

MINERALOGÍA DE LOS SUELOS EN LA ZONA PROTECTORA: “CERROS DE ESCAZÚ”

Carlomagno Salazar Calvo¹

RESUMEN

Mineralogía de los suelos en la zona protectora: “cerros de Escazú”. En el año 2015 se realizó un estudio semi-detallado de suelos y capacidad de uso de las tierras en la zona protectora “Cerros de Escazú”, por parte del equipo técnico de edafólogos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA), a solicitud del Área de Conservación Pacífico Central del Ministerio del Ambiente y Energía (ACOPAC-MINAE). La zona protectora mide 7.175 ha y está inmersa dentro de los cantones de Acosta, Mora, Santa Ana, Escazú, Alajuelita y Aserrí, todos de la provincia de San José. En la primera fase del estudio, los suelos fueron clasificados hasta el nivel de SubGrupo. En una segunda fase, por intercesión del entonces, Ministro del MINAE, Edgar Gutiérrez Espeleta se logró coordinar con el ICE para que colaboraran con el análisis de las muestras de suelo de las diferentes calicatas en el difractor de Rayos X y microscopio petrográfico de luz polarizada del Departamento de Ingeniería Geológica, perteneciente al área del Centro de Servicio y Diseño. Dicho estudio permitió clasificar los suelos hasta el nivel de familia mineralógica, de donde se obtuvieron diez unidades cartográficas y seis unidades edáficas.

Palabras clave: Escazú, Mineralogía, Rayos X, Petrografía, Suelos.

MINERALOGY OF SOILS IN THE PROTECTIVE AREA: “CERROS DE ESCAZÚ”

ABSTRACT

Mineralogy of soils in the protective area: “cerros de Escazú”. In 2015, a semi-detailed study of soils and land use capacity was carried out in the "Cerros de Escazú" protection zone, by the edaphologist's technical team of the National Institute of Innovation and Transfer of Agricultural Technology (INTA), at the request of the Central Pacific Conservation Area of the Ministry of Environment and Energy (ACOPAC-MINAE). The protection zone covers an area of 7.175 ha and it is immersed between the cantons of Acosta, Mora, Santa Ana, Escazú, Alajuelita and Aserrí, all from the province of San José. In the first phase of the study, the soils were classified up to the SubGroup level. In a second phase, the minister of MINAE at the time, Edgar Gutiérrez Espeleta, interceded with the ICE so they could collaborate with the analisis of soil samples from the different test pits and, also run the samples in the X-ray diffractometer and in the polarized light petrographic microscope of the Geological Engineering Department, of to

¹ Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA-Costa Rica.
csalazar@inta.go.cr

the Service and Design Center area. This study allowed the classification of the soils up to the mineralogical family level, where ten cartographic units and six edaphic units were obtained (Table 1).

Keywords: Escazú, Mineralogy, X-ray, Petrography, Soils.

INTRODUCCIÓN

La importancia de conocer las propiedades de las arcillas, o bien de la fracción gruesa de suelos con minerales cristalinos o paracristalinos, radica en que determinan muchas de las características químicas, físicas y microbiológicas y por ende todas las actividades que ocurren sobre y dentro del suelo.

Según Besoain (1985), las arcillas son las “condicionadoras de la fertilidad del suelo”, pues al presentar cargas negativas y positivas pueden adsorber cationes y en menor cantidad aniones y retener agua entre sus láminas. Así, al retener elementos como fósforo, nitrógeno y potasio definen la fertilidad potencial de los suelos en relación con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y aniónico (CIA) y la alta o baja saturación de bases. Además, la importancia de las arcillas radica en que constituyen el asiento donde ocurren la mayoría de los procesos químicos de adsorción y retención de nutrimentos y su posterior liberación a la solución del suelo, donde pueden ser aprovechados por las plantas. Las arcillas también, influyen en importantes propiedades físicas de los suelos, como la capacidad de retención de agua, velocidad de infiltración, permeabilidad interna, conductividad hidráulica, adhesividad, plasticidad, contracción, expansión y los procesos de intercambio gaseoso que ocurren a nivel radicular (Alvarado *et al.* 2014).

Bornemisza (1969), citado por Alvarado *et al.* (2014) resume el conocimiento sobre mineralogía de arcillas en suelos de Centroamérica y Panamá y descubre solamente cinco trabajos realizados en Costa Rica. Hacia el 2012, Alvarado *et al.* (2014) mencionan solamente 82 trabajos sobre el tema de mineralogía de arcillas efectuados en Costa Rica.

Para determinar los minerales presentes en la fracción arcilla existen muchas técnicas, pero la más empleada en el mundo es la difracción con Rayos X con muestras en polvo de arcillas para los minerales cristalinos y por el conteo de granos en microscopio petrográfico de luz polarizada para la fracción gruesa del suelo (arena).

El método de rayos X se fundamenta en la arquitectura de las estructuras cristalinas y su distribución periódica de los átomos, iones o moléculas en una red tridimensional que se basa en distribuciones regulares separadas por distancias constantes y características, según sea el mineral predominante. La difracción en los cristales es una consecuencia de la disposición periódica de los átomos en los cristales. En un diagrama de difracción, estos espacios constantes se traducen en una distribución característica de máximos (picos) que permiten identificar cualitativamente el cristal. Así, esto hace posible la cuantificación del método, puesto que la intensidad de estos picos es proporcional al número de planos que difractan, es decir, a la concentración de una estructura específica (Besoain 1985). Cada cristal de arcilla tiene planos de átomos separados por distancias constantes, los cuales son propios para cada arcilla (Burt 2004).

Ubicación de la zona de estudio

La zona protectora Cerros de Escazú se ubica en el Valle Central de Costa Rica, tiene un área de 7.175 ha dentro de los cantones de Acosta, Mora, Santa Ana, Escazú, Alajuelita y Aserri. Así dicha área se enmarca dentro de las coordenadas métricas 1.090.000-1.100.000 y 450.000-500.000 de la proyección CRTM-05 (Figura 1).

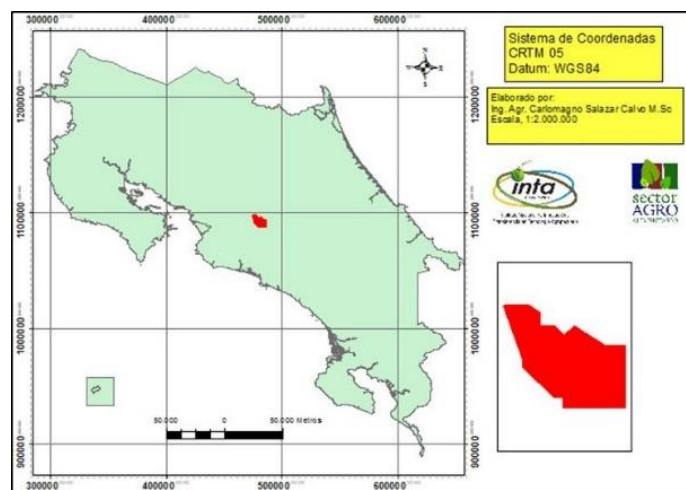


Figura 1. Ubicación de la zona protectora Cerros de Escazú, San José, Costa Rica, 2019.

Geología y geomorfología

En los cantones donde se ubica la zona protectora Cerros de Escazú se han realizado diversos estudios geológicos y geomorfológicos, entre los que destacan los relacionados con desastres naturales, como sismos, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas (González 1910, Dóndoli 1950, 1970, Peraldo y Montero 1999, Peraldo y Rojas 2000), estudios geológicos sobre relaciones estratigráficas y otros temas (Rivier 1979, Sprechman 1984, Denyer y Arias 1991, Hernández y Vargas 1992, Mora 1993), los estudios que definieron fallamiento y sismicidad en el área de estudio (Fernández y Montero 2002, Denyer *et al.* 2009), deslizamientos en el cantón de Escazú (Bonilla 2003, Arias *et al.* 2011, Soto *et al.* 2012), en Santa Ana y Escazú (Alvarado *et al.* 2002, Madrigal 2004, Chaves 2007), en Aserri (Hernández 1994), o geomorfología (Madrigal y Rojas 1980, Hernández y Vargas 1992, Soto *et al.* 2012).

Del análisis de estos estudios, se concluye que dentro de la Zona Protectora se ubican siete formaciones geológicas (Figura 2), como las más importantes, de sur a norte y de este a oeste se encuentran las siguientes:

a. Formación Peña Negra:

Compuesta por areniscas y lutitas negras y se le asigna una edad del Mioceno Medio (Denyer y Arias 1991, Hernández y Vargas 1992). En observaciones realizadas con microscopio se ha demostrado que las lutitas corresponden con lodolitas, además se ha identificado cuarzo, plagioclasas, piroxenos, óxidos de hierro, ortosa y clastos volcánicos que flotan en una matriz arcillosa.

b. Formación Cornubianitas de Escazú:

Las Cornubianitas son rocas metamórficas de contacto, derivadas de la Formación Intrusivo de Escazú y una parte de las areniscas de la Formación

Pacacua (Bergoeing 1998). Las Cornubianitas son rocas que se caracterizan por ser duras, presentan fractura concoidea, que preservan estructuras primarias tales como estratificaciones, trazas de fósiles y bioturbación. Estas rocas se componen de una mineralogía mixta de sericita, calcita, muscovita, ceolitas y minerales esenciales fuertemente meteorizados (Hernández 1994). Denyer y Arias (1991) datan esta formación en el Mioceno Superior Terminal.

c. Formación La Cruz:

Esta formación está compuesta de materiales volcánicos como: basaltos, andesitas y tobas (Denyer y Arias 1991). Según Krushensky (1972) y Berrangé y Whittaker (1977) la Formación se compone de tobas finas intercaladas con arenas volcánicas, aglomerados y brechas volcánicas, así como flujos de lava andesítica y basáltica, con sedimentos locales. Además, presenta intrusiones de numerosos plutones, diques, sill y stock, que varían de gabro a adamellita. Éstos autores mencionan que todas las litologías cercanas a estos intrusivos se encuentran alteradas hidrotermalmente, con silicificación, propilitización, kaolinización y priritización ampliamente distribuida. La mayor parte del área está representada por tobas lapílicas, conglomerados y brechas volcánicas y en menor grado lavas andesíticas y coladas de lava basálticas acomodadas horizontalmente.

d. Formación Intrusivo de Escazú:

Según Obando (1983) el intrusivo corresponde con monzonitas, granodioritas, monzogabros, monzodioritas, gabros y sienitas. Bergoeing (1998) manifiesta que los Cerros de Escazú son el producto de un macizo intrusivo del Mioceno, que puede relacionarse con los intrusivos de la cordillera de Talamanca, por lo tanto, también se relacionan con el grupo comagmático y se identifican entre los principales materiales: granodioritas y monzodioritas. Este intrusivo se destaca por ser el más joven de Costa Rica, las dataciones con K/Ar de una granodiorita lo ubica en 5,3 M.a. (Bergoeing 1982).

e. Formación Grifo Alto:

Según Hernández y Vargas (1992), y Soto *et al.* (2012), esta Formación se compone de lavas andesíticas con tonalidades grises y rojizas. Se encuentran rocas volcánicas como basaltos, dacitas y secuencias de flujos piroclásticos, con bloques lávicos y escoriáceos, así como depósitos ignimbríticos.

f. Formación Depósitos Aluviales y Coluviales:

En esta formación destacan los abanicos coluvio-aluviales mencionados por Ehandi (1981), los cuales están conformados por bloques de lavas andesíticas, intrusivos y corneanas, que se muestran sueltos, cementados o semiconsolidados, bien redondeados y poco meteorizados. Además, los coluvios están compuestos por materiales sedimentarios, ígneos y metamórficos, en donde son comunes los bloques duros de rocas intrusivas, cornubianitas incluidos en una matriz arcillosa y algunas veces arenosa.

g. Formación Pacacua:

La Formación Pacacua ha sido estudiada por diversos autores: Castillo (1969), Rivier (1979), Denyer y Arias (1991), Hernández y Vargas (1992), y más

recientemente Soto *et al.* (2012). Los estudios más recientes informan que esta Formación está compuesta por estratificaciones de areniscas vulcanoclásticas, tobas, tobetas y brechas de diversas granulometrías y colores, así como conglomerados fosilíferos. Además, presentan diques y sills de diabasa, así como troncos fósiles (Denyer y Arias 1991, Hernández y Vargas 1992). Según Soto *et al.* (2012), litológicamente esta formación corresponde con areniscas finas a medias de coloración morado grisáceo y conglomerados brechosos polimícticos, con fragmentos de lava de tamaños milimétricos a centimétricos, los cuales flotan dentro de una matriz soldada de tonalidades verdosas. También afloran tobas y en algunos sectores, areniscas finas con un alto grado de silicificación, caracterizadas por su tonalidad rojiza y alta dureza.

En cuanto a la geomorfología, Denyer y Kussmaul (2000) mencionan que la Zona Protectora de los Cerros de Escazú se enmarca dentro de las formas originadas por la acción intrusiva. En donde destaca el macizo de Escazú y la loma del Alto de las Palomas, las cuales poseen laderas con pendientes fuertes, en muchos casos verticales, con divisorias angostas y afiladas, constituidas principalmente por rocas de origen intrusivo y metamórficas.

El origen se debe al ascenso de los cuerpos intrusivos y su posterior erosión o a la acción silicificante de los fluidos hidrotermales. El estudio de Soto *et al.* (2012), menciona 12 unidades geomorfológicas distribuidas en tres principales formas: a. Formas de origen denudacional, b. Formas de origen estructural y c. Formas de origen Fluvial.

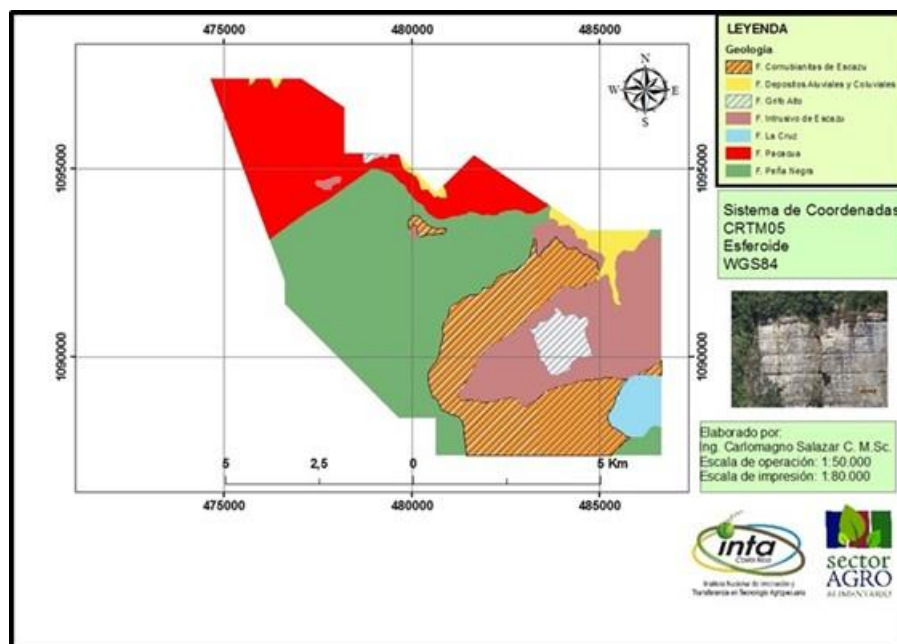


Figura 3. Mapa Geológico de los Cerros de Escazú, 2019. Adaptado de Denyer y Arias (1990).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los perfiles modales se determinaron mediante una hoja Excel que posee el INTA, en donde se respaldan todos los cateos u observaciones simples por Orden de suelo y la hoja Excel determina el cateo más representativo o típico (moda) del total de puntos por Orden de suelo (Figura 2), seguidamente se procede a realizar las calicatas para describir y muestrear toda las características morfológicas de rigor, con la finalidad de obtener los resultados químicos y físicos

de estos suelos y en particular se toman muestras para mineralogía de arcillas, según las normas de la llave taxonómica del USDA (2014), cuyas profundidades a que se toma la muestra, se realiza según sea el Orden del suelo; finalmente con todos esos datos se clasifican los suelos hasta el nivel de familia mineralógica. El análisis mineralógico de las muestras de suelo de los perfiles modales encontrados en la zona protectora de los Cerros de Escazú, se realizó mediante dos técnicas: rayos X para los minerales cristalinos y conteo de granos en el microscopio petrográfico de luz polarizada para los minerales amorfos o para-cristalinos. La metodología de difracción de rayos X en polvos, adaptada del método de Carter (1993), se empleó para la preparación de las muestras de arcilla y su correspondiente análisis mineralógico. De tal manera, se tomó cada muestra y luego de destruir la materia orgánica (MO) con peróxido de hidrógeno al 30% (H_2O_2), se pesó 50 g de suelo seco (secado al horno a $60^\circ C$) a los que se les aplicó 100 ml de Calgón (hexametáfosfato de sodio + carbonato de sodio) y 100 ml de agua para dejar en agitación por 16 horas en un agitador del tipo horizontal. A las muestras de suelo no se les destruyó los carbonatos porque no se encontraron suelos con contenido de calizas, tampoco se destruyó los sesquióxidos ya que estos se consideran que forman parte de las arcillas. El contenido de los frascos plásticos donde se agitó las muestras se trasvasó a una probeta de 1000 ml a través de una criba de 50 micrones para separar físicamente la fracción arena de las fracciones arcilla y limo, según el método de la sedimentación basado en la Ley de Stokes. La suspensión de arcilla con limo se agitó por 10 segundos y se dejó reposar por dos horas, tiempo necesario para la deposición de la fracción limo. La arcilla en suspensión se separó empleando una pipeta de succión bucal a un recipiente con capacidad para dos litros. Posteriormente, se realizó una segunda agitación de la arcilla en suspensión por 10 segundos y se esperó dos horas para separar cualquier partícula de limo no separada previamente.

Las arenas lavadas al inicio, se depositaron en un tubo plástico y se centrifugaron a 2400 rpm por 20 minutos. Seguidamente se decantó el agua limpia y las muestras se secaron al aire a $60^\circ C$ por 24 horas. El mismo método se realizó para los limos removidos del fondo de la probeta. A la fracción arcilla se les agregó 50 ml de cloruro de magnesio ($MgCl_2$) de manera que quedaran precipitadas y saturadas de Mg. Después de dos días en reposo, se observó las arcillas precipitadas y un líquido supernatante, el cual se extrajo con una manguera de niveles por diferencia de gravedad y succión bucal. El resto del contenido se colocó en tubos Eppendorf y se centrifugó por un tiempo de 30 minutos a 2400 rpm, se decantó el líquido claro, el precipitado se lavó nuevamente con agua y se volvió a colocar en la centrífuga por 15 minutos. Luego de decantar el sólido se agregaron 10 ml de acetona [$(CH_3)_2 CO$] y se colocó en la centrífuga por cinco minutos, se decantó nuevamente y se secaron al aire a $60^\circ C$. Las muestras de arcilla después de secadas, se pulverizaron en un mortero para luego analizarlas en un difractómetro Rigaku Mini-flex 600 D4, propiedad del Centro de Servicio y Diseño del ICE, por parte de ingeniería geológica. El análisis de difracción de los minerales presentes en las arcillas se realizó con la técnica de difracción de rayos X en polvo. El procedimiento metodológico en el ICE consistió en realización de los barridos difractométricos a cada una de las muestras, para lo cual se colocó la arcilla de suelo en un porta-muestras de vidrio y se barrió en el difractómetro con un rango de $2,5^\circ$ a 35° .

Para la identificación de los constituyentes de la muestra se utilizó la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

Una vez procesadas las muestras, se compararon los patrones de difracción (difractogramas), siguiendo la metodología de Burt (2004). Se estableció un patrón de los picos (difractograma) de los minerales presentes, el cual se comparó para cada una de las familias de arcillas que concuerdan con dicho patrón y de esta manera se obtuvo las muestras más representativas, es decir, las arcillas dominantes de cada perfil modal, para finalmente llegar a la clasificación de familias mineralógicas según la Keys to Soil Taxonomy (2014, doceava edición).

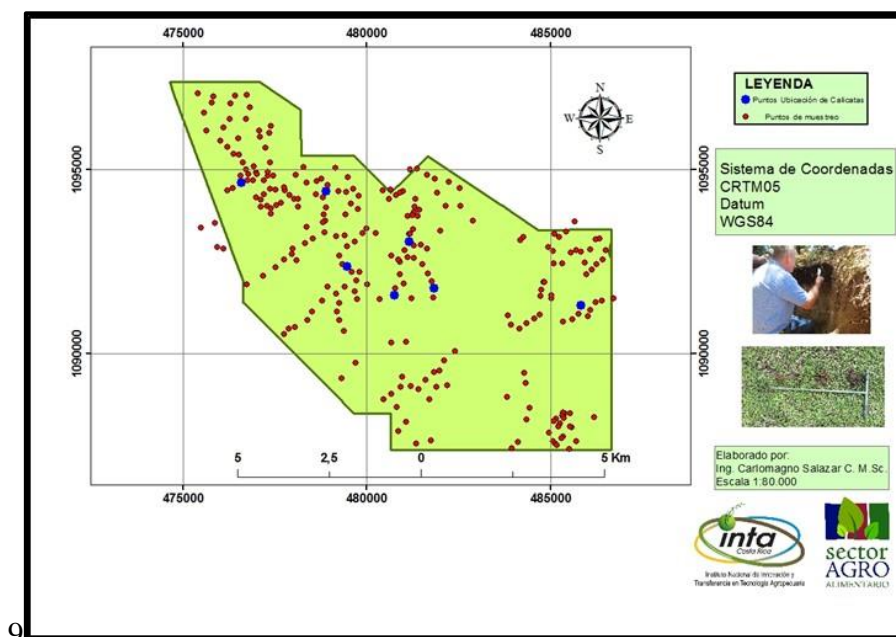


Figura 3. Mapa de puntos de ubicación de barrenadas simples y calicatas en la Zona Protectora de los Cerros de Escazú. San José, Costa Rica, 2019.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se mencionó en el resumen, en una primera fase del estudio a escala 1:50.000, se clasificaron los suelos hasta el nivel de Subgrupo y en una segunda etapa, una vez obtenidos los resultados de los minerales presentes en la fracción arcilla y arena, se reclasificaron taxonómicamente los suelos al nivel de Familia mineralógica, guardando la misma escala (1:50.000). En la zona protectora de los Cerros de Escazú, se encontró tres órdenes de suelos, correspondientes a Ultisoles, Inceptisoles y Entisoles, divididos en cinco Subórdenes: Humults, Ustults, Ustepts, Orthents, Psamments, que a su vez se concentraron en cinco Grandes Grupos: Haplohumults, Paleustults, Humustepts, Ustorthents, Ustipsamments, y seis Subgrupos: Ustic Haplohumults, Typic Paleustults, Andic Humustepts, Typic Humustepts, Lithic Ustorthents, Typic Ustipsamments, los cuales finalmente se clasificaron a nivel de seis familias mineralógicas: Fine loamy, Mixed, Isothermic Ustic Haplohumult; Fine, Mixed, Isothermic Typic Paleustult; Fine, Mixed, Isothermic Typic Humustept; Fine loamy, Mixed, Isothermic Andic Humustept; Coarse loamy, Mixed, Isomesic Typic Ustipsamment, Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent. Todas estas

clases de suelo se distribuyen en diez unidades cartográficas, en donde predominaron las asociaciones (Cuadro 1).

Como parte de los resultados, se realizó un resumen de los minerales encontrados en cada pedón, así como su litología de origen y la geomorfología encontrada por Zúñiga (2007), de acuerdo a tres diferentes pisos altitudinales, de 800-1.400 msnm, Fluvial y Aluvial, de 1.400-2.000 msnm, Coluvios y Sedimentos del Cuaternario, de 2.000-2.400 msnm, Sedimentario-Intrusivo (Cuadro 2). Posteriormente, se anotan los resultados de cada pedón en forma individual.

Cuadro 1. Resumen de unidades cartográficas y edáficas, San José, Costa Rica, 2019

Unidad Cartográfica	Unidad Taxonómica	Área	
		ha	%
Asociación Escazú	Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent	479,07	6,67
	Fine loamy, Mixed, Isothermic Andic Humustept	177,43	2,47
	Coarse loamy, Mixed, Isomesic Typic Ustipsamment	150,82	2,10
	Fine loamy, Mixed, Isothermic Ustic Haplohumult	79,85	1,11
Subtotal		887,17	12,36
Asociación San Miguel	Coarse loamy, Mixed, Isomesic Typic Ustipsamment	371	5,17
	Fine loamy, Mixed, Isothermic Andic Humustept	204,05	2,84
	Fine loamy, Mixed, Isothermic Ustic Haplohumult	37,11	0,52
	Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent	6,18	0,09
Subtotal		618,34	8,62
Asociación Cedral	Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent	240,04	3,34
	Fine loamy, Mixed, Isothermic Andic Humustept	102,31	1,42
	Coarse loamy, Mixed, Isomesic Typic Ustipsamment	51,16	0,71
Subtotal		393,51	5,48
Asociación Jaulares	Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent	886,05	12,35
	Fine loamy, Mixed, Isothermic Andic Humustept	543,06	7,57
Subtotal		1429,11	19,92
Asociación Tabarcia	Fine, Mixed, Isothermic Typic Paleustult	632,06	8,81
	Fine loamy, Mixed, Isothermic Andic Humustept	373,02	5,20
	Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent	20,72	0,29
	Fine, Mixed, Isothermic Typic Humustept	10,36	0,14
Subtotal		1036,16	14,44
Asociación Salitral	Fine loamy, Mixed, Isothermic Ustic Haplohumult	283,96	3,96
	Fine, Mixed, Isothermic Typic Humustept	121,7	1,70
	Fine, Mixed, Isothermic Typic Paleustult	104,31	1,45
	Fine loamy, Mixed, Isothermic Andic Humustept	63,75	0,89
	Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent	5,79	0,08
Subtotal		579,51	8,08
Asociación Matinilla	Fine loamy, Mixed, Isothermic Andic Humustept	208,12	2,90
	Fine loamy, Mixed, Isothermic Ustic Haplohumult	174,82	2,44
	Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent	33,3	0,46
Subtotal		416,24	5,80
Asociación Pabellón	Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent	105,39	1,47
	Fine loamy, Mixed, Isothermic Andic Humustept	57,02	0,80
	Fine, Mixed, Isothermic Typic Humustept	10,37	0,14
Subtotal		172,78	2,41
Asociación Pacacua	Fine, Mixed, Isothermic Typic Paleustult	406,9	5,67
	Fine, Mixed, Isothermic Typic Humustept	359,59	5,01
	Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent	179,79	2,51
Subtotal		946,28	13,19
Asociación Río Oro	Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent	382,75	5,34
	Fine, Mixed, Isothermic Typic Paleustult	201,81	2,81
	Fine, Mixed, Isothermic Typic Humustept	111,34	1,55
Subtotal		695,9	9,70
Total		7175,00	100,00

Cuadro 2. Resumen de minerales encontrados por pedón, con su correspondiente litología y geomorfología

Pedón	Nombre Taxonómico	Geomorfología	Litología	Minerales Identificados
CU-1	Fine, Mixed, Isothermic Typic Paleustult	Coluvios y sedimentos del Cuaternario	Areniscas vulcanoclásticas, tobas, tobitas y brechas, Conglomerados fosilíferos, lutitas negras, cuarzo, plagioclasas, piroxenos, óxidos de hierro, ortosa y clastos volcánicos, lavas andesíticas, intrusivos y corneanas.	Oxidos de silicio (cuarzo y tridimita) y halloysitas.
CU-2	Fine loamy, Mixed, Isothermic Ustic Haplohumult	Coluvios y sedimentos del Cuaternario	Areniscas vulcanoclásticas, tobas, tobitas y brechas, Conglomerados fosilíferos, lutitas negras, cuarzo, plagioclasas, piroxenos, óxidos de hierro, ortosa y clastos volcánicos, lavas andesíticas, intrusivos y corneanas. Monzonitas, granodioritas, monzogabros, monzodioritas, gabros y sienitas.	óxidos de silicio (cuarzo, tridimita y la cristobalita), hidróxidos de aluminio (gibbsita), halloysitas 7 A, y cloritas.
CE-1	Coarse-loamy, Mixed, Isomesic Typic Ustipsamment	Sedimentario-Intrusivo	monzonitas, granodioritas, monzogabros, monzodioritas, gabros y sienitas. Lavas andesíticas, intrusivos y corneanas, basaltos, dacitas y secuencias de flujos piroclásticos, con bloques lávicos y escoriáceos, así como depósitos ignimbríticos.	Oxidos de silicio (cuarzo, tridimita y la cristobalita), hidróxidos de aluminio (gibbsita), cloritas, halloysitas, y feldespatos alterados. Plagioclasa, ortosa, hornblenda, augita, biotita, magnetita y cuarzo.
CE-2	Coarse-loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent	Coluvios y sedimentos del Cuaternario	monzonitas, granodioritas, monzogabros, monzodioritas, gabros y sienitas. Lavas andesíticas, intrusivos y corneanas, basaltos, dacitas y secuencias de flujos piroclásticos, con bloques lávicos y escoriáceos, así como depósitos ignimbríticos. Cornubianitas y areniscas, lutitas negras, cuarzo, plagioclasas, piroxenos, óxidos de hierro, ortosa y clastos volcánicos. Basaltos, andesitas y tobas, conglomerados y brechas volcánicas, areniscas vulcanoclásticas, y tobitas.	Oxidos de silicio (cuarzo, tridimita y la cristobalita), hidróxidos de aluminio (gibbsita), halloysitas, y cloritas.
CE-3	Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent	Fluvial Aluvial	monzonitas, granodioritas, monzogabros, monzodioritas, gabros y sienitas. Lavas andesíticas, intrusivos y corneanas, basaltos, dacitas y secuencias de flujos piroclásticos, con bloques lávicos y escoriáceos, así como depósitos ignimbríticos. Cornubianitas y areniscas, lutitas negras, cuarzo, plagioclasas, piroxenos, óxidos de hierro, ortosa y clastos volcánicos. Basaltos, andesitas y tobas, conglomerados y brechas volcánicas, areniscas vulcanoclásticas, y tobitas.	Oxidos de silicio (cuarzo, tridimita y cristobalita), además de feldespatos alterados y halloysita.
CI-1	Fine, Mixed, Isothermic Typic Humustept	Coluvios y sedimentos del Cuaternario	Areniscas vulcanoclásticas, tobas, tobitas y brechas, conglomerados fosilíferos. Monzonitas, granodioritas, monzogabros, monzodioritas, gabros y sienitas.	Oxidos de silicio (cuarzo, tridimita y la cristobalita), hidróxidos de aluminio (gibbsita), óxidos de hierro (magnetita), además de halloysitas.
CI-2	Fine loamy, Mixed, Isothermic Andic Humustept	Coluvios y sedimentos del Cuaternario	monzonitas, granodioritas, monzogabros, monzodioritas, gabros y sienitas. Lavas andesíticas, intrusivos y corneanas, basaltos, dacitas y secuencias de flujos piroclásticos, con bloques lávicos y escoriáceos, así como depósitos ignimbríticos. Cornubianitas y areniscas, lutitas negras, cuarzo, plagioclasas, piroxenos, óxidos de hierro, ortosa y clastos volcánicos. Basaltos, andesitas y tobas, conglomerados y brechas volcánicas, areniscas vulcanoclásticas, y tobitas. lavas andesíticas con tonalidades grises y rojizas. Se encuentran rocas volcánicas como dacitas y secuencias de flujos piroclásticos, con bloques lávicos y escoriáceos, así como depósitos ignimbríticos.	óxidos de silicio (cuarzo, tridimita y la cristobalita), hidróxidos de aluminio (gibbsita), óxidos de hierro (magnetita), además de halloysitas y feldespatos alterados.

Pedón CU-1

Este perfil modal representa a los suelos clasificados como: Fine, Mixed, Isothermic Typic Paleustult. En estos suelos de mineralogía mezclada se encontraron minerales como: óxidos de silicio (cuarzo y tridimita) y halloysitas 7 Å, que como lo muestra su litología, hay predominancia de materiales vulcanoclásticos, por tal motivo es muy común encontrar halloysitas y de las tobas se derivan los óxidos de silicio (cuarzo y tridimita) (Cuadro 2) (Figura 4).

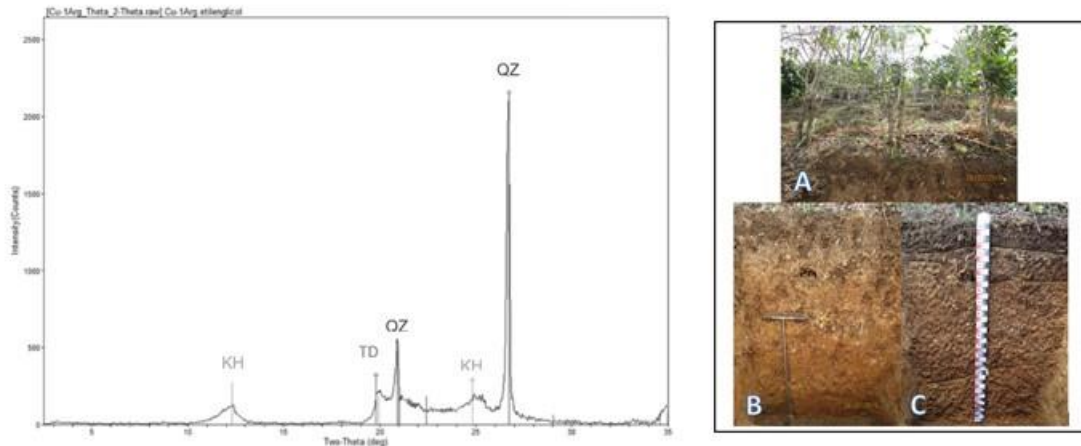


Figura 4. A la izquierda, difractograma del pedón CU-1. QZ=cuarzo, TD=tridimita y KH=halloysita. A la derecha, detalle del perfil modal CU-1 (typic Paleustults). A). cobertura y uso actual, B) perfil natural y C) separación de horizontes. San José, Costa Rica, 2019.

Pedón CU-2

Este perfil modal representa a los suelos clasificados como: Fine loamy, Mixed, Isothermic Ustic Haplohumult. En estos suelos de mineralogía mezclada se formó otro suelo del Orden de los Ultisoles, se encontraron minerales como: óxidos de silicio (cuarzo, tridimita y la cristobalita), hidróxidos de aluminio (gibbsita), halloysitas 7 Å, y cloritas, todos derivados de materiales vulcanoclásticos como lo muestra su litología (Cuadro 2) (Figura 5).

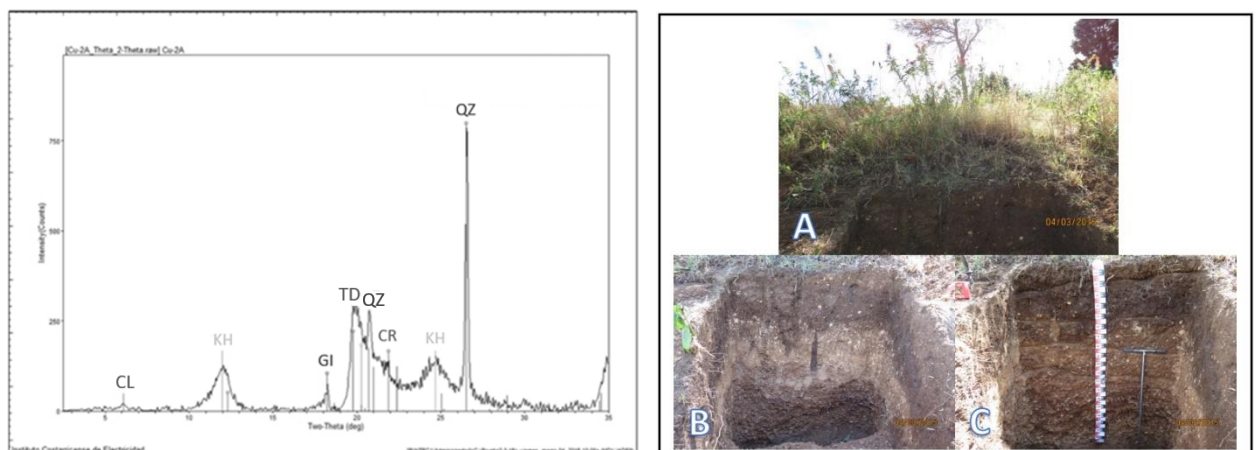


Figura 5. A la izquierda, difractograma del pedón CU-2. QZ= cuarzo, TD=tridimita, KH=halloysita, GI=gibbsita, CR=cristobalita y CL=clorita. A la derecha, detalle del perfil modal CU-2 (Ustic Haplohumults). A) cobertura y uso actual, B) perfil natural y C) separación de horizontes. San José, Costa Rica, 2019.

Pedón CE-1

Este perfil modal representa a los suelos clasificados como: Coarse loamy, Mixed, Isomesic Typic Ustipsammet. En estos suelos de mineralogía mezclada se encontraron (vía difractómetro) minerales como: óxidos de silicio (cuarzo, tridimita y la cristobalita), derivados posiblemente de los depósitos ignimbríticos (Cuadro 2), hidróxidos de aluminio (gibbsita), cloritas, halloysitas 7 Å, y feldespatos alterados, provenientes de la gran diversidad de otros materiales intemperizados de las rocas intrusivas y corneanas (Figura 6).

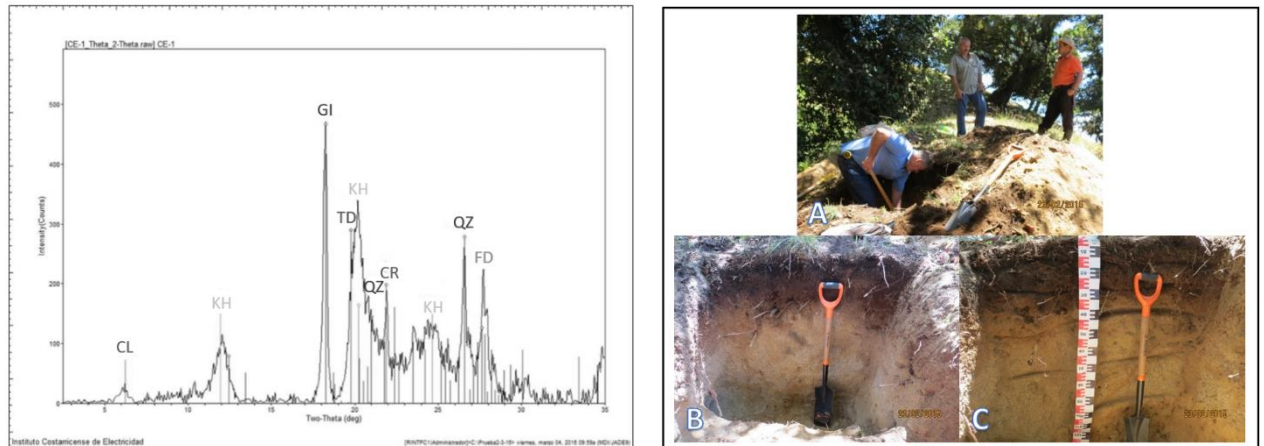


Figura 6. A la izquierda, difractograma del pedón CE-1. QZ=cuarzo, TD=tridimita, KH=halloysita, GI=gibbsita, CR=cristobalita, CL=clorita y FD=feldespatos alterados. A la derecha, detalle del perfil modal CE-1 (Typic Ustipsammet). A) cobertura y uso actual, B) perfil natural y C) separación de horizontes. San José, Costa Rica, 2019.

A este pedón, por ser un Psammet, se le realizó un barrido de la fracción gruesa (arena) en el estereoscopio y microscopio de luz polarizada del departamento de Ingeniería Geológica, perteneciente al área del Centro de Servicio y Diseño del ICE. Dicho análisis se realizó a una muestra esencialmente de cristales (se observan en grupos o separados), así como en fragmentos alterados de forma parcial a total, donde se reporta la siguiente descripción petrográfica:

Plagioclasa (36%): casi siempre sana (poca alteración a arcillas), con

Ortosa (feldespato potásico) (14%): sano a poco alterado a arcillas, con inclusiones.

Hornblenda (anfíbol) (6%): sano a poco alterado (arcillas, óxidos de hierro), abundante.

Augita (piroxeno) (5%): escaso, sano hasta alterado a arcillas.

Biotita (mica) (7%): Pocos cristales, tamaño pequeño, sanos a poco alterados.

Magnetita (4%): Aparece como cristales solo, fragmentos alterados y también aparece sano.

Fragmentos alterados (15%): se trata de fragmentos de roca muy arcillificados y en algunos casos aparecen con óxidos-hidróxidos de hierro. Aún así, se logran identificar magnetita, biotita, plagioclasas y piroxenos (augita) sanos.

Fragmentos sanos (12%): conjunto de cristales donde se identifica claramente la textura de una roca intrusiva.

Cuarzo (1%): pocos cristales, sanos.

De acuerdo con la mineralogía y rasgos texturales observados, resulta evidente que tanto los cristales sanos como el material alterado corresponden a la misma roca fuente y que particularmente, corresponde con las rocas ígneas intrusivas asociadas al llamado Intrusivo de Escazú (Figuras 7 y 8).

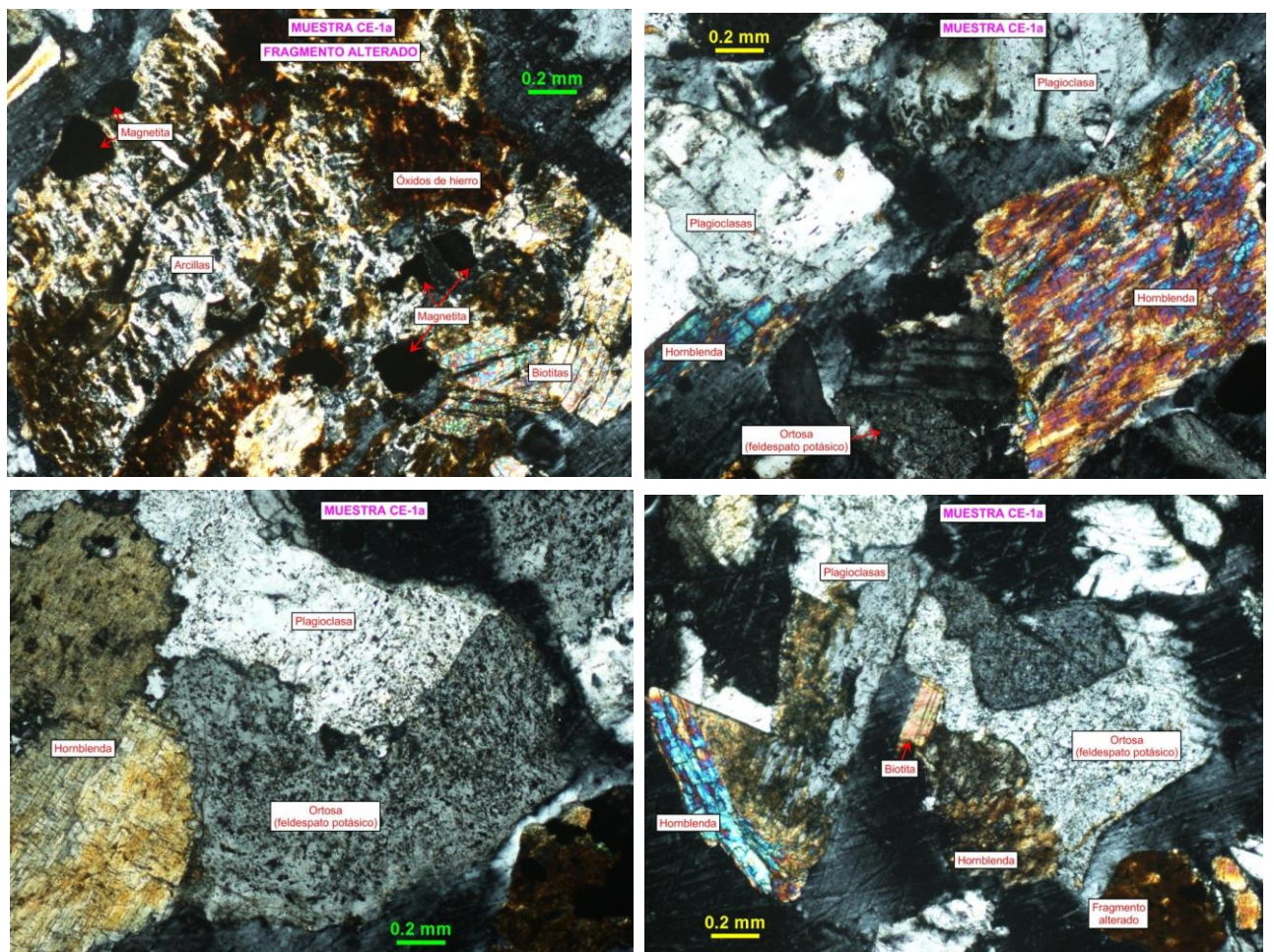


Figura 7. Arriba a la izquierda, Fragmento de roca alterado a arcillas y óxidos de hierro, con magnetita y biotita aún sanos (Técnica Nícoles paralelos). Arriba a la derecha, fragmento de roca sano y de textura granular típico (intrusivo), con plagioclasas, hornblendas y ortosa (feldespato potásico) (Técnica Nícoles cruzados). Abajo a la izquierda, fragmento de roca sano y de textura granular típico (intrusivo), con plagioclasas, hornblenda y ortosa (feldespato potásico) (Técnica Nícoles cruzados). Abajo a la derecha, cristales sanos a poco alterados de hornblenda, biotita, ortosa y plagioclasa. Esquina inferior derecha, fragmento alterado (Técnica Nícoles cruzados). San José, Costa Rica, 2019.

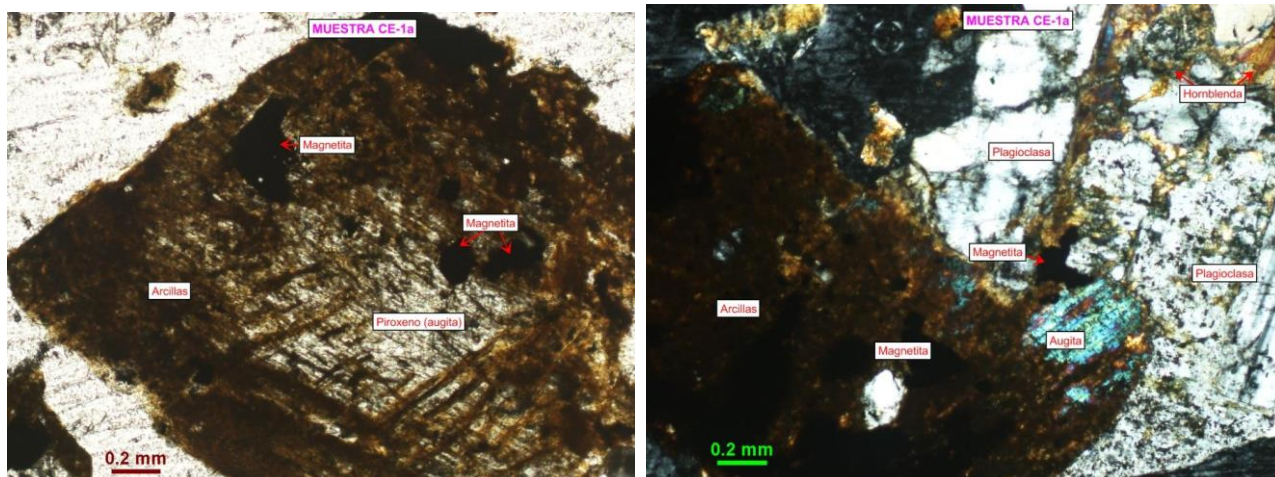


Figura 8. A la izquierda, Augita (piroxeno) parcialmente alterado a arcillas, con magnetita sanas, (Técnica Nícoles paralelos). A la derecha, Augita (piroxeno) parcialmente alterado a arcillas, con magnetita, hornblenda, y plagioclasas sanas (Técnica Nícoles cruzados). San José, Costa Rica, 2019.

Pedón CE-2

Este perfil modal representa a los suelos clasificados como: Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent. En estos suelos de mineralogía mezclada se encontraron minerales como: óxidos de silicio (cuarzo, tridimita y cristobalita), los cuales se derivan de los depósitos de ignimbritas y el resto de minerales encontrados se heredan principalmente de materiales vulcanoclásticos (Cuadro 2), como los hidróxidos de aluminio (gibbsita), óxidos de hierro (magnetita), cloritas, y feldespatos alterados (Figura 9).

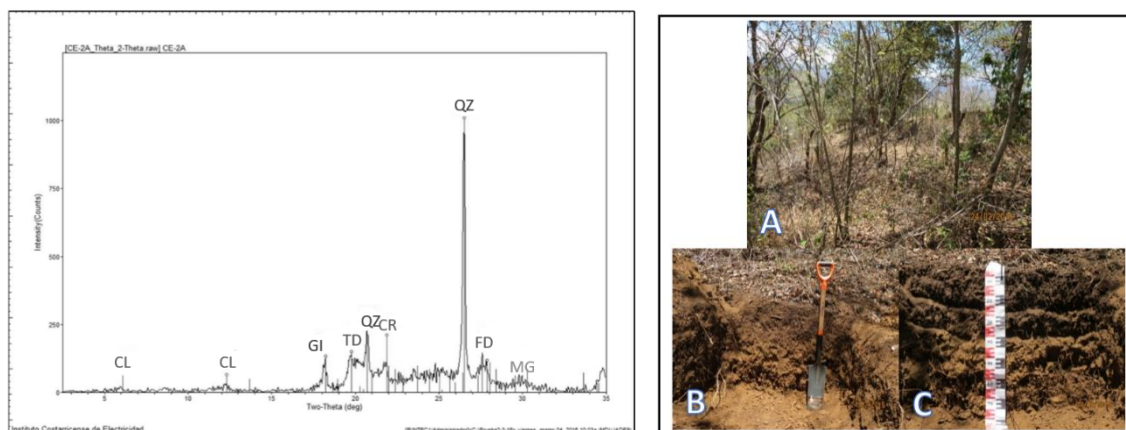


Figura 9. A la izquierda, difractograma del pedón CE-2. QZ=cuarzo, TD=tridimita, GI=gibbsita, CR=cristobalita, MG=magnetita, CL=clorita y FD= feldespatos alterados. A la derecha, detalle del perfil modal CE-2 (Lithic Ustorthents). A) cobertura y uso actual, B) perfil natural y C) separación de horizontes. San José, Costa Rica, 2019.

Pedón CE-3

Este perfil modal representa a los suelos clasificados como: Coarse loamy, Mixed, Isothermic Lithic Ustorthent. En estos suelos de mineralogía mezclada se encontraron minerales como: óxidos de silicio (cuarzo, tridimita y cristobalita), igualmente derivados de los depósitos de ignimbritas, según su litología, además de feldespatos alterados y halloysita 7 Å, que son producto de los materiales vulcanoclásticos (Cuadro 2) (Figura 10).

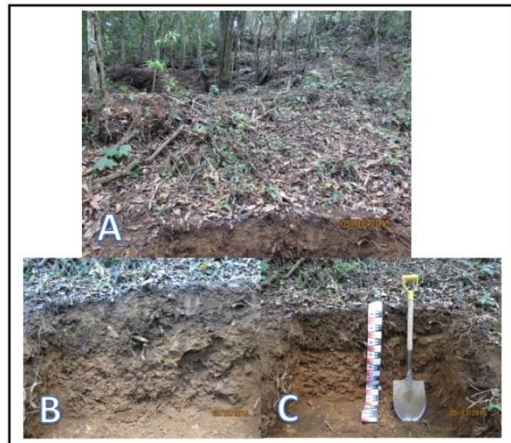
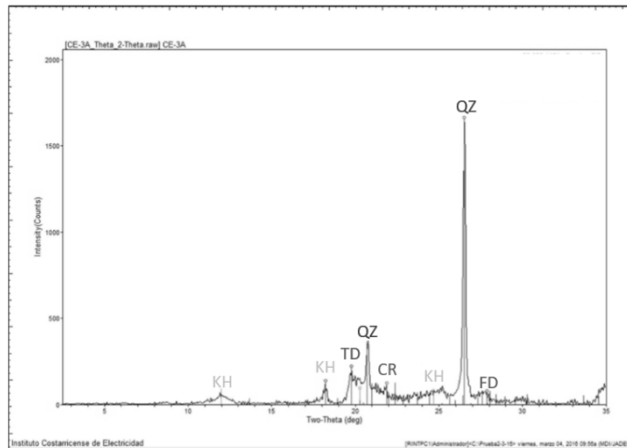


Figura 10. A la izquierda, difractograma del pedón CE-3. QZ=cuarzo, TD=tridimita, KH=halloysita, CR=cristobalita y FD=feldespatos alterados. A la derecha, detalle del perfil modal CE-3 (Lithic Ustorthents). A) cobertura y uso actual, B) perfil natural y C) separación de horizontes. San José, Costa Rica, 2019.

Pedón CI-1

Este perfil modal representa a los suelos clasificados como: Fine, Mixed, Isothermic Typic Humustept. En estos suelos de mineralogía mezclada se encontraron minerales como: óxidos de silicio (cuarzo, tridimita y la cristobalita), que pueden derivarse de la toba, y el resto de la mineralogía encontrada es producto de los materiales vulcanoclásticos, como hidróxidos de aluminio (gibbsita), óxidos de hierro (magnetita), además de halloysitas 7 Å (Cuadro 2) (Figura 11).

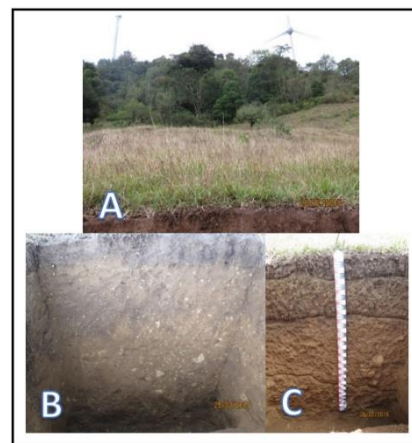
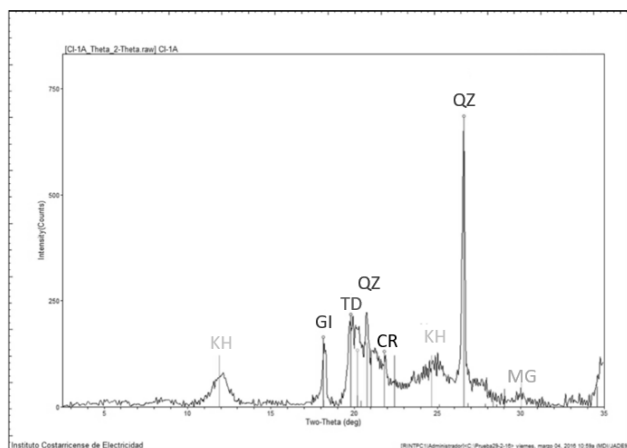


Figura 11. A la izquierda, difractograma del pedón CI-1. QZ= cuarzo, TD=tridimita, KH=halloysita, GI=gibbsita, CR=cristobalita y MG=magnetita. A la derecha, detalle del perfil modal CI-2 (Typic Humustept). A) cobertura y uso actual, B) perfil natural y C) separación de horizontes. San José, Costa Rica, 2019.

Pedón CI-2

Este perfil modal representa a los suelos clasificados como: Fine loamy, Mixed, Isothermic Andic Humustept. En estos suelos de mineralogía mezclada se encontraron minerales como: óxidos de silicio (cuarzo, tridimita y la cristobalita), que se derivan de ignimbritas, y el resto de minerales encontrados, se originan de materiales vulcanoclásticos y de la gran diversidad de materiales en su

litología, como los hidróxidos de aluminio (gibbsita), óxidos de hierro (magnetita), además de halloysitas 7 Å y feldespatos alterados (Cuadro 2) (Figura 12).

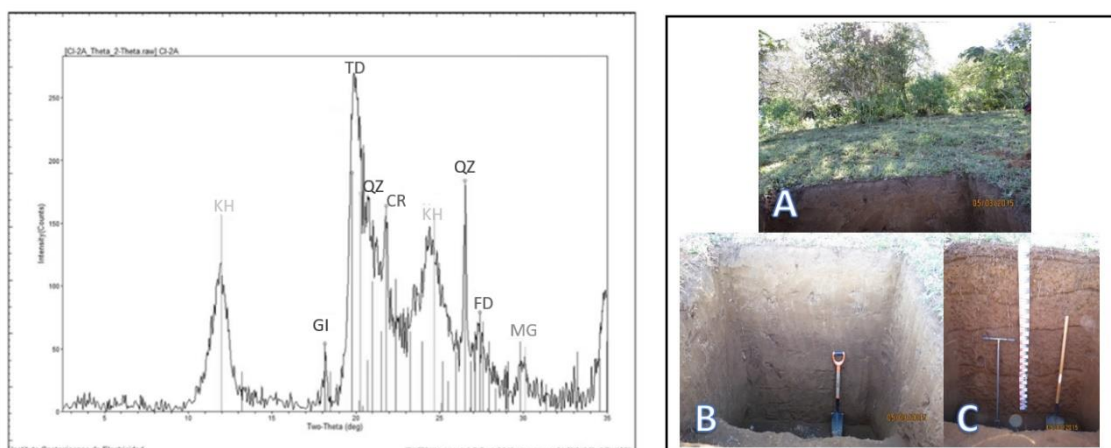


Figura 13. A la izquierda, difractograma del pedón CI-2. QZ=cuarzo, TD=tridimita, KH=halloysita, GI=gibbsita, CR=cristobalita, MG=magnetita y FD=feldespatos alterados. A la derecha, detalle del perfil modal CI-2 (Andic Humustepts). A) cobertura y uso actual, B) perfil natural y C) separación de horizontes. San José, Costa Rica, 2019.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la zona protectora “Cerros de Escazú”, se evidencia que en el 100% de las muestras procesadas, se encontró óxidos de silicio como cuarzo y tridimita y en un 86%, los mismos minerales asociados a cristobalita. Todos éstos minerales no arcillosos y de origen primario explican la baja actividad química del suelo y su correspondiente baja fertilidad potencial, para la futura nutrición de las plantas, por lo tanto, los Inceptisoles y Entisoles presentaron una fertilidad de media a baja.

El 86% de las muestras analizadas presentaron halloysitas dentro de su composición mineral, como mencionó Alvarado *et al.* (2014). Las arcillas de corto rango de cristalización (halloysitas) pueden presentarse en áreas de vulcanismo activo reciente, como lo fue la erupción del volcán Irazú en 1963. La formación de halloysita es el resultado de un enriquecimiento del suelo con silicio, en donde la concentración del elemento toma valores en solución del suelo $>10\text{mg.l}^{-1}$. Lo anterior, ocurre como resultado de un drenaje deficiente, déficit de humedad en determinadas épocas del año, transformación de feldespatos y pseudomorfos pumíceos en microambientes confinados (Alvarado *et al.* 2014).

La halloysita es una arcilla que se caracteriza por presentar una CIC baja, entre 10 y 50 cmol (+) l^{-1} arcilla (Besoin 1985).

Los hidróxidos de aluminio (gibbsita), se encontraron en el 71% de las muestras estudiadas. La gibbsita es el hidróxido de aluminio más común en los suelos, además, es el mineral más importante de las bauxitas y oxisoles. Puede aparecer en suelos formados de cenizas volcánicas o en espodosoles y ultisoles. Por otro lado, se presenta en los suelos tropicales como producto de la meteorización, vía desbasificación y desilicatación de arenas andesíticas (Nieuwenhuys *et al.* 1994), plagioclasas y piroxenos (Besoin 1985, Nakamura y Sherman 1965).

Según Alvarado *et al.* (2014), la gibbsita se puede formar en ambientes de alteración hidrotermal o neomatolítica, relacionados con fuentes de calor por actividad volcánica o por cizallamiento de falla.

Las cloritas y óxidos de hierro (magnetita) se encontraron en el 43% de las muestras analizadas. Las cloritas son minerales de cuatro capas (2:1:1) o tetramórficas, la mayoría dioctaédricas. Las cloritas se encuentran principalmente en rocas metamórficas, pero pueden encontrarse ocasionalmente en rocas ígneas, en donde se forman secundariamente por acción deutérica o hidrotermal (relacionada con la instauración de los intrusivos en los Cerros de Escazú) en minerales ferromagnesianos (Besoain 1985).

Las cloritas también se pueden presentar como arcillas interestratificadas, compuestas por capas 2:1 a la cual, se le une una capa de hidróxidos llamada brucita, la cual es atraída por efecto de atracción electrostática. La carga neta negativa de las capas 2:1 de la clorita es originada por la sustitución de magnesio por iones aluminio que se unen a la lámina de brucita de carga positiva. Además, se puede dar otra forma de unión menos estable en el suelo de las cloritas, la cual es por medio de puentes de H^+ . La CIC de estas arcillas es variable y baja (Alvarado *et al.* 2014).

Por su parte la magnetita (óxido de hierro), es un óxido negro heredado de las rocas parentales y tiene forma de espinela, además se presenta como frágil, con brillo metálico y fractura concoidal, con gran susceptibilidad magnética. Cuando la magnetita se oxida conduce a la maghemita (Besoain 1985).

La planificación del manejo de los suelos en una determinada región debería ir acompañado de un estudio mineralógico de las fracciones arenas y arcillas. El estudio de la fracción arena permite determinar la fertilidad potencial, en tanto que la fracción arcilla es “condicionante de la fertilidad disponible del suelo”. Los minerales de arcilla presentan cargas negativas y positivas que pueden adsorber cationes y en menor cantidad aniones, así como retener agua entre sus láminas y elementos químicos necesarios para las plantas. Las arcillas definen la fertilidad de los suelos en relación con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y aniónico (CIA) y la alta o baja saturación de bases. Además, la caracterización de los minerales presentes en un suelo, permite realizar la clasificación taxonómica a nivel de familia mineralógica (Figura 13).

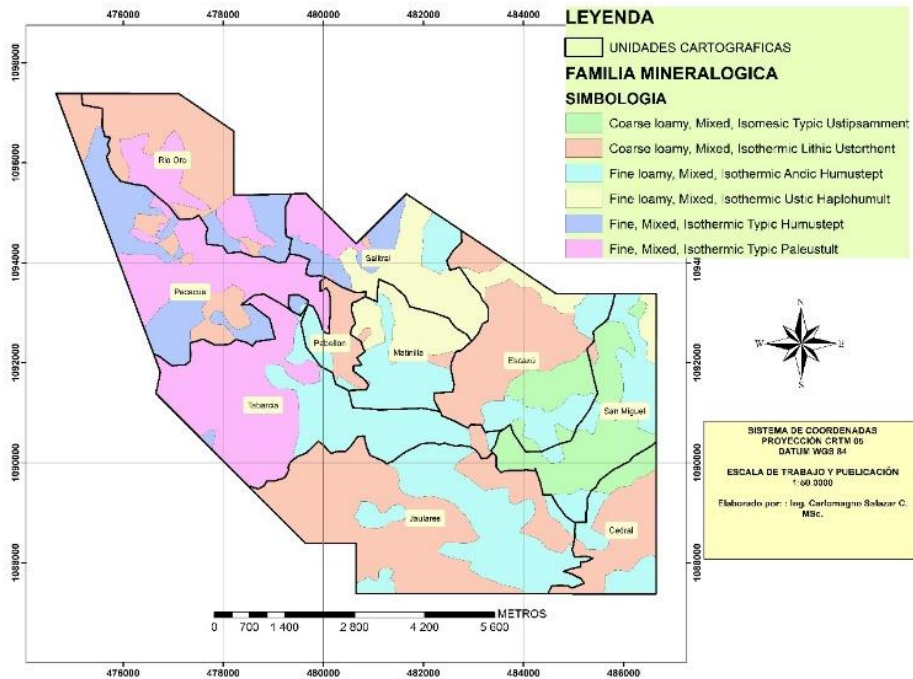


Figura 13. Mapa de unidades cartográficas y de suelos a nivel de familia mineralógica en la zona protectora “Cerros de Escazú”, San José, Costa Rica, 2019.

LITERATURA CITADA

- Alvarado, G., Arce, R. & Sánchez, J.M., 2002: La Caída de grandes bloques y la generación de debris flows y su peligro implícito en los sectores residenciales de Escazú y Santa Ana. VIII Seminario Nacional de Geotecnia. III Encuentro Centroamericano de Geotecnistas, Costa Rica.
- Alvarado, A; Mata, R; Chinchilla, M. 2014. Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: I. Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía Costarricense* 38(1):75-106.
- Arias, M; Fuentes, O; Fallas, J. 2011. Criterios utilizados para la microzonificación de la microcuenca Lajas, Cantón de Escazú, Costa Rica-Rev. En Torno a la Prevención CNE (7):1-7.
- Bergoeing, JP; Malavassi, E. 1982. Geomorfología del Valle Central de Costa Rica. Dpto. de Geografía, UCR., e IGN, San José, CR. 49 p.
- Bergoeing, JP. 1998. Geomorfología de Costa Rica. San José, CR. Instituto. Geográfico Nacional. 409 p.
- Berrangé, JP; Whittaker, J. 1977. Reconnaissance geology of the Tapantí Quadrangle, Talamanca Cordillera, Costa Rica. -Institute of Geological Sciences, London. Report 37. - 72 p.
- Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. IICA. San José, CR. 1216 p.

- Bonilla, E. 2003. Inspección a varios deslizamientos en el distrito de San Antonio, Escazú. DPM-INF-059-2003. -6 p. CNE, San José.
- Burt, R. 2004. Soil survey laboratory methods manual. USDA, Natural Resources Conservation Service. Soil survey investigations report No. 42. Ver 4. US. 700 p.
- Carter, MR. 1993. Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis publishers, US. 823 p.
- Castillo, R. 1969. Geología de los mapas básicos Abra y partes de Río Grande, Costa Rica. -40 p. Informe MEIC [Inf. Interno].
- Chaves, I. 2007: Valoración de estado de Amenaza por deslizamiento activo en el Barrio Curio. DPM-INF-1655-2007. -5 p. CNE, San José.
- Denyer, P; Arias, O. 1991. Estratigrafía de la región central de Costa Rica. - Rev. Geol. Amér. Central, 12:1-59.
- Denyer, P; Kussmaul, S. 2000. Geología de Costa Rica. Compilado. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica. 520 p.
- Denyer, P; Montero W; Alvarado, G. 2009. Atlas Tectónico de Costa Rica. 58 p. 2 ed. Edit. UCR. San José.
- Dóndoli, C. 1950. Liberia y sus alrededores. Nota Geoagronómica. San José, Ministerio de Agricultura e Industrias. Boletín Técnico No.3, p. 3-4.
- Dóndoli, C. 1970: Nota informativa para la Municipalidad de Escazú sobre las fuentes de alimentación de la cañería del lugar.- Inf. Téc. Notas Geól. MEIC (40): 15-16.
- Echandi, E. 1981. Unidades volcánicas de la vertiente norte de la cuenca del río Virilla. Tesis Lic. Univ. de Costa Rica, San José. 123 p.
- Fernández, M; Montero, W. 2002. Fallamiento y sismicidad entre Cartago y San José, Valle Central de Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, 26: 25-37.
- González, C.1910. Temblores, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas en Costa Rica, 1608-1910. Univ. de Costa Rica, San José. 200 p.
- Hernández F, JC. 1994. Caracterización Geológica-Geotécnica del Deslizamiento el Burío, cantón de Aserrí. Escuela Centroamericana de Geología, Informe Avance Comisión Nacional de Emergencia. 10 p.
- Hernández, J; Vargas, A. 1992. Geología urbana del cantón de Escazú, provincia San José, Costa Rica. Univ. de Costa Rica, San José. 173 p. Inf. Campaña Geol.

- Krushensky, R. 1972. Geology of the Istarú Quadrangle, Costa Rica. - Geological Survey Bulletin 1358. – 46 p.
- Madrigal, R; Rojas, E. 1980. Manual Descriptivo del Mapa Geomorfológico de Costa Rica (escala 1:200.000) - Imprenta Nacional, San José. 79 p.
- Madrigal, J. 2004. Problemática por deslizamiento en la parte alta de la microcuenca superior del río Agres-San Rafael. DPM-INF-349-2004.- CNE, San José. 21 p.
- Mora, R. 1993. Proyecto de Geología Urbana del Gran Área Metropolitana, Cantón Escazú. - Univ. de Costa Rica, San José. 73 p. Inf. Interno.
- Nakamura, MT; Sherman, GD. 1965. The genesis of halloysite and gibbsite from mugarite on the island of Maui. Hawaii Agricultural Experiment Station, Technical Bulletin, 62, 36 p.
- Nieuwenhuys, A; Kroonenberg, SB. 1994. Volcanic origin of Holocene beach ridges along the Caribbean coast of Costa Rica. Marine Geology 120: 13-26.
- Obando, LG. 1983. Estratigrafía y petrografía de las rocas aflorantes al sur del Valle Central (Tarbaca). Tesis Lic. Univ. de Costa Rica, San José. 136 p.
- Peraldo, G; Montero, W. 1999. Sismología histórica de América Central.- Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Publ. No. 513, México D.F. 347 p.
- Peraldo, G; Rojas, E. 2000. Catálogo de deslizamientos históricos para Costa Rica, periodo 1772-1960. –Inf. Sem. IGN, 2000 (1 y 2): 123-171 p.
- Rivier, F. 1979. Geología del área norte de los cerros de Escazú, Cordillera de Talamanca, Costa Rica. Instituto Geográfico Nacional. San José. 99-138. Inf. Semestral.
- Soto A, D; Chaves S, I; Durán M, M; Herra H, D. 2012. Susceptibilidad de deslizamiento del cantón de Escazú y análisis a detalle de cinco casos específicos: Palo Campana, Salitrillo, Curio y la Cuenca de los ríos Agres y Guayabos. Seminario de graduación, Escuela Centroamericana de Geología, Facultad de Ciencias Básicas, UCR. San José, CR. 130 p.
- Sprechman, P. 1984. Manual de Geología de Costa Rica, Estratigrafía. Ed. Univ. Costa Rica, San José. Vol 1. 320 p.
- USDA (United States Department of Agriculture) Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. 12th ed. Natural resources conservation services, US. 360 p.

Zúñiga V, W. 2007. Los Cerros de Escazú, un ejemplo del uso irracional de los paisajes (en línea). UCR, San José, CR. Reflexiones, vol. 86, núm.1. pp. 59-75. Consultado 10 may. 2021. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/729/72920534004.pdf>.