

1. Introducción

En Costa Rica, los procesos naturales son parte de la vida cotidiana de las personas; algunos de esos procesos envuelven cierto nivel de peligrosidad, ello justifica el interés del Estado por la organización del territorio a través del ordenamiento territorial y la gestión del riesgo.

La actividad geológica de Costa Rica incluye muchos procesos potencialmente adversos, tales como terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos e inundaciones. Es muy importante comprender la génesis de tales procesos y sobretodo identificar su alcance y los impactos que puedan generar en la sociedad. Investigaciones enfocadas a la optimización del desarrollo productivo y social deben considerar tales aspectos como de primer orden.

El origen de los desastres obedece a causas físico-naturales y humanas (planificación urbana desordenada, indiferencia social y política, desconocimiento científico, por ejemplo). Los desastres son, en el mejor de los casos, prevenibles, previsibles y mitigables, es decir, aunque por lo general los eventos no se puedan predecir, si se puede detectar aquellas zonas en donde un evento podría ocurrir.

El crecimiento demográfico e industrial que ha experimentado en las últimas décadas una zona como el Valle Central (construcción de obras de infraestructura y explotación de los recursos naturales) hace necesario la utilización de herramientas para la planificación y desarrollo urbano, a fin de lograr la prevención y mitigación de los desastres.

En la actualidad algunos gobiernos locales (p.e. la Municipalidad de Montes de Oca) buscan soluciones para los problemas que ha ocasionado la falta de planes de desarrollo apropiados, acordes con las condiciones y necesidades actuales. En este sentido, los planes reguladores tienen como objetivo solventar tales necesidades mediante la aplicación de conocimientos científicos de diferentes áreas profesionales. La acción integrada de expertos en campos como la geología, geografía, ingeniería, psicología, arquitectura, informática, entre otros, es esencial para cumplir con los objetivos de los planes reguladores, sin olvidar la acción conjunta que realizan los entes políticos y las comunidades involucradas.

El Cantón de Montes de Oca inició la elaboración del plan regulador desde el 24 de abril del año 2000, según la metodología propuesta por el Proyecto de Desarrollo Urbano Sostenible (ProDus) y está dividida en tres etapas: Diagnóstico, Elaboración de Propuestas y Aprobación del Plan Regulador. Precisamente es en la primera etapa en donde un diagnóstico de los procesos naturales mencionados se

hace más importante y es aquí en donde radica el objetivo de este Seminario de Graduación.

1.1 Breve Reseña Histórica, del cantón de Montes de Oca¹

En la época precolombina el territorio que actualmente corresponde al cantón de Montes de Oca estuvo habitado por indígenas del Reino Huetar de Occidente, que en los inicios de La Colonia fueron dominio del Cacique Garabito.

Por el año de 1700 se conocía lo que hoy es San Pedro, con el nombre de Santiago de la Granadilla, que después tomó el nombre de La Villa de San Pedro de Mojón, cuya denominación provino del mojón geográfico que señalaba el límite entre este distrito con el de San José, hito que se conocía como El Mojón de la Legua de Curridabat.

Entre sus primeros pobladores están los señores José María Sequiera, Baltazar Cordero, José María Delgado, Idelfonso Rojas, Julián Villalobos, Blas Quesada, Santiago Castillo, José Nicolás Prado, Marcelino Zúñiga, Santana Sibaja, Coferino Quesada, José María Muñoz y muchos más. La mayoría de ellos eran agricultores que se dedicaron al cultivo del café, que por esos tiempos, era la actividad agrícola que predominaba en la región.

Se afirma que donde hoy se encuentra el Parque Kennedy, se hallaba un sesteo para el descanso de los animales de los viajeros, que iban de Cartago a San José y que pasaban la noche en este lugar hasta el amanecer, porque no podían circular en la capital antes de las seis de la mañana. Fue precisamente en ese sitio donde se originó una escaramuza como consecuencia de los acontecimientos de octubre de 1835, la llamada Guerra de la Liga.

En la administración de don Alfredo González Flores, el 2 de agosto de 1915, en la Ley N° 45, se le otorgó el título de Villa a la población de San Pedro, cabecera del Cantón creada en esa oportunidad. El 14 de noviembre de 1961, en el gobierno de don Mario Echandi Jiménez, se decretó la Ley N° 2874, que le confirió a la Villa la categoría de Ciudad.

El 1° de enero de 1916 se llevó a cabo la primera Sesión de Concejo de Montes de Oca, integrado por los regidores propietarios Ramón Hernández Loría, Vidal López Aguilar y Timoteo Aguilar. El secretario municipal fue Domingo Monge Rojas y el jefe político José Joaquín Zavaleta Volio.

¹ Tomado de Montero 2003.

El nombre del cantón es en homenaje a don Faustino Montes de Oca, ilustre ciudadano que se interesó por las necesidades y el progreso de esta comunidad.

El área de estudio se localiza en el Valle Central, precisamente en el Cantón de Montes de Oca, el cual tiene un área superficial de 15,5 km², que está distribuida en sus cuatro distritos: 1° San Pedro, 2° Sabanilla, 3° Mercedes y 4° San Rafael. (Fig. 1.1).

1.2 Ubicación del área de estudio

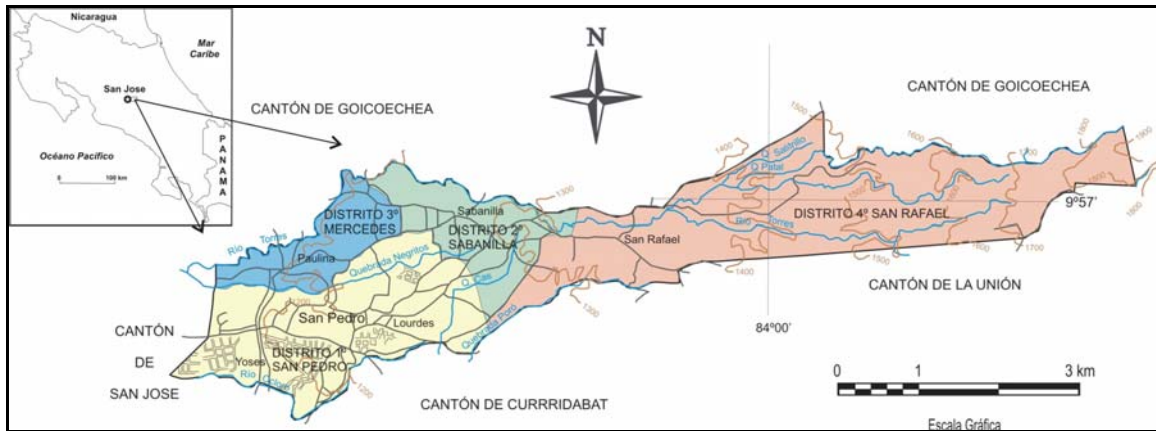


Figura 1.1: Figura de ubicación del área de estudio.

1.3 Objetivos.

Objetivo general

Realizar el diagnóstico de procesos naturales que puedan afectar (deslizamientos, inundaciones, sismicidad y vulcanismo) directa o indirectamente al cantón de Montes de Oca, como insumo para el Plan Regulador propuesto por el municipio.

Objetivos específicos

Describir y determinar la(s) litología(s) presente(s) en el cantón de Montes de Oca para elaborar el mapa geológico respectivo.

Evaluar las características físico-mecánicas de los suelos del Municipio, como aporte al desarrollo de obras civiles del cantón.

Elaborar el mapa geomorfológico del cantón y establecer las áreas susceptibles a las inundaciones de origen natural y las inundaciones de carácter antrópico.

Determinar las causas de las inundaciones antrópicas en el Municipio y proponer medidas de corrección. Realizar una clasificación y caracterización de los deslizamientos existentes dentro del cantón, elaborar el mapa de susceptibilidad al deslizamiento, establecer una zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento y elaborar un mapa de uso de suelo recomendado.

Realizar el inventario de fallas cercanas al cantón y confeccionar el mapa de fallas neotectónicas y/o fallas activas.

Reconocer la presencia de estructuras neotectónicas en el área de estudio y zonas aledañas y complementar de esa manera el mapa de fallas neotectónicas y/o fallas activas.

Revisar la sismicidad histórica para el Valle Central para conocer el historial de las fuentes sísmicas más importantes dentro del mismo y detallar en los efectos que ha causado en el cantón de Montes de Oca.

Revisar y analizar la sismicidad reciente en las zonas cercanas al municipio para brindar así un panorama del contexto sísmico actual y su relación con las fuentes sísmicas.

Revisar, identificar y diagnosticar los peligros volcánicos que puedan presentarse y afectar al área de estudio para confeccionar el mapa de peligros volcánicos.

Implementar la información obtenida en una base de datos digital, mediante el uso de sistemas de información geográfica (S.I.G.), de manera que pueda ser utilizada como un insumo en futuros proyectos de la Municipalidad.

1.4 Metodología

-A partir del análisis e interpretaciones de fotografías aéreas e imágenes de sensores remotos, trabajo de campo, implementación de programas informáticos y la recopilación bibliográfica (SIBDI-UCR, Municipalidad de Montes de Oca, Comisión Nacional de Emergencias) se diagnostican cuatro procesos naturales que pueden afectar el cantón de Montes de Oca, a saber:

- Susceptibilidad por Inundación: se determinan, caracterizan y analizan las geoformas presentes (mapa geomorfológico y de pendientes) así como las áreas susceptibles a este tipo de peligros.
- Susceptibilidad al deslizamiento: utilización y modificación del método Mora Varson Mora (MVM), contemplando aspectos de pendiente, geología (mapa geológico), geomorfología (mapa geomorfológico y de pendientes), humedad, sismicidad, lluvias, para determinar la susceptibilidad del terreno a deslizarse.
- Sismicidad: análisis de la sismicidad histórica y reciente, con base en la búsqueda y utilización de datos de epicentros de sismos, (según su distribución geográfica y profundidad) y la neotectónica local (determinando fallas activas y/o neotectónicas).
- Peligro Volcánico: se analizará principalmente el peligro por caída de cenizas y lahares, basados en referencias bibliográficas.

2. Geología & Geotecnia

El cantón de Montes de Oca presenta una geología netamente volcánica, donde se ha podido reconocer tres eventos: 1) coladas de lava, 2) capas laháricas y 3) mantos de cenizas. Todos estos depósitos son parte de lo que Krushensky (1973) denominó como Grupo Irazú y evidencia la importante actividad volcánica que ha presentado el volcán Irazú desde su formación hasta nuestros días. A continuación se presenta una descripción de las diferentes litologías que conforman el área analizada, correlacionándolas con trabajos anteriores. Cabe destacar que en los trabajos anteriores estas unidades se agrupan en una sola unidad sin diferenciar. Adicionalmente, se hace una descripción de las características físico-mecánicas de los suelos formados a partir de las unidades de cenizas y lahar, como un aporte a la clasificación y al estudio de estos suelos.

2.1 Descripción Geológica

2.1.1 Unidad de Lavas Alto Pizote

Se trata de una colada de lava andesítica y andesítica-basáltica, con una estructura columnar bien definida, donde las columnas son principalmente prisma pentagonales y hexagonales, con diámetros que varían desde 10 centímetros hasta 60 centímetros (Fig. 2.1.1). Estas andesitas son de color gris claro a oscuro, cuando están sanas y de color gris-café claro cuando se encuentran meteorizadas; además, es posible encontrarlas con colores blancuzcos, debido a que en algunos sectores están siendo fuertemente afectadas por alteración hidrotermal. Mineralógicamente se

componen de fenocristales de plagioclasas y piroxenos, conformando una textura afanítica porfirítica.

Krushensky (1973) define a estas lavas como parte del Miembro Superior de la Formación Reventado. Además, describe que una de las mejores exposiciones de esta formación se presenta en varios sectores del río Tiribí, donde es posible encontrar los flujos lávicos de hasta 30 metros de espesor.

Krushensky *et al.*, (1976) las describen como una colada de andesitas augíticas, mientras que Alvarado (1984) las clasifica como andesitas augíticas, andesitas basálticas y algunos basaltos.

Bergoeing (1979) asocia estas manifestaciones volcánicas al volcán Las Nubes y describe las lavas como andesitas piroxénicas, mal conservadas, con moderada alteración hidrotermal y óxidos de hierro.

Esta colada andesítica solo se encontró aflorando en el Tajo Pizote, unos 700 metros al este del sitio llamado Alto Pizote, de ahí el nombre de la unidad, cerca de la planta hidroeléctrica Avance, en las coordenadas 540,950 E y 215,100 N (Figura 2.1.10). Este afloramiento tiene aproximadamente 500 metros de longitud, con un espesor máximo visible de 30 metros. Los contactos inferior y superior no pudieron ser vistos; sin embargo, se considera que esta unidad constituye la base de la secuencia estratigráfica (Fig. 2.1.2).

La exposición de estas lavas dentro del área estudiada es muy reducida. Dóndoli (1955) fundamenta esto al mencionar que, en su investigación en el cantón de Montes de Oca, no fue posible registrar ningún afloramiento de lavas, sin embargo, Dóndoli no descarta el hecho de que se ubiquen debajo de las capas de lahares y cenizas.

Las descripciones de los pozos de agua, registrados en el SENARA, indican la presencia de lavas por varios sectores del cantón (Apéndice A). Debido a la similitud de las descripciones, estas lavas se pueden asociar a las de la unidad de lavas Alto Pizote, por lo que se considera que esta unidad se extiende por toda el área de estudio.



Figura 2.1.1: Se muestran las columnas de lava claramente definidas. Tajo Pizote.



Figura 2.1.2: Parte del afloramiento de la unidad de lavas en el Tajo Pizote, aquí se puede reconocer su estructura columnar.

Según Krushensky (1973) la mayoría de los ríos y quebradas de la zona no son suficientemente profundos para llegar a exponer a las lavas, de manera que solo se presentan las capas superficiales de lahares y cenizas.

2.1.2 Unidad de Lahar Roosevelt

Constituye un depósito volcanoclástico compuesto, principalmente, de andesitas y andesitas basálticas de distintos tamaños, de 5 centímetros hasta 1,5 metros (Fig. 2.1.3). Se encuentran clastos tanto redondeados como angulares, los cuales presentan distintos grados de alteración. Es posible, sin embargo, encontrar fragmentos relativamente frescos. En muchos casos los clastos se encuentran totalmente arcillificados, de color blanco, esto podría corresponder con los materiales que han sido afectados por alteración hidrotermal en las partes altas y que son transportados hasta la partes más bajas. Los fragmentos se encuentran dentro de una matriz limo-arenosa, cinerítica, arcillificada, de

color café claro a crema, medianamente consolidada y sin ninguna estructura interna (Fig. 2.1.4).

Estos lahares afloran, de manera esporádica, en los cauces de los ríos y quebradas que corren a lo largo del Cantón de Montes de Oca, sin embargo, se presentan mejor expuestos hacia la parte central y occidental del mismo, principalmente en la Quebrada Negritos, en el Río Torres y el Río Ocloro. El nombre de esta unidad se debe a que la mejor exposición se encuentra en el barrio Roosevelt, sobre el Río Ocloro, en las coordenadas 530,350 E y 212,290 N (Fig. 2.1.10).

Según Dóndoli (1955) los lahares se componen de fragmentos de diferentes tamaños de andesitas y traquitas, estas últimas altamente caolinitizadas, remezcladas con materiales tufáceos que tienen cierto grado de arenosidad.

Según Krushensky (1973) la posición estratigráfica del lahar sobreyace los flujos de lava. Sin embargo, en el área de estudio esto no se pudo comprobar. La parte superior se encuentra cubierta por mantos de cenizas de diferentes espesores y puede ser visible en varios puntos de la zona. El espesor máximo visible para esta unidad en todo el área de estudio no supera los 2 metros.

Krushensky (1973) describe lahares de 2 a 8 metros de espesor donde el tamaño de los fragmentos varía desde arenas hasta bloques de 5 metros, entre angulares y redondeados, entre sanos y fuertemente arcillificados.



Figura 2.1.3: Afloramiento del lahar en el Río Ocloro, frente al antiguo Parque China.



Figura 2.1.4: Detalle del lahar, se observa la variedad de tamaños y formas de los fragmentos que lo conforman.

2.1.3 Unidad de Cenizas Mansiones

Esta unidad corresponde con las capas de cenizas que se han depositado sobre las unidades de lava y lahar, cubriendo grandes extensiones de las faldas y terrenos aledaños al volcán Irazú. Esta unidad cubre colinas, zonas plano-onduladas, laderas y cañones fluviales de toda el área del Cantón de Montes de Oca, con grandes variaciones en su espesor (Fig. 2.1.10).

En este trabajo fue posible diferenciar dos eventos de cenizas: una capa superior color gris oscuro y una capa inferior color café rojizo. La capa superior de cenizas son poco meteorizadas, pobremente consolidada y fácilmente erosionable, la cual se encuentra reducida en su extensión, mostrándose solo en las cimas de las colinas y partes altas del sector oriental del cantón. El espesor máximo que pudo ser observado no supera los 2 metros.

Kussmaul (comun. oral) sugiere que la capa superior de cenizas podría asociarse con la actividad del volcán Irazú producida entre 1963 y 1965, mientras que la capa inferior se asocia con actividades ocurridas anteriormente. La actividad de este volcán, iniciada el 13 de marzo de 1963, alcanzó tal intensidad que en el transcurso de la primer semana se oscureció completamente el área suroeste del macizo Irazú (Dondoli 1965a).

La capa inferior presenta un grado mayor de meteorización y es más consolidada. Estas cenizas abarcan todo el cantón. El espesor de esta capa es muy variable, sin embargo, se muestra mejor en algunos sitios de los sectores central y oeste del cantón, o bien, hacia las facies más distales de estos depósitos, tal es el caso del corte entre la rotonda de la bandera y el cementerio de Guadalupe y en la localidad de Mansiones, donde los espesores alcanzan los 7 metros. Precisamente, el nombre de esta unidad se debe a que este último lugar se ha considerado como

la mejor exposición de las cenizas (Figs. 2.1.5 y 2.1.6). Por otro lado, los procesos de remoción en masa que afectan las laderas de los cañones, que se describen en capítulos posteriores, han expuesto espesores de cenizas de hasta 30 metros, tal es el caso del deslizamiento sobre el Río Torres cerca de Mansiones (Fig. 3.5).

Krushensky (1973) describe que los depósitos de ceniza varían en espesor dependiendo de la relación longitudinal con el punto de origen. Además, indica que uno de los lugares donde estas capas están mejor preservadas es el cauce medio del río Tiribí, cerca de la planta eléctrica María del Rosario (actualmente llamada Avance). Denyer & Arias (1991) mencionan que entre La Paulina y Guadalupe las cenizas alcanzan 15 metros de espesor.



Figura 2.1.5: La Unidad de Cenizas Mansiones cerca de la comunidad de Mansiones, el espesor máximo visible es de 7 metros.



Figura 2.1.6: La unidad de cenizas entre la rotonda de la Bandera y el cementerio de Guadalupe, el espesor máximo visible es de 7 metros.

Dóndoli (1955) señala que en el área se presentan dos mantos de cenizas, uno reciente, con espesor variable

entre 5 ó 6 metros y 50 centímetros y otro más antiguo con un apreciable grado de meteorización y con un espesor máximo de 20 metros.

Dentro de ambas capas de cenizas es común encontrar lentes de materiales más gruesos, de tamaño arena gruesa y grava, color gris oscuro, tipo lapilli, con longitudes visibles desde 30 centímetros hasta 4 metros de y espesores máximos de 20 centímetros. Estas manifestaciones son más evidentes en la parte central y este del cantón. Alvarado (1984) indica que aparte de las grandes cantidades de cenizas lanzadas por el Volcán Irazú, se proyectaron también lapilli, bombas y bloques (Figs. 2.1.7 y 2.1.8). Menos frecuente es la presencia de fragmentos de carbón y tiestos dentro de estas cenizas.



Figura 2.1.7: Lentes arenosos dentro de las capas de ceniza, cerca de Alto Pizote.



Figura 2.1.8: Detalle de los depósitos de material tipo lapilli dentro de las capas de ceniza, cerca de Alto Pizote.

2.1.4 Unidad de Depósitos Cuaternarios

En esta unidad se agrupan los materiales que han sido erosionados de las zonas de mayor altura y luego

transportados por procesos fluviales, para posteriormente depositarlos en las partes más bajas. Estos depósitos están formados por fragmentos de rocas volcánicas, redondeados y subredondeados, con tamaños que varían de centimétricos hasta métricos; además, es posible encontrar depósitos inconsolidados, formando pequeñas barras de arenas y limos con fuerte influencia cinerítica. Los materiales aluvionales no son abundantes y su extensión se limita a los cauces de los ríos y quebradas (Fig. 2.1.9).

Se incluyen los depósitos asociados con deslizamientos y que están compuestos por fragmentos de roca, mezclados con una masa arenosa-limosa de cenizas, o bien, asociados con procesos de remoción en masa exclusivamente de la unidad de cenizas. Esto se ve representado en la figura 3.2, básicamente en el extremo este, cerca de Alto Pizote y en el centro del cantón por la comunidad de Mansiones.



Figura 2.1.9: Bloques volcánicos de diferentes tamaños conformando los depósitos aluvionales, frente Antiguo Parque China.

En la figura 2.1.10 se muestra una columna estratigráfica donde se representa la distribución espacial de las unidades descritas anteriormente.

A la izquierda de la columna se ubican dos escalas de espesores litológicos representativos de la zona de Alto Pizote (este del cantón) y de la zona de San Pedro (oeste del cantón). Debido a la variabilidad de los espesores en el área de estudio, se utilizaron los promedios de espesores descritos en los pozos de agua del archivo de SENARA (apéndice A), de esta manera se definieron los valores de espesor para las unidades de Lahar Roosevelt y Cenizas Mansiones. En el caso de la unidad de Lavas Alto Pizote, el espesor descrito en los pozos es menor que el visto en la zona donde aflora, por lo que el espesor en la columna para esta última unidad es el que corresponde con el visto en esa zona.

En la columna estratigráfica se puede reconocer que el espesor de la unidad de Lahar Roosevelt es mayor hacia la zona de San Pedro, o bien, hacia la zona oeste del cantón (facies distales), mientras que el espesor de la unidad de Cenizas Mansiones es significativamente mayor hacia el este del cantón o bien hacia Alto Pizote (facies proximales), como se menciona en el apartado de peligro volcánico del capítulo 6.

2.2 Descripción Geotecnia

La caracterización geotécnica, se baso en la determinación general de las propiedades físico-mecánicas de los suelos del municipio, dentro de la cual, se incluyen la Unidad de Cenizas Mansiones y la Unidad de Lahar Roossvetl, por ser las unidades que presentan desarrollo de suelos, no así la unidad de Lavas Alto Pizote. La esencia de esta clasificación, es brindar un aporte para posteriores estudios de suelos, como fundaciones, capacidad de soporte, cimentaciones, entre otros. Según Salcedo & Sancio (1989), los estudios de suelos para construcciones de infraestructura habitacional, no solo en el municipio, sino que en cualquier otro lugar; deben contemplar como mínimo, los siguientes ensayos y análisis:

- La evaluación del marco geológico regional.
- La historia del sitio mediante análisis de fotografías aéreas de fechas diferentes, en un área mínima de 1 km².
- La selección del número, profundidad y ubicación de los puntos de exploración (sondeos, trincheras, perforaciones, calicatas).
- La determinación de la presencia de aguas subterráneas.
- El cálculo de la capacidad de carga admisible del terreno.
- Las posibilidades de asentamientos.
- La evaluación de la estabilidad integral del área, incluyendo las nuevas cargas de obras civiles y tomando en cuenta las modificaciones proyectadas del terreno original.
- El diseño de las obras de contención requeridas.
- Las recomendaciones constructivas para el apoyo de pisos y obras exteriores.
- Pruebas de infiltración y diseño de zanjas de drenaje en caso utilizar tanques sépticos.

La caracterización físico-mecánica de los suelos se realizó a partir de muestras tomadas en la Unidad de Cenizas Mansiones y la Unidad de Lahar Roosevelt. Las muestras GT-1, GT-2 y GT-3, corresponden con muestras de la primera unidad, mientras que las muestras GT-4 y GT-5, corresponden con la matriz de la Unidad de Lahar Roosevelt.

2.2.1 Clasificación de suelos y propiedades físicas.

Cada una de las muestras se clasificó según las normas del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM, 1993). Para este fin se realizaron ensayos de límites de consistencia y análisis granulométricos (Apéndice B). El resumen de esta clasificación se aprecia en el cuadro 2.2.1.

Cuadro 2.2.1: Clasificación de suelos para el Cantón de Montes de Oca.

Muestra	LI %	LP (%)	IP (%)	% Grv	% Aren	% Finos	SUSC
GT-1	NP ¹	NP ¹	NP ¹	-	55,17	44,83	(NA ²) Arena fina con limos, sin plasticidad.
GT-2	NP ¹	NP ¹	NP ¹	-	26,46	73,57	(NA ²) Limo arenoso, sin plasticidad.
GT-3	NP ¹	NP ¹	NP ¹	-	17,30	82,70	(NA ²) Limo arenoso, sin plasticidad.
GT-4	65,3	32,9	32,3	6,49	32,6	60,91	Limo elástico arenoso (MH), de plasticidad Alta
GT-5	52,6	26,3	26,3	6,92	39,39	53,14	Arcilla grasa arenosa (CH), de plasticidad Alta.

¹ No Presenta, ² No Aplica el SUCS. LI : Límites Líquido
LP: Límites Plástico IP: Índice de Plasticidad

Se observa que la Unidad de Cenizas Mansiones no presenta límites de Atterberg y se clasifica como arena fina con limo o limo arenoso. Estos suelos no pueden clasificarse de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM, 1993). La diferencia entre estos dos tipos de suelos o materiales (Fig. 2.2.1) se explica por el origen del depósito, pues al tratarse de materiales volcánicos de caída, se presenta una variación granulométrica, en función de la distancia de la fuente, considerándose como el volcán Irazú; así la muestra GT-1 presenta materiales de composición más gruesa que las muestras (GT-2 y GT-3) que se tomaron en las zonas más alejadas del punto de emisión.

La Unidad de Lahar Roosevelt se clasifica como limo elástico arenoso (MH) y arcilla grasa arenosa (CH), ambas de plasticidad alta. Es de esperar este comportamiento, por tratarse de bloques envueltos en una matriz fina donde el comportamiento mecánico está regido por la matriz (Fig. 2.1.3). En la figura 2.2.2, se muestran las curvas granulométricas para las muestras de esta unidad, ambas si asemejan en su forma.

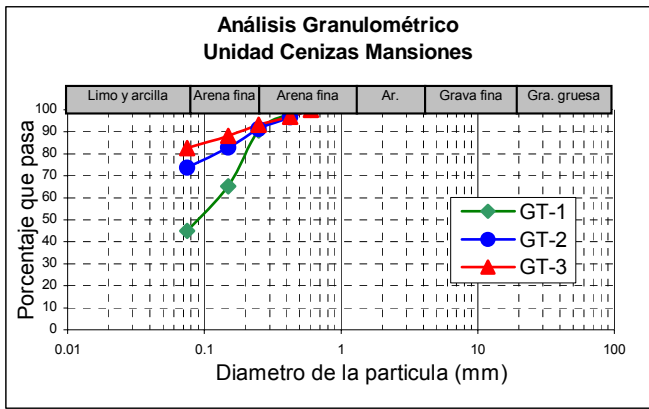


Figura 2.2.2: Curvas granulométricas para la Unidad Cenizas Mansiones.

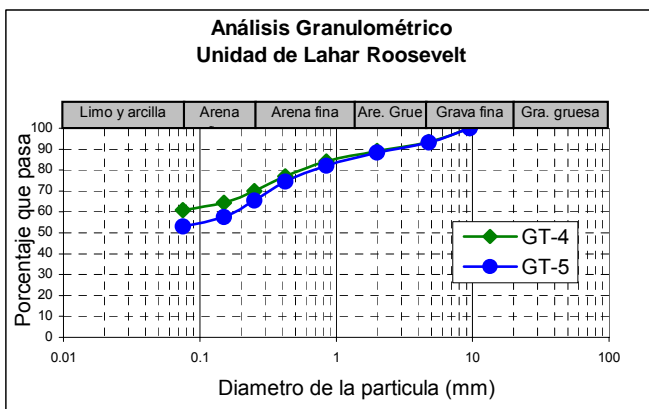


Figura 2.2.3: Curvas granulométricas para la Unidad de Lahar Roosevelt.

Las propiedades físicas de los suelos se resumen en el Cuadro 2.2.2, donde se muestran los pesos unitarios, gravedad específica, contenido de humedad, relación de vacíos, porosidad y grado de saturación, de cada una de las muestras.

Cuadro 2.2.2: Propiedades físicas de los suelos del Cantón de Montes de Oca.

Muestra	γ_w (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	G _s	W (%)	e	n (%)	S _r (%)
GT-1	12,93	8,96	15,41	2,67	44,4	1,92	65,8	61,6
GT-2	14,10	7,55	14,51	2,65	86,8	2,44	71,0	94,2
GT-3	15,03	9,02	15,43	2,66	66,7	1,89	65,4	93,8
GT-4	15,81	10,93	16,68	2,69	44,6	1,41	58,6	85,0
GT-5	-	11,59	17,08	2,68	75,6	1,27	55,9	-

γ_w : Peso Unitario Humedo γ_d : Peso Unitario Seco γ_{sat} : Peso Unitario Saturado G_s : Gravedad específica W : Contenido de Humedad e : Relación de Vacíos n : Porosidad S_r : Grado de Saturación.

Como se observa en el Cuadro 2.2.2, el peso unitario húmedo de la Unidad de Cenizas Mansiones, varía entre 12,9 y 15,0 kN/m³, siendo el promedio 14,0 kN/m³. La gravedad específica varía entre 2,67 y 2,65, como promedio 2,66.

La Unidad de Lahar Roosevelt presenta un peso unitario de húmedo de 15.81 kN/m³ y seco de 11.26 kN/m³, su gravedad específica varía entre 2.68 y 2.69 (Cuadro 2.2.2).

2.2.2 Propiedades mecánicas.

Las características mecánicas para cada una de las muestras se determinaron a partir del ensayo de Corte Directo, después de ser saturadas por 24 horas. Los resultados para cada unas las muestras se presentan en el cuadro 2.2.3.

Cuadro 2.2.3: Propiedades mecánicas para los suelos del Cantón.

Muestra	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción (°)
GT-1	5	32°
GT-2	-	-
GT-3	5	32°
GT-4	18	12°
GT-5	16	26°

Según en cuadro anterior, las muestras GT-1 y GT-2, tomadas de la Unidad de Cenizas Mansiones, tiene un comportamiento netamente friccionante, mientras que, las muestras GT-4 y GT-5, correspondientes con la Unidad de Lahar Roosevelt tiene un comportamiento cohesivo-friccionante.

Capacidad de carga admisible.

La capacidad de carga admisible de los suelos se ha calculado para cada una de las unidades, en el cuadro 2.2.4 se presenta un resumen de los parámetros utilizados. En factor de seguridad utilizado es de 3.0. Se utilizo el caso de una zapata corrida infinita, de 1 m de ancho y un desplante de 1 m (profundidad del cimiento), según los criterios de Meyerhof, Hansen y Vesic, descritos en ASCE (1993).

Cuadro 2.2.4: Parámetros utilizados en el cálculo de la capacidad de soporte.

Unidad	γ_w (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción
Cenizas Mansiones	14	15.1	5	32°
Unidad de Lahar Roosevelt	15.8	16.8	17	19°

En el caso de la Unidad de Lahar Roosevelt, la muestra GT-5 presentó un bajo coeficiente de correlación entre los puntos del ensayo de corte directo, por tal motivo, los autores no la consideraron en la elaboración de los cálculos de capacidad de soporte.

En el cuadro 2.2.5 se presentan los resultados obtenidos en el análisis de la capacidad de soporte de cada una de las muestras.

Cuadro 2.2.5: Resultados de cálculos de la capacidad de soporte.

Unidad	Capacidad de Soporte (kPa)		
	Meyerhof	Hansen	Vesic
Cenizas Mansiones	120	118	127
Lahar Roosevelt	95	95	98

Según los resultados, la Unidad Cenizas Mansiones, presenta una capacidad de soporte que oscila entre 118 y 127 kPa; mientras que la capacidad de soporte para la Unidad de Lahar Roosevelt presenta un valor que varía entre 95 y 98 kPa. La capacidad de soporte mayor que presenta la Unidad Cenizas Mansiones, está relacionada directamente con su mayor ángulo de fricción, pues se trata de una material Limo Arenoso, netamente friccionante.

3. Geomorfología

Se han dividido las geoformas del cantón de Montes de Oca, en tres unidades o formas, según los criterios de van Zuidam (1986). Las Formas de Origen Denudacional predominan en el área, siendo la sub-unidad de Laderas y colinas denudacionales las más representativas con un 58% del área, correspondiendo con una topografía plano ondulada; los escarpes y depósitos de deslizamiento, corresponden con un 3% del área total del cantón. Las Formas de Origen Fluvial presentan alineaciones E-W, con poca sinuosidad, diferenciándose en dos sub-unidades, según la pendiente de sus laderas. Las Formas de Origen Estructural representan un 0,2% del área total del municipio y no se pudo asociárselas a alguna estructura.

3.1 Drenaje

Los principales ríos del Cantón son el río Ocloro y el Torres; este último nace en el sector Oeste del Municipio, en las cercanías de Finca Alto Pizote. Entre las quebradas más importantes se encuentran Q. Pital, Q. Salitrillo y Q. Negritos, las cuales son afluentes del río Torres; mientras que las quebradas Ocloro y Cas, son afluentes del río Ocloro.

Morfológicamente en la parte alta del Cantón, se presentan drenajes profundos en forma de cañones o valles profundos, delimitando una topografía plano ondulada, mientras que en las zonas bajas los drenajes no tienen tanta expresión de valle profundo, el límite entre estos dos sectores se encuentra en los alrededores de la localidad de San Rafael y podría estar controlado por la falla Cipreses (Capítulo 6).

3.2 Pendientes

Las clases de pendientes se han clasificado de acuerdo a la modificación de van Zuidam (1986)

(Cuadro C-1, Apéndice C)., como se observa en el cuadro 3.1.

Cuadro 3.1: Clases de pendientes, modificadas de van Zuidam (1986).

Clase	Características
(1) Pendiente baja	Pendiente menor a 8°
(2) Pendiente moderada	Pendiente entre 8° y 16°
(3) Pendiente fuerte	Pendiente entre 16° y 35°
(4) Pendiente muy fuerte	Pendiente mayor a 35°

En general, las laderas de pendiente baja predominan en el Cantón (Fig. 3.1), con un 66% del área; seguidamente las laderas de pendiente moderada con un 19%, luego las de pendiente fuerte y por último las pendientes muy fuertes.

3.3 Descripción de unidades geomorfológicas.

Las unidades o clases geomorfológicas se clasificaron de acuerdo a su morfogénesis, utilizando los criterios de van Zuidam (1986). Esta clasificación posee 8 clases y cada una de ellas posee de 5 a 15 subclases, además el sistema permite la creación de otras subclases de acuerdo a las necesidades en el área de estudio (Fig. 3.2).

➤ Unidades o formas de Origen Denudacional.

Laderas y colinas denudacionales, con disección de baja a moderada (D1)

Esta unidad está constituida, principalmente, por laderas de pendiente baja (Cuadro 3.2 y Fig. 3.3), topografía ondulada y delimitada por la unidad de Valles fluviales de pendiente baja a moderada. Representa el 39% del área del cantón (Fig. 3.2) y se localiza en las zonas bajas del área de estudio, hacia el Oeste de San Rafael.

Es importante mencionar que en esta forma se encuentra la mayor densidad de población del cantón y que las obras de infraestructura han tenido un gran desarrollo en los últimos años. Un ejemplo de ellos es que se encuentran aquí el gran centro urbano de San Pedro, el Mall San Pedro, universidades, tanto públicas como privadas, (U.C.R., UNED, Latina, Fidelitas), etc.

Laderas y colinas denudacionales, con disección de moderada a severa (D2).

Esta unidad conforma el 18% del área del Cantón (Fig. 3.2), con pendientes que abarcan las clases baja y moderada (Cuadro 3.2 y Fig. 3.3); se localiza en las partes altas del Municipio, hacia el este de San Rafael.

La característica más notable de esta unidad es su disección de moderada a severa, la cual la diferencia claramente de la unidad D1.

El relieve, al igual que la unidad D1, está caracterizado por una topografía plano ondulada (Fig. 3.4), con lomas que alcanzan alturas no mayores a 20 m. La principal actividad que se desarrolla es la agropecuaria, también se encuentran áreas de conservación, como la Reserva Protectora del río Tiribí.

Escarpe de deslizamiento (D11a)

Representa el 1,58% (Fig. 3.2) del área cantonal y en ella predominan la laderas de pendiente baja a fuerte (Cuadro 3.2, Fig. 3.3), corresponde con áreas que fueron o están siendo afectadas por procesos de remoción en masa. El principal escarpe se localiza al este de Alto Pizote, con una altura de aproximadamente 100 m; para este caso se determinó que el mismo se encuentra inactivo. Otros escarpes inactivos se presentan en los alrededores de Liburgia. Hacia el sector sur de Liburgia (Fig. 3.5) se observa un escarpe de deslizamiento activo, caracterizado por caída constante de materiales.

Depósito de deslizamiento (D11b)

Constituye el 1,10% del área (Fig. 3.2), presenta laderas de pendiente baja (Cuadro 3.2, Fig. 3.3), formando sectores con relieve plano ondulado. El principal depósito se encuentra asociado al escarpe en las cercanías de la Planta Eléctrica María del Rosario. En el sector sur de Liburgia se presenta un depósito de deslizamiento, el cual obstruyó el curso del río Torres y lo obligó a cambiar su rumbo (Fig. 3.6).

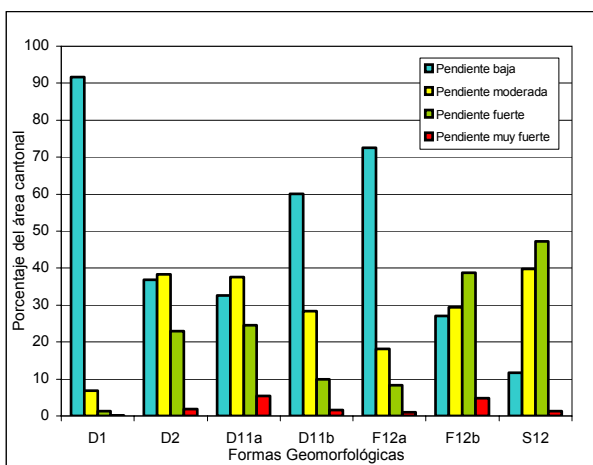


Figura 3.3: Porcentajes de área para cada forma geomorfológica.

Cuadro 3.2: Áreas de cada clase geomorfológica, según la clase de pendiente.

Clase	Clase Geomorfológica	Área (km ²)	% de área
Pendiente baja	D1	5,5961	91,678
Pendiente moderada	D1	0,4198	6,877
Pendiente fuerte	D1	0,0834	1,366
Pendiente muy fuerte	D1	0,0048	0,079
Totales:		6,10410	100,00
Pendiente baja	D2	1,0415	36,869
Pendiente moderada	D2	1,0801	38,235
Pendiente fuerte	D2	0,6483	22,949
Pendiente muy fuerte	D2	0,055	1,947
Totales:		2,82490	100,00
Pendiente baja	D11a	0,0798	32,532
Pendiente moderada	D11a	0,092	37,505
Pendiente fuerte	D11a	0,0604	24,623
Pendiente muy fuerte	D11a	0,0131	5,340
Totales:		0,24530	100,00
Pendiente baja	D11b	0,1026	60,141
Pendiente moderada	D11b	0,0483	28,312
Pendiente fuerte	D11b	0,017	9,965
Pendiente muy fuerte	D11b	0,0027	1,583
Totales:		0,17060	100,00
Pendiente baja	F12a	2,7965	72,533
Pendiente moderada	F12a	0,7004	18,166
Pendiente fuerte	F12a	0,3217	8,344
Pendiente muy fuerte	F12a	0,0369	0,957
Totales:		3,85550	100,00
Pendiente baja	F12b	0,6232	27,031
Pendiente moderada	F12b	0,6769	29,360
Pendiente fuerte	F12b	0,8945	38,799
Pendiente muy fuerte	F12b	0,1109	4,810
Totales:		2,30550	100,00
Pendiente baja	S12	0,0035	11,706
Pendiente moderada	S12	0,0119	39,799
Pendiente fuerte	S12	0,0141	47,157
Pendiente muy fuerte	S12	0,0004	1,338
Totales:		0,02990	100,00



Figura 3.4: Relieve plano ondulado, cerca de Alto Pizote.



Figura 3.5: Escarpe de deslizamiento, Liburgia.



Figura 3.6: Depósito de deslizamiento, Liburgia.

➤ **Unidades o formas de origen fluvial**

Las características litológicas del Municipio, producen drenajes medianamente profundos en la parte alta del cantón, mientras que la parte media y baja predominan los drenajes poco profundos; debido a la poca

resistencia de la Unidad de Cenizas Mansiones a ser erosionadas verticalmente; así como, el efecto de levantamiento que produce la falla Cipreses (Capítulo 6). Las formas fluviales del municipio se han dividido en dos unidades a partir de las pendientes que presentan en sus laderas: Valles fluviales con laderas de pendiente baja a moderada (F12a) y Valles fluviales con laderas de pendiente fuerte (F12b).

Valles fluviales de pendiente baja a moderada (F12a)

Característicos en las zonas bajas del área de estudio, presentan un área de 3,85 km², lo que corresponde con un 25% del área total del cantón (Fig. 3.2). En esta unidad predominan las pendientes bajas (Cuadro 3.2, Fig. 3.3) y se encuentra asociada a las quebradas de la zona baja del Cantón (quebrada Sabanilla y Negritos) y en algunos sectores a los ríos principales (río Ocloro) (Fig. 3.7). Otras zonas donde se presenta es hacia el este del área de estudio, en los alrededores de Alto Pizote.

Valles fluviales de pendiente fuerte (F12b)

Se encuentran asociados a la unidad de Laderas y colinas denudacionales de disección moderada a severa y están localizados hacia el este de San Rafael, al norte de Sabanilla, al este de Lourdes, en el río Torres (Fig.: 3.8) y en la quebrada Poró. La unidad representa un 15 % del área total del cantón (Fig. 3.2), y está compuesta por laderas de pendientes bajas a fuertes, siendo estas últimas las predominantes (Tabla 3.2, Fig. 3.3).



Figura 3.7: Río Ocloro, frente al antiguo parque de la Embajada de la República de China, mostrando los Valles Fluviales de Pendiente Baja a Moderada (F12a).



Figura 3.8: Valles fluviales de pendiente fuerte (F12b), sobre el puente del río Torres en los alrededores de Paso Hondo.

➤ **Unidades o formas de origen estructural**

Escarpes estructurales (S12)

Esta unidad se diferenció principalmente por la fuerte inclinación de la pendiente, como se muestra en la Figura 3.1, y además, por cambio drástico de la dirección en la quebrada Patal y el río Torres, cerca de la localidad de Liburgia. Esta estructura no fue asociada con ninguna falla dentro o fuera del cantón, por falta de criterios neotectónicos.

4. Caracterización de la susceptibilidad al deslizamiento

En este capítulo se procede a la determinación de la susceptibilidad al desarrollo de deslizamientos en el Cantón de Montes de Oca, utilizando una modificación del método Mora-Vahrson-Mora (1992).

Según Mora *et al.* (en prensa), esta metodología permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizarse, donde se combina la valoración y el peso relativo de diversos indicadores morfodinámicos.

El cantón cuenta con características geológico-geomorfológicas que propician el desarrollo de procesos de remoción en masa. Incluso, existen áreas dentro del mismo cantón que ya han sido afectadas por estos procesos de remoción del terreno, es por esto que se siente la necesidad de hacer una clasificación de estos deslizamientos según su forma y material que están afectando (Figs. 4.1 y 4.2).



Figura 4.1: Deslizamiento cerca de finca Terrazas, afectando parte de una vía de acceso.



Figura 4.2: Laderas de cañones fluviales agrietadas, propensas a deslizamiento y afectadas por acción antrópica. Cerca de finca Terrazas.

4.1. Desarrollo del método Mora-Vahrson-Mora. (MVM)

La aplicación de esta metodología involucra la combinación de varios parámetros que, según Mora *et al.* (1992), se clasifican como elementos de susceptibilidad o pasivos y factores disparadores o dinámicos. En este caso se han considerado los parámetros de susceptibilidad geomorfológica, pendiente, humedad del terreno, disparo por lluvias y disparo por evento sísmico. A excepción del parámetro de geomorfología, cada uno de los otros parámetros se valora de acuerdo a lo establecido en el método Mora-Vahrson-Mora (1992). En el apéndice C se muestran, de manera general, los elementos de aplicación para esta metodología.

4.1.1. Parámetro de susceptibilidad geomorfológica.

Originalmente el método de Mora-Vahrson-Mora (1992), involucra el parámetro de susceptibilidad

litológica, sin embargo, para aplicarlo en este cantón se sustituyó por otro parámetro que refleja las características geomorfológicas, es decir, que incorpora los rangos de susceptibilidad geomorfológica en lugar de las propiedades mecánicas del suelo y de las rocas. Esta modificación obedece al hecho de tener una litología muy homogénea y con un comportamiento similar en toda el área de estudio, por lo que se considera un elemento que no contribuye en el desarrollo de una zonificación. Por lo tanto, se considera que la alternancia de unidades y procesos geomorfológicos, brindan un criterio de mayor relevancia para el establecimiento de una propuesta de zonificación de susceptibilidad al deslizamiento.

Dentro del área del cantón se establecieron tres unidades geomorfológicas, definidas como: Formas de Origen Denudacional, Formas de Origen Fluvial y Formas de Origen Estructural. Cada una de estas está constituida por una serie de subformas con diferentes características geomorfológicas. En la figura 3.2 se representa la clasificación de las formas del terreno, su distribución espacial y los valores en porcentaje del área que ocupa cada una de ellas en relación con el área total del cantón. A partir de estos datos se establece el índice de susceptibilidad que cada uno de estos elementos podrían estar aportando al método MVM, esta información se representa en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1: Índice de aporte del parámetro geomorfológico a la susceptibilidad al deslizamiento.

Parámetro geomorfológico	Valor asignado Mvm	Índice de Aporte
Laderas y Colinas denudacionales de disección baja a moderada	1	Muy Bajo
Laderas y colinas denudacionales de disección moderada a severa	2	Bajo
Escarpes de deslizamientos	5	Muy alto
Depósito de deslizamiento	5	Alto
Valles fluviales de pendiente suave a moderada	3	Moderado
Valles fluviales de pendiente fuerte	5	Muy alto
Escarpes de origen estructural	5	Muy alto

4.1.2. Parámetro de la susceptibilidad por pendiente.

La caracterización de este parámetro se basa en la clasificación de pendientes de Van Zuidam (1986) que se presenta en el apéndice C. En la figura 3.1 se determinan las zonas de pendientes, las cuales se clasifican según su grado de inclinación. De esta

manera se han establecido cuatro clases de pendientes (Cuadro 3.1). En la misma figura se ha estimado el área que abarca cada una de ellas y su relación porcentual dentro de la zona de estudio. Cada una de estas clases presentan índices diferentes a la susceptibilidad al deslizamiento, siendo las de pendiente fuerte y muy fuerte las que podrían estar aportando el mayor grado.

4.1.3 Parámetro de la Susceptibilidad por Humedad del Terreno.

El parámetro de humedad del suelo se evalúa utilizando los datos de precipitación mensual para las estaciones de Avance, CIGEFI, Coronado, Ipis, Las Nubes, Rancho Redondo, Sabanilla y San José, pertenecientes al Instituto Meteorológico Nacional. (I.M.N., 2003 a)

La determinación se hace tomando los promedios mensuales de precipitación y efectuando con ellos un balance hídrico simplificado en el cual se asume una evapotranspiración potencial de 125 mm/mes. De esta manera, las precipitaciones mensuales inferiores a 125 mm no aumentan la humedad del terreno, una precipitación entre 125 y 250 mm si la incrementa y precipitaciones mensuales mayores a 250 mm producen una humedad del suelo muy alta. (Mora *et al.*, 1992). La valoración que se le asigna a este elemento se hace según las tablas de clasificación que se presentan en apéndice C.

La valorización final que se le asigna a este parámetro es 3, resultando ser un valor constante para toda el área, esto corresponde con un grado de influencia media en función de la susceptibilidad al deslizamiento.

4.1.4 Parámetro de Disparo por Lluvia.

El análisis se basa en las intensidades de lluvias que potencialmente podrían originar deslizamientos, se utilizan los datos máximos anuales de lluvia en milímetros en 24 horas y se calcula el máximo con un período de retorno de 100 años, aplicando la distribución de Gumbel tipo I o LogPearson tipo III a series temporales con más de 10 años de registro. (Mora *et al.*, 1992)

Para el caso del cantón de Montes de Oca se utilizaron las estaciones Avance, Curridabat, Las Nubes, Mozotal, Ochomogo, Rancho Redondo, Sabanilla y San José, pertenecientes al Instituto Meteorológico Nacional (I.M.N., 2003 b).

En el cuadro 4.2 se muestran la clasificación que se obtuvo para las diferentes estaciones de acuerdo en las distribuciones de Gumbel tipo I o LogPearson tipo III (Linsley *et al.*, 1986). La utilización de ambas distribuciones se basa en el número de datos

registrados en cada estación, de esta manera, Gumbel tipo I usa al menos 10 datos y LogPearson tipo III al menos 20 datos.

Cuadro 4.2: Clasificación del parámetro de disparo por lluvias (D_{II}) basados en las distribuciones de Gumbel tipo I o LogPearson tipo III

Nombre de la Estación	Distribución Utilizada	Lluvia máxima en 24 horas, período de retorno 100 años [mm]	Valor del parámetro D_{II}
Avance	Gumbel Tipo I	153,1	2
Curridabat	Gumbel Tipo I	126	2
Las Nubes	Gumbel Tipo I	98	1
Mozotal	LogPearson tipo III	156,7	2
Ochomogo	LogPearson tipo III	122,3	2
Rancho Redondo	Gumbel Tipo I	206,4	3
Sanbanilla	LogPearson tipo III	183,2	2
San José	Gumbel Tipo I	148,3	2

Como se observa en el cuadro 4.2, el área de estudio esta influenciada, principalmente, por un valor del parámetro de disparo por lluvias de 2, esto establece una clasificación baja, según el método utilizado (MVM) (Apéndice C). Sin embargo el valor de 3 en la estación de Rancho Redondo da una clasificación media, influyendo en la zona que cubre desde Alto Pizote hasta el límite este del cantón.

4.1.5. Parámetro de Disparo por Sismo.

Los eventos sísmicos constituyen uno de los elementos que causan deslizamientos en Costa Rica. En el análisis de estos eventos como mecanismo de disparo, para el cantón de Montes de Oca, se han utilizado los datos sobre aceleraciones pico (PGA) y la relación propuesta por Trifunac & Brady (1975), esta relación asigna un valor al parámetro según el rango de aceleración. Cabe decir que, esta valoración puede ser asignada utilizando la escala de intensidades Mercalli-Modificada, la cual se asocia con la relación antes mencionada.

Se utilizaron los datos de aceleraciones pico (PGA) para condición en roca desarrollados por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la UCR (Apéndice E), con el inconveniente de que solamente abarcaban una parte del área del cantón, por ello se realizó una extrapolación de tipo polinomial (fue la extrapolación de mejor ajuste) utilizando el programa ILWIS 3.0. Estos datos no deben considerarse como reales sino más bien como una aproximación de los valores de aceleración pico esperadas para el cantón.

Las aceleraciones pico esperadas para el cantón durante este período varían entre 2,8 y 2,9 m/s^2 , esto

corresponde con valores de 29 %g y 30 %g. Estos valores se ubican en el rango de PGA que está entre 17,7 y 35,4 %g, según Trifunac & Brady (1975), El resultado de valoración es una constante para todo el cantón de 7. Las tablas de valoración se muestran en el apéndice C.

4.1.6. Resultado del Análisis

Con la combinación de los diferentes parámetros mediante la modificación del método Mora-Vahrson-Mora (1992), se tiene como resultado una zonificación de la susceptibilidad que puede tener el terreno al deslizamiento, siempre y cuando se tengan las condiciones necesarias para que esto se de. Esta zonificación ha sido establecida en cinco clases diferentes de susceptibilidad: Muy baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta, considerando la acción conjunta de los elementos de disparo por lluvias intensas y sismos de magnitud importante. En la figura 4.3 se representan, de manera gráfica, la clasificación de las cinco clases antes descritas.

En el cuadro 4.3 se presentan las clases de susceptibilidad al deslizamiento que se han determinado, las áreas ocupadas por cada una de ellas, en metros y kilómetros cuadrados y sus respectivos porcentajes dentro del cantón de Montes de Oca.

Cuadro 4.3: Clases de susceptibilidad al deslizamiento, áreas y porcentajes que ocupan en el cantón de Montes de Oca.

Susceptibilidad	Area (m^2)	Area (km^2)	Porcentaje
Muy Baja	11344800	11.345	73.14
Baja	2128800	2.129	13.72
Moderada	860500	0.861	5.55
Alta	1106300	1.106	7.13
Muy alta	70800	0.071	0.46
Totales:	15511200	15.511	100.00

4.1.7. Justificación de la modificación del método Mora-Vahrson-Mora (1992)

Se desarrollo el método utilizando el factor litológico en lugar de la geomorfología, como lo establecen originalmente el método Mora-Vahrson-Mora (1992). El resultado se observa en la figura C-1, que se presenta en el apéndice C. En esta figura se puede ver que casi la totalidad del área de estudio presenta susceptibilidad al deslizamiento media, baja y muy baja, dejando las de alta y muy alta con porcentajes prácticamente en cero, evidentemente esto no corresponde con lo que se presenta en el cantón, la justificación se basa en los siguientes hechos: el método Mora-Vahrson-Mora (1992) considera zonas de baja o media susceptibilidad

a zonas donde ya se presentan remociones de masa importantes, principalmente en la unidad de Cenizas Mansiones, las cuales se presentan muy poco cohesivas. Zonas que morfológicamente constituyen valles fluviales profundos, con pendientes fuertes, escarpes y depósitos de deslizamientos y escarpes de origen estructural, se consideran de muy baja y baja susceptibilidad al deslizamiento. Por estas razones, estas zonas deben ser catalogadas como de susceptibilidad alta y muy alta al deslizamiento, dando total aprobación a la modificación del método utilizando el parámetro geomorfológico.

4.2. Clasificación de Deslizamientos

Los deslizamientos en el cantón de Montes de Oca son eventos que se han registrado desde años atrás, tal es el caso de los producidos en el trayecto entre Tres Ríos y el Cerro Cabeza de Vaca, atravesando la parte este del cantón, donde se menciona un deslizamiento cuyo material represó los canales de toma de agua de San José en el río Tiribí y provocó el desbordamiento del río, producido por el terremoto de San Antolín, el 2 de septiembre de 1841 (Peraldo y Rojas, 2000).

Debido a estos deslizamientos y los producidos recientemente, se realizó la caracterización de los deslizamientos más representativos en el área estudio, basándose en la clasificación de Varnes (1978).

La gran mayoría de deslizamientos que se ubican en el cantón son de pequeñas dimensiones, por lo que no fue posible su cartografía, a excepción del que se ubica al extremo este de área de estudio, en el sitio llamado Alto Pizote y del que se ubica cercano a la comunidad de Mansiones.

Según la clasificación de Varnes (1978) se han identificado dos tipos de deslizamientos:

A) Translacionales de suelos: están afectando solo las capas de cenizas. Según Cruden & Varnes (1996), en estos casos la masa se desplaza a lo largo de una superficie de ruptura plana o suavemente ondulada y se superpone a la superficie original del terreno. El deslizamiento más representativo de este tipo es el de Mansiones.

B) Rotacionales en rocas: en este caso se ve afectada la masa rocosa que corresponde con la colada de lava. Según Cruden & Varnes (1996) el movimiento se da a lo largo de superficies de ruptura curvas y cóncavas, con poca deformación interna del material; además, la cabeza del material que se desplaza lo hace verticalmente hacia abajo, mientras que la parte superior del mismo material se bascula hacia el escarpe. El deslizamiento más representativo de este tipo es el de Alto Pizote.

Se puede hacer una aproximación del volumen del material removido de un deslizamiento utilizando la relación:

$$V = \pi/6 * L_{m\acute{a}x.} * A_{m\acute{a}x.} * H_{m\acute{a}x.},$$

donde L, A y H son largo, ancho y altura máximos de un deslizamiento, respectivamente, dentro de la superficie de ruptura-

El cuadro 4.4 presenta la clasificación de los deslizamientos basados en la clasificación de Varnes (1978), incluyendo el tipo de material afectado y el volumen aproximado del material removido, calculado con la relación anterior.

Cuadro 4.4: Clasificación de los deslizamientos, tipo de material afectado y volumen removido.

Deslizamiento	Clasificación	Material afectado	Volumen (m ³)
Deslizamiento de Mansiones	Translacional de suelo	Capas de cenizas	31 415, 9
Deslizamiento Alto Pizote	Rotacional de rocas	Colada de lava	3 377 212, 1

Estos volúmenes, en la mayoría de los casos, no alcanzan magnitudes muy grandes y afectan capas superficiales de suelo, sin embargo, la presencia de deslizamientos con magnitudes importantes no descarta la posibilidad que un evento así vuelva ocurrir.

Los deslizamientos del cuadro 4.4 se ubican en zonas catalogadas como de alta y muy alta susceptibilidad y podrían afectar obras civiles cercanas como caminos de acceso a comunidades, plantas hidroeléctricas y acueductos.

5. Susceptibilidad a inundaciones y a la erosión fluvial

La inundación es el proceso natural más común y el que año con año genera más pérdidas materiales y humanas, superando a otros procesos tales como, terremotos o erupciones volcánicas.

Muchos de los sitios susceptibles a inundación son también lugares preferenciales para la industria, el comercio y la vivienda, debido a su topografía plana, fácil acceso, fertilidad y bajo precio. En la cuenca alta de los ríos, los valles de los ríos son frecuentemente utilizados como una ruta natural de comunicación terrestre. Así mismo, los problemas sociales y económicos, unidos al incremento de la población, sin un manejo y control del uso adecuado de la tierra, lleva a las personas a ocupar las áreas de inundación de los ríos y quebradas, aumentando la susceptibilidad y la vulnerabilidad de las personas y sus bienes.

Entre las principales causas del incremento de las inundaciones en las últimas décadas, están: