuación, se presenta un análisis y discusión general sobre la importancia e implicaciones, en la cartografía de suelos, que tiene la delimitación de las unidades fisiográficas, en este caso, a nivel de Grandes paisajes; para esto se ha seleccionado el área correspondiente a la cuenca baja del Usumacinta, en donde fue posible reunir suficiente información, que es validada con el trabajo de campo realizado, con énfasis en aspectos geo-pedológicos (principalmente en la morfología del suelo).

La información de suelos corresponde a la capa vectorial del conjunto edafológico (INEGI, Serie II) a escala general (1:250, 000), siendo esta información base (poco apropiada) para la toma de decisiones sobre la capacidad de uso y manejo de las tierras a nivel, de cuencas, municipios, y aún más a escalas más detalladas de comunidades y/o ejidos.

Figura 6

Leyenda Grandes paisajes, Cuenca del río Usumacinta México



CAPÍTULO VI

A nivel municipal y de comunidades se requiere de información de suelos con mayor nivel de detalle (estudios detallados y semidetallados) los que son escasos; además, la que existe no está actualizada ni se fundamenta en el análisis geomorfológico y fisiográfico de las relaciones suelo/paisaje, por lo que es común encontrar inconsistencias.

La geopedología como aproximación para el estudio de las relaciones suelo-paisaje, es la metodología utilizada en este estudio en la identificación y comprobación de las unidades de suelos, con el fin de ajustar y correlacionar las unidades de suelos, de la base cartográfica edafológica (INEGI Serie II, 2008), con las unidades fisiográficas delimitadas, lo que implica una mejora en dicha cartografía y a futuro como base y contribución a posteriores estudio de suelos y sus patrones de distribución geográfica.

Es importante anotar que, en la configuración de las unidades cartográficas (asociaciones) de suelos, en dicha base cartográfica se consideraron aspectos del relieve (topografía), clima, geología. No obstante, la diferencia fundamental en este enfoque y el del análisis fisiográfico, que aquí se presenta, es que: a) en este último estos elementos se analizan de manera integral para conformar así las unidades fisiográficas arriba mencionadas, y b) en el análisis fisiográfico, más que utilizar la topografía, se incorpora la geomorfología, y con esta la relación suelo-paisaje (aspectos geo-pedológicos). De esta manera, la unidad fisiográfica resultante (en este caso los grandes paisajes) conllevan implícitamente, de manera integral información geoespacial sobre los factores formadores de suelos, siendo esta la razón para que se utilicen como marco estructurante de la cartografía de suelos. Sobre esta base, y en los resultados del trabajo de campo, se discuten las inconsistencias encontradas en la cartografía edafológica del INEGI (con énfasis en los suelos dominantes: grupos 1 y 2), cuando se le relaciona con los grandes paisajes aquí descritos. El Análisis se centra en dos grandes paisajes, el relieve colinado o lomerío erosional (Llanura del Golfo de México) y el relieve de superficies alomadas disolucionales de la Península de Yucatán (Tabla 5).

CAPÍTULO VI

Tabla 5

Unidad de grandes Paisajes y contenido edafológico

Gran Paisaje	Asociación de suelos (Grupo 1 y 2)
Relieve lomerío erosional Material parental: Areniscas arcillosas del Mioceno	1. Gleysoles - Regosoles, 2. Regosoles - Arenosoles, 3. Fluvisoles - Luvisoles, 4. Lixisoles – Fluvisoles, 5. Luvisoles -Umbrisoles
Relieve de superficies alomadas disolucionales Material parental: Calizas del Mioceno	Cambisoles – Fluvisoles, Leptsoles – Phaeozem, Vertisoles - Gleysoles

Fuente: INEGI (2008).

En el relieve colinado erosional las dos primeras asociaciones (1. Gleysoles-Regosoles) y (2. Regosoles-Arenosoles) se encuentran en lomerío bajo, donde las areniscas arcillosas se encuentran subyacentes a unos materiales más jóvenes, siendo estos los que dan origen a dichos suelos. En las observaciones de campo los suelos dominantes encontrados se clasificaron como Cambisoles, que se considera el suelo dominante y en segundo lugar los Regosoles. Acorde con la posición fisiográfica, y la información de campo (no se encontró evidencia de mal drenaje), por lo tanto, los Gleysoles no son los suelos dominantes; éstos se pueden presentar en pequeños valles, asociados con Vertisoles.

Con respecto a las asociaciones (3. Fluvisoles–Luvisoles, 5. Luvisoles-Umbrisoles), se puede mencionar que la primera es la que presenta mayor inconsistencia; por las características del relieve (superficies estables - lomeríos), la edad de los materiales (mioceno), más la evidencia de campo, posibilita valorar, que es el ambiente morfogenético apropiado para el desarrollo de los Luvisoles (la mayor parte de las observaciones de campo correspondieron a este tipo de suelos); en cuanto a los Fluvisoles, no se encuentran las condiciones geopedológicas y fisiográficas propias de sus

CAPÍTULO VI

geogénesis, ni de ambientes recientes ligados a la acción fluvial del agua (aporte relativamente continuo, periódico de sedimentos recientes con muy escaso desarrollo edafogénico) de las que se pueda inferir la presencia de estos suelos. En los bordes, límite con la llanura aluvial se encuentran suelos desarrollados a partir de materiales más recientes del Pleistoceno (probablemente originados mediante el desborde de los ríos aledaños (Usumacinta, Chacamax), que suprayacen a las areniscas arcillosas del Mioceno, pero en ningún caso, se dan las condiciones para el desarrollo de los Fluvisoles; los suelos encontrados corresponden a Regosoles, Cambisoles arenicos y arenosoles. Estas mismas apreciaciones se pueden también aplicar a la asociación (4. Lixisoles–Fluvisoles), donde los Fluvisoles reportados corresponden a Cambisoles arenicos y Regosoles, muy semejante al caso anterior.

En el relieve de las superficies alomadas disolucionales, en donde el material parental está constituido por calizas del Mioceno, o sedimentos aluviales del pleistoceno que suprayacen a estas principalmente en el límite con la llanura aluvial, tampoco son las condiciones de morfogénesis que sustenten la presencia de los Fluvisoles reportados; en su defecto, se encontraron Cambisoles/Phaeozem y Leptosoles, que son suelos acordes con la posición la fisiográfica, en esta mal conformada asociación (Cambisoles–Fluvisoles). En el resto de la unidad fisiográfica correspondiente, donde se reporta un predominio de Vertisoles, los autores consideran con base en las observaciones de campo, que estos suelos están sobredimensionados, y se plantea como suelos dominantes los Leptosoles típicos y líticos y como segundo suelo los Vertisoles epilépticos; los Gleysoles (si los hay) que se muestran como un suelo dominante asociado a los Vertisoles, se podrían presentar, como inclusiones.

4.2 ZONIFICACIÓN POR APTITUD DE LA TIERRA CUENCA USUMACINTA MÉXICO

La planeación del uso de la tierra es un modelo integrador (FAO 1994), cuyo objetivo es propender por un uso sostenible e integral de los recursos de tierras, en los que los suelos juegan un papel fundamental. En el proceso de planeación, la clasificación y

CAPÍTULO VI

evaluación de tierras, es un componente básico y abarca, por una parte, una evaluación física, correspondiente a la naturaleza ecológica de las diferentes expresiones de la tierra y el potencial de aprovechamiento que cada una de estas ofrece y un análisis socioeconómico asociado a sus aprovechamientos potenciales; en este caso de estudio se trata de cubrir el primer objetivo, la evaluación física. Con esto se pretende ofrecer a los tomadores de decisión, elementos para el diseño de políticas públicas que se orienten al uso sustentable y a la conservación de los recursos naturales, en especial de los suelos, en la medida que estos constituyen la base para el desarrollo sostenible de la agricultura.

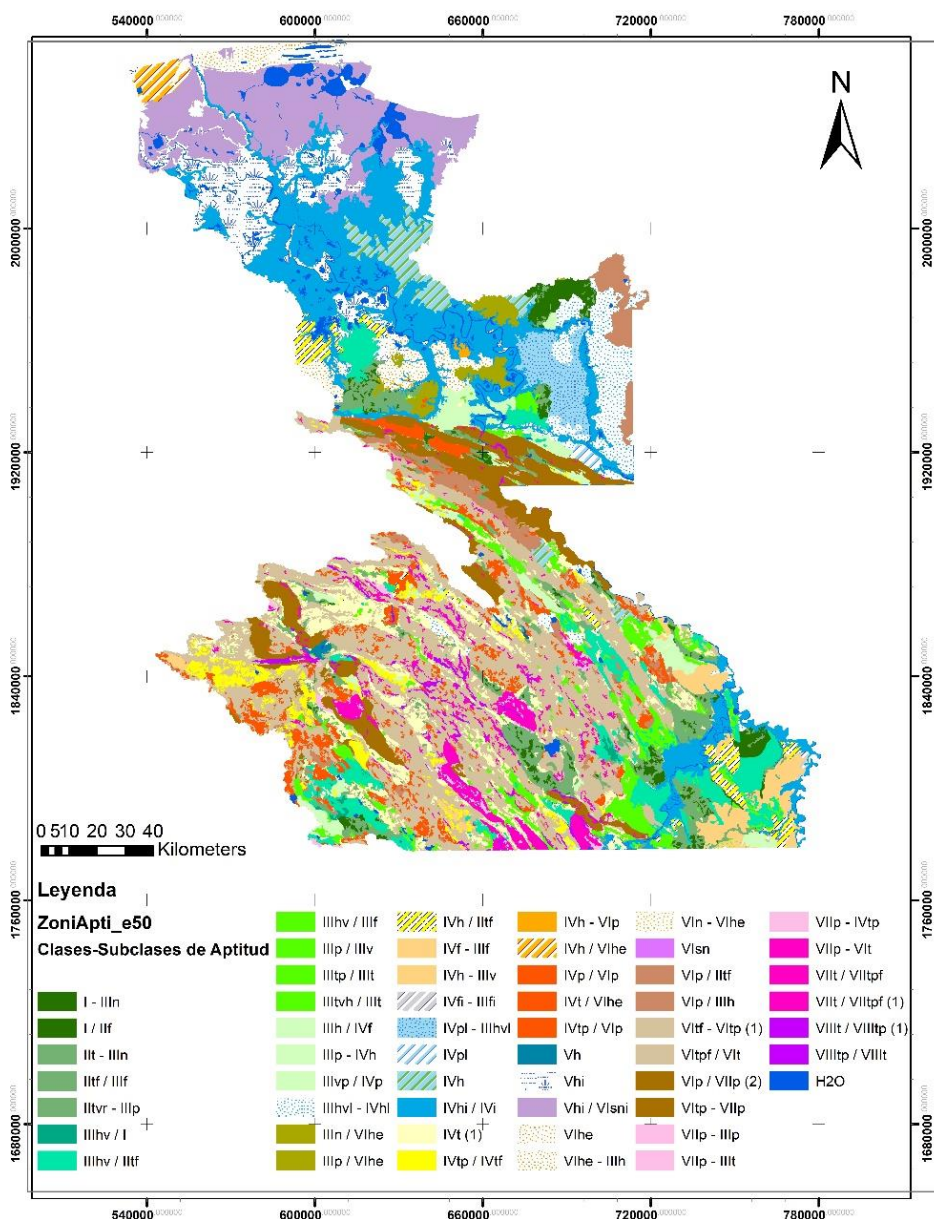
Los resultados de la zonificación por aptitud de las tierras se presentan en la Figura 7, en la que se muestra la distribución espacial de las distintas clases y subclases de tierras de acuerdo con la capacidad de uso. En la parte baja de la cuenca predominan las clases IV, V y VI, siendo los factores limitantes dominantes la condición de mal drenaje, las inundaciones, presencia de sales y/o sodio, y drenaje excesivo, este último en la llanura marina. Las clases II y III, en menor extensión se presentan en los lomeríos, con pendientes moderadas. En los sectores medio y alto de la cuenca las clases dominantes en su orden son la VI y VII, siendo la pendiente y la poca profundidad de los suelos los principales factores limitantes. Completan el mosaico de aptitud principalmente las clases II, III y IV, siendo los factores limitantes las pendientes moderadas y la profundidad del suelo.

Como se puede apreciar en el mapa de la Figura 7, en la cuenca del río Usumacinta, las áreas aptas para la agricultura son escasas, particularmente en los sectores medio y alto, en donde los factores más limitantes son las fuertes pendientes y la escasa profundidad de los suelos. De otra parte, se sabe que en esta zona de la cuenca se practica en extensiones importantes, la agricultura de ladera. La información que aquí se presenta, se espera pueda usarse en el diseño de políticas públicas, tendientes a la implementación de prácticas de conservación de suelos, asociadas con dicho uso de la tierra, o en su defecto cuando así lo amerite, a la conservación de las coberturas naturales y/o reconversión productiva y de conservación de dichas tierras.

CAPÍTULO VI

Figura 7

Clases y Subclases de Aptitud de las Tierras y sus Limitantes⁴



Fuente: INEGI (2007).

⁴n: contenido de sodio, s: contenido de sales, t: pendiente, f: fertilidad, p: profundidad efectiva, v: texturas muy finas, h: condición de drenaje, l: encharcamiento, he: drenaje excesivo, i: susceptibilidad a inundaciones

CAPÍTULO VI

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La metodología del análisis fisiográfico posibilita los elementos estructurantes para el estudio integral del paisaje y a través de este, se analizan y relacionan articuladamente los aspectos geológicos, geomorfológicos, climáticos y de relieve, condición esencial para lograr un manejo adecuado y sustentable del recurso suelo y en general de los recursos naturales; el resultado son las unidades fisiográficas, en este caso de grandes paisajes.

Cuando la información de suelos no tiene una base de conocimiento geomorfológico sólido, como en el caso de México, las unidades fisiográficas son de gran utilidad para ajustar y actualizar la cartografía de suelos y su conformidad con el paisaje. También se ajustaron en el proceso de la generación de dichas unidades aspectos geológicos.

Aunque la información de suelos es de carácter general, su base de datos posee una riqueza que, a menudo no es utilizada en todo su contexto, tal como se realizó en la zonificación por aptitud de las tierras en este estudio.

La geopedología como aproximación conceptual y metodológica es fundamental en el proceso de ajuste de las unidades de suelos.

En el proceso de la planeación territorial, la clasificación y evaluación de tierras, es un componente básico. Por esto es esencial conocer la aptitud de las tierras, como base fundamental para el ordenamiento y la planeación del uso del territorio; lo que contribuye a la implementación de políticas y programas de uso y manejo óptimos, acorde con las diferentes aptitudes, limitantes y problemáticas encontradas.

La información de suelos es un insumo básico para el desarrollo e implementación de la zonificación por aptitud de las tierras. Sin embargo, a nivel local (municipio y comunidad) se requiere actualizar, pormenorizar y producir información geoespacial de los tipos de suelos a escala más detallada, con una base geopedológica, para que dicho proceso esté acorde con la escala de análisis.

CAPÍTULO VI

En el proceso de análisis y construcción de las unidades de paisaje, el uso de anáglifos, fue de gran utilidad para analizar e incorporar los elementos de la geología y la geomorfología, como variables importantes y definitorias de dichas unidades.

REFERENCIAS

- Consejo de Europa. (2000). Convenio europeo del paisaje. Florencia: Consejo de Europa.
http://www.magrama.gob.es/en/desarrollo-rural/temas/desarrolloterritorial/090471228005d489_tcm11-24940.pdf
- Food And Agriculture Organization Of The United Nations. (1998). Centro Internacional de Referencia e Información sobre suelos ISRIC and ISSS. Roma. ISBN 92-5-104141-5
- Geissert, D. y J. P. Rossignol (coords). (1987). La Morfoedafología en la Ordenación de los Paisajes Rurales. Instituto Nacional, de Investigaciones sobre Recursos Bióticos e Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación, México: 83 p. Primera edición. Imprenta Madero, S. A.
<https://core.ac.uk/download/pdf/39868307.pdf>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC, 2002). Subdirección de Agrología. Manual de códigos de atributos de los levantamientos de recursos de Tierras. Santa Fe de Bogotá, Subdirección de Agrología.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC, 2005). Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación Física de tierras. Bogotá.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (INEGI, 2008). Conjunto de datos vectorial Edafológico escala 1: 250 000 Serie II (Continuo Nacional).
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/default.aspx>.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1999). Base de Datos Geográficos. Diccionario de Datos Geológicos. Escala 1:50,000. (Vectorial). México, D.F.

CAPÍTULO VI

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1999). Base de Datos Geográficos. Diccionario de Datos Geológicos. 1:1'000,000 (Vectorial). México, D.F.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2010). Regiones Hidrológicas (Cuencas, Ríos, Cuerpos de Agua). “Red Hidrográfica”. Escala 1:50 000. Edición: 2.0, Subcuencas hidrográficas RH30, RH. Grijalva-Usumacinta. México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2013). “Modelo Digital de Elevaciones México”. Continúo de Elevaciones Mexicano 3.0 (cem 3.0), resolución 15 × 15 m”. México.

International Union of Soil Sciences (IUSS, 2015). Grupo de Trabajo WRB. “Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Actualización Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos”. Informes sobre recursos mundiales de suelos, núm. 106. FAO, Roma.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1994). Directrices sobre la Planificación del Aprovechamiento de la Tierra. Colección FAO: Desarrollo 1. FAO, Roma.

Rossiter, David. G. (2004). International Institute for Geo-information Science & Earth Observation (ITC). Traducido y adaptado al español por: Vargas Ronald. R. Metodologías para el levantamiento del recurso suelo. 2da Versión revisada. Marzo 2000. Traducción y adaptación agosto del 2004.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (SEMARNAT) - Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). Atlas del Agua en México. En línea. México, disponible en: http://201.116.60.25/publicaciones/AAM_2016.pdf.

Saavedra, Aristides y G. López, Daniel. L. (2019). Proyecto FORDECyT 273646. Cambio global y sustentabilidad en la cuenca del río Usumacinta y zona marina de influencia. Bases para la adaptación al cambio climático desde la ciencia y la

CAPÍTULO VI

gestión del territorio. Propuesta de zonificación de la aptitud de uso de las tierras basada en el análisis fisiográfico y la capacidad de uso de las tierras.

Saavedra, A. y Castellanos, L. (2013). Centro de Cambio Global y la Sustentabilidad (CCGSS-Centrogeo) FOMIX—TABASCO. Análisis fisiográfico región del bajo Usumacinta México. Retos para la sustentabilidad en la cuenca baja del río Usumacinta en Tabasco: ecosistemas, cambio climático y respuesta social.

Saavedra, A. y López, D. (2019). Análisis integral del paisaje. Elementos conceptuales y metodológicos. Estudio de caso Cuenca del río Usumacinta. Ediciones Oso Blanco. Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C. ISBN 978-607-98310-1-1

Saavedra, A. y López, D. (2016). Análisis de los factores de transformación territorial en los corredores biológicos de Chiapas Norte. México, Centro de Investigación en Geografía y Geomática, Ing. Jorge L. Tamayo A.C.

Serrato, P. K. (2009). Clasificación fisiográfica del terreno a partir de la inclusión de nuevos elementos conceptuales. *Perspectiva Geográfica* Vol. 14,

Villota, Hugo. (1997). “Una nueva aproximación a la Clasificación fisiográfica del terreno”, en: *Revista CIAF*, vol. 15, núm. 1, pp.83-117.

Weyland, F., Barral, M. P. Laterra, P. (2017). “Assessing the relationship between ecosystem functions and services: Importance of local ecological conditions”, en: *Ecological Indicators*, núm. 81, pp. 201-213.

Zinck, A. J. (2012). Geopedología. Elementos de Geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC. The Netherlands, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation Enschede.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Carlos Enrique Castro Méndez

<http://orcid.org/0000-0003-3125-8349>

Agrólogo de la Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano (1990), Especialista en Ordenamiento y Gestión integral de Cuencas Hidrográficas de la Universidad Santo Tomás (2004), Magíster en Geografía en el convenio Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – UPTC- IGAC (2010) y Candidato a doctor en Geografía en el mismo convenio. Investigador del Grupo Suelos y Ecología de la Subdirección de Agrología – IGAC, investigador en el grupo Geografía y Ordenamiento Territorial GEOT- UPTC e investigador en el grupo PROGASP – GAIA de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. E-mail para contacto cecastro@igac.gov.co

Júlio César Suzuki

<https://orcid.org/0000-0001-7499-3242>

Possui graduação em Geografia pela Universidade Federal de Mato Grosso (1992), em Letras pela Universidade Federal do Paraná (2004) e em Química pelo Instituto Federal de São Paulo (2021), com mestrado (1997) e doutorado (2002) em Geografia Humana pela Universidade de São Paulo e Livre-Docência em Fundamentos Econômicos, Sociais e Políticos da Geografia. Atualmente, é Professor Associado Doutor II, junto ao Departamento de Geografia, da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. E-mail para contacto jcsuzuki@usp.br

Wladimir Mejía Ayala

<https://orcid.org/0000-0002-4091-9885>

Ingeniero Agroforestal de la Universidad de Nariño, Magister en Management de la cultura y del turismo sostenible de la Universidad Paris IX Dauphine, Magíster en Turismo Espacio Sociedad de la Universidad París VII Diderot, Doctor en Geografía de la Universidad de Angers en Francia. Profesor Asociado de los Estudios de Posgrado en Geografía (convenio Uptc-IGAC), investigador reconocido por Minciencias Colombia en las áreas Espacio, Turismo, Sociedad. Miembro del grupo de investigación Geografía y Ordenamiento Territorial GEOT. E-mail para contacto wladimir.mejia@uptc.edu.co

SOBRE LOS AUTORES

Aristides Saavedra Guerrero

<https://orcid.org/0000-0003-1476-7678>

Agrólogo (1989), experto en levantamiento de suelos y uso de la información de suelos (1998) y geomorfología (1995). CIAF– IGAC. Bogotá, Colombia., y Evaluación de Tierras “Metodología Proceso Analítico Jerárquico (AHP) FAO, D. F, México. 2005. Diplomado en Geomática (2007). CentroGeo. Técnico Investigador del Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, CentroGeo. CDMX, México. Ha desarrollado cerca de 20 proyectos relacionados con estudios de suelos, análisis Fisiográfico, clasificación de tierras por capacidad de uso, zonificación biofísica, Planeación y Ordenamiento Territorial; los resultados se han publicado en estudios de suelos, dos libros, un capítulo de libro, y alrededor de 15 artículos en revistas internacionales. E-mail para contacto asaavedra@centrogeo.edu.mx

Astor Emilio López

<https://orcid.org/0000-0002-6891-4779>

Ingeniero Agrónomo (1993) y Magister en Manejo y Conservación de Recursos Naturales (2019). Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario. Santa Fe, Argentina. Profesional de gestión externa en reconocimiento y evaluación de suelos en INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Desde 2017 es Coordinador del Área de Investigación en Agronomía y Recursos Naturales en la EEA Sáenz Peña. Actualmente es Responsable del Convenio entre el INTA y el Gobierno del Chaco, para el Estudio de los Suelos de la provincia. Docente en UNCAUS (Universidad Nacional del Chaco Austral): en las cátedras de Edafología y Conservación y manejo de Suelos de la carrera Ingeniería Agronómica. E-mail de contacto lopez.astor@inta.gob.ar

Brian Montaña Sandoval

<https://orcid.org/0000-0003-4661-9688>

Capitán del Ejército Nacional de Colombia. Profesional en Ciencias Militares desde 2006. Especializaciones asociadas a temas militares desde 2008. Especialización en Conducción y Administración de Unidades Militares en 2016. Especialización en Gestión Ambiental y Desarrollo Comunitario en el Centro de Educación Militar (2021). Experiencia en Infantería liviana y toda la carrera militar. Intereses en temas ambientales y de defensa de la Nación. E-mail de contacto: brian.sandoval@buzonejercito.mil.co

Carlos Enrique Castro Méndez

<https://orcid.org/0000-0003-3125-8349>

Agrólogo de la Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano (1990), Especialista en Ordenamiento y Gestión integral de Cuencas Hidrográficas de la Universidad Santo Tomás (2004), Magíster en Geografía en el convenio Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – UPTC- IGAC (2010) y Candidato a doctor en Geografía en el mismo convenio. Investigador del Grupo Suelos y Ecología de la Subdirección de Agrología – IGAC, investigador en el grupo Geografía y Ordenamiento Territorial GEOT- UPTC e investigador en el grupo PROGASP – GAIA de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. E-mail para contacto cecastro@igac.gov.co

Daniel M. López López

<https://orcid.org/0000-0001-7672-7335>

Agrólogo, Magister of Science, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, 1992, Enschede, Netherlands. Maestro en Geomática, CentroGeo, 2006, México, Investigador del Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, México, donde ha desarrollado alrededor de 15 proyectos en aspectos de planeación territorial y estudio del paisaje; los resultados se han publicado en dos libros, 2 capítulos de libro, y más de 25 artículos en revistas internacionales complementados con aspectos de análisis y modelado espacial y

vulnerabilidad del paisaje al cambio ambiental global, cambio climático. E-mail para contacto dlopez@centrogeo.edu.mx

Grace Andrea Montoya Rojas

<https://orcid.org/0000-0001-9284-1111>

Agróloga (1998) especialista en Evaluación de Impacto Ambiental de Proyectos (2002) de la Universidad Jorge Tadeo Lozano en Bogotá, Colombia; Máster en Análisis Geográfico Regional y Ph.D. “Entorno Natural y Humano en las ciencias sociales”, de la Universidad de Salamanca en España (2011); Postdoctorado en Biogeociencias del National Geophysical Research Institute, India (2020). Profesora asociada, titular y de postgrados desde el 2009 en diferentes Universidades reconocidas. Conferencista internacional invitada. Consultora y asesora en Biogeociencias para entidades gubernamentales y organizaciones nacionales e internacionales. Miembro de Número de la Sociedad Geográfica de Colombia. Directora de Grupo de Investigación de INGEOS SAS E-mail para contacto: grace.montoya@utadeo.edu.co

Jorge Alberto Sánchez Espinosa

<https://orcid.org/0000-0002-6459-2485>

Agrólogo de la Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano (1986) y Antropólogo. de la Universidad Nacional de Colombia (1992), Especialista en Fotointerpretación aplicado a los Levantamientos de suelos del Centro Interamericano de Fotointerpretación CIAF-Bogotá, Colombia (1992), Curso Especial en Remote sensing and GIS for natural resources management del ITC-Enschede Holanda (1995), Magíster (1997) y Doctorado en Ciencias Agrarias Área Suelos de la Universidad Nacional de Colombia (2017). Actualmente es socio activo y docente en el área de planificación de tierras y suelos y ha desarrollado importantes investigaciones en el área de los suelos poligenéticos en Colombia. E-mail para contacto jasancheze@unal.edu.co.

Júlio César Suzuki

<https://orcid.org/0000-0001-7499-3242>

Possui graduação em Geografia pela Universidade Federal de Mato Grosso (1992), em Letras pela Universidade Federal do Paraná (2004) e em Química pelo Instituto Federal de São Paulo (2021), com mestrado (1997) e doutorado (2002) em Geografia Humana pela Universidade de São Paulo e Livre-Docência em Fundamentos Econômicos, Sociais e Políticos da Geografia. Atualmente, é Professor Associado Doutor ii, junto ao Departamento de Geografia, da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. E-mail para contacto jcsuzuki@usp.br

Laura Itatí Giménez

<https://orcid.org/0000-0002-9139-4759>

Experta en Estadística y Computación, Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Argentina (1987) y Doctora en Ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente, Universidad de A Coruña, España (2009). Actualmente Profesora Titular, Cátedra Cálculo Estadístico y Biometría, Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE y desde 2020, Secretaria Académica de dicha Facultad. Entre 1985 y 2011, Referente en Estadística, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria., E-mail de contacto lauraitatigimenez@gmail.com

María Florencia Roldán

<https://orcid.org/0009-0009-1324-2272>

Ingeniera Agrónoma egresada de la FCA, Universidad Nacional del Nordeste (2005), y Magister Scientiae en Producción Vegetal, en la FCA de la Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina (2012). Profesional de Gestión Externa (Investigador) en la EEA INTA Sáenz Peña-Chaco, Argentina. Es Jefa del Grupo de Trabajo Ganadería y Agronomía del Área Agronomía y Recursos Naturales de la EEA Sáenz Peña. Responsable técnica del Laboratorio de Suelo y Agua y representante oficial ante la FAO como Miembro del Global Soil Laboratory Network (GLOSOLAN). Docente (Jefe de Trabajos Prácticos) en las asignaturas Edafología y

Conservación y Manejo de Suelo, de la carrera de Ingeniería Agronómica, de la Universidad Nacional Del Chaco Austral. E-mail de contacto roldan.maria@inta.gob.ar

Natalia Forero Patiño

<https://orcid.org/0000-0003-2297-2102>

Ingeniera Geógrafa y Ambiental (2015); especialista en Gestión Ambiental y Desarrollo Comunitario del Centro de Educación Militar (2019), Investigadora del grupo de investigación de INGEOS SAS, con más de cinco años de experiencia tanto en el sector privado como público. Experiencia en gestión ambiental, estructuración y desarrollo de proyectos socio-ambientales y de saneamiento ambiental, educación ambiental, delitos ambientales y orientación a la gestión del cambio. Uso del manejo de la normatividad ambiental. Experta en Sistemas de Información Geográfica. E-mail de contacto: nataliaforeropatino@cedoc.edu.co

Sergio Gaviria Melo

<https://orcid.org/0000-0003-0751-7419>

Químico de la Universidad Nacional de Colombia (1979); Maestría en Ciencias del Suelo de la Universidad de Nancy-Francia (1983); Doctorado en Pedología de la Universidad de Nancy-Francia con tesis laureada sobre geoquímica de oxisoles hidromorfos de los Llanos Orientales de Colombia (1993); experiencia de 20 años como técnico-científico, director de proyectos y coordinador del programa de geoquímica en el Instituto de Investigaciones Geológico-Mineras, hoy Servicio Geológico Colombiano (1979-1999); profesor asociado de los Departamentos de Geología y Química, Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, docencia en investigación en proyectos en geoquímica y medio ambiente en Colombia (1999-2014); profesor invitado Universidades de Liège-Bélgica y Savoie-Francia; consultor científico en temas geoambientales y en estudios de impacto ambiental. E-mail para contacto sgaviriam@unal.edu.co

Sergio Montico

<https://orcid.org/0000-0002-8053-7734>

Ingeniero Agrónomo (1896), Facultad de Ciencias Agrarias (FCA) y Doctor en Ingeniería (2001), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA). Universidad Nacional de Rosario (UNR), Argentina. Profesor Titular de Manejo de Tierras y de Evaluación de Impacto Ambiental (UNR). Director del Centro de Estudios Territoriales FCA-UNR. Vicedirector del Instituto Mixto Facultad de Ciencias Agrarias UNR-CONICET. Miembro de: Observatorio Santafesino de Suelos, del Programa de Medio Ambiente y Salud (UNR) y del Programa Drones (UNR). E-mail de contacto smontico@unr.edu.ar

Tomas Enrique León Sicard

<https://orcid.org/0000-0001-6771-9253>

Agrólogo de la universidad de Bogotá Jorge Tadeo lozano

Profesor Titular (Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) en la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Cundinamarca, CO.

Doctor Ingeniero Agrónomo (Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos), Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Comunidad de Madrid, ES.

Wladimir Mejía Ayala

<https://orcid.org/0000-0002-4091-9885>

Ingeniero Agroforestal de la Universidad de Nariño, Magister en Management de la cultura y del turismo sostenible de la Universidad Paris IX Dauphine, Magíster en Turismo Espacio Sociedad de la Universidad París VII Diderot, Doctor en Geografía de la Universidad de Angers en Francia. Profesor Asociado de los Estudios de Posgrado en Geografía (convenio Uptc-IGAC), investigador reconocido por Minciencias Colombia en las áreas Espacio, Turismo, Sociedad. Miembro del grupo de investigación Geografía y Ordenamiento Territorial GEOT. E-mail para contacto wladimir.mejia@uptc.edu.co