

Cambios climáticos.  
Cambios en el uso de la tierra.  
Urbanización sin planificación.  
Impermeabilización de los suelos  
Deforestación de las riberas de los ríos.  
Drenajes artificiales y/o manipulación del drenaje natural.  
Incremento en la población.  
Desarrollo en planicies aluviales.

La humanidad no puede prevenir la ocurrencia y las acciones de la mayoría de los procesos naturales, pero lo que sí es posible es la prevención de estos efectos, cuando se conocen los patrones de comportamiento y las áreas expuestas al riesgo.

### 5.1 Metodología para el estudio de la amenaza por inundación.

En general, los estudios de amenaza por inundación, consisten en una identificación de las áreas potencialmente inundables así como de la frecuencia con que éstas se ven afectadas por un evento de inundación, incorporando las características del cauce y de las áreas adyacentes. Esta identificación puede llevarse a cabo mediante diferentes enfoques: hidrológicos, hidráulico, geomorfológico, reconstrucciones históricas, o bien, la combinación de dos o más de los anteriores.

Tanto los métodos hidrológicos como los hidráulicos se basan en características de las precipitaciones y del cauce, mediante la determinación de la frecuencia, magnitud y volumen de la inundación. El método geomorfológico, se realiza a partir del análisis de las características de los relieves fluviales; mientras que las reconstrucciones históricas, se enfocan en el análisis de eventos pasados.

La capacidad de descarga de cada quebrada o río depende, no sólo de las fluctuaciones de las precipitaciones, sino también de factores como la sección transversal del cauce, el área del cauce, el gradiente y la sinuosidad. Estos factores controlan efectivamente la transmisión del agua y deben de ser considerados a lo largo del canal. El área de inundación y la profundidad el agua cubriendo un área, serán afectadas por la cantidad de quebradas que descargan y la topografía del área.

#### 5.1.1 Determinación de las características de la inundación

La determinación de las características de las inundaciones son el punto de partida para los análisis de inundación. Por tal motivo, existen diversas metodologías para el análisis de las mismas. La determinación de los datos se realiza de manera cuantitativa o cualitativa.

### Métodos cuantitativos

Se realiza a partir de métodos físicos. Esencialmente consisten en análisis hidrológicos e hidráulicos (Ramírez *et al.*, 1992), donde se modelan las variaciones espaciales y temporales de los parámetros como la precipitación, infiltración, forma y topografía de la cuenca, el agua que entra y sale de la misma, etc. Dentro de la metodología empleada se pueden utilizar, modelos matemáticos, propiamente del sistema hidrológico, o bien, de algún evento sencillo.

### Métodos cualitativos

Consiste en la determinación de las características de una inundación, a partir de las reconstrucciones históricas de las mismas (Salas & Jarrett, 1992). Dentro de los métodos empleados para la determinación de datos históricos, están:

- ✓ Reconstrucciones de inundaciones históricas, a partir de la documentación (periódicos), reportes de daños, marcas de niveles de agua en los cauces de los ríos y narraciones personales.
- ✓ Reconstrucciones de inundaciones pasadas con base en las características de los sistemas de drenaje, tales como densidad del drenaje, forma de los canales y las formas del terreno de origen fluvial, como terrazas.
- ✓ Métodos botánicos, basados en el hecho de que la vegetación que crece en las planicies de inundación, puede mantener registro de las inundaciones pasadas, mediante su distribución, crecimiento y edad.
- ✓ Indicadores paleoambientales, ya sean erosivos o depositacionales, que mantiene registro de niveles máximos de inundaciones individuales.

### 5.2 Problemática en el cantón.

Geomorfológicamente la parte alta del cantón, presenta *laderas y colinas denudacionales, de disección moderada a alta* (D2), por lo que problemas de inundaciones, en esta área deberían ser escasos a nulos.

Las formas D1, D2 y F12b, por sus características de relieve son consideradas como áreas no susceptibles a la inundación.



Figura 5.1: Auto atascado en los Yoses, fotografía tomada de Nación.com.

En la zona baja y media del cantón, que comprende básicamente los distritos de San Pedro, Sabanilla y Mercedes, la topografía presenta *laderas y colinas denudacionales, de disección baja a moderada (D1)*, así como *valles fluviales de pendiente baja a moderada (F12a)*. La forma *F12a*, se considera como una zona susceptible a inundaciones naturales. En esta zona el sistema de drenaje es poco profundo y además se ha dado un extenso desarrollo civil, unido a problemas de mal diseño de drenajes y evacuadores de aguas, origina en esta área constantes inundaciones de carácter puntual en las épocas lluviosas, principalmente en las zonas más bajas del cantón, como en el barrio los Yoses (Fig.5.1), considerándose por los autores como inundaciones antrópicas.

Por los motivos antes expuestos el estudio se enfocará principalmente en la zona baja del cantón, específicamente en la unidad geomorfológica *F12a (Valles fluviales de pendiente baja a moderada)*, así como los problemas que podrían presentarse en la forma *D2 (Pendientes y laderas denudacionales, de disección baja a moderada)*, principalmente, los distritos de San Pedro, Sabanilla y Mercedes.

### 5.3 Metodología utilizada y justificación.

Dentro del área de estudio se encuentra ubicado el gran centro urbano-comercial de San Pedro, el cual, en los últimos años, ha experimentado un intenso desarrollo. Las actividades industriales, comerciales y habitacionales, ligadas al incremento en las vías de comunicación, han impulsado un desarrollo sin tomar en cuenta un uso correcto de la tierra, así se ocupan lugares no aptos para el desarrollo humano, como lo son, los valles de los ríos y quebradas, principalmente las terrazas; ahí radican en gran medida los problemas de inundación en el cantón, por tal motivo, las técnicas anteriormente mencionadas se hacen inoperante para nuestro estudio.

Se considero las técnicas antes expuestas, la combinación del enfoque geomorfológico e histórico, complementados con las observaciones de campo para la determinación de la susceptibilidad a la inundación.

Por tratarse en su mayoría de inundaciones urbanas originadas por actividades antrópicas dependientes de variables ajenas al comportamiento natural de los cursos de agua, tales como, la concentración de basura o problemas de alcantarillado, es que en este trabajo, se recurrió a la fotointerpretación y a las observaciones de campo, para delimitar áreas o puntos críticos, donde se puedan presentar problemas de inundación y delimitar ciertas zonas susceptibles, los cuales, son pequeñas terrazas o planicies de inundación no mapeables en su mayoría. Con la información recolectada y la recopilación bibliográfica,

se elaboró un Mapa de puntos críticos y áreas susceptibles a la inundación (Fig. 5.18).

La determinación de los sitios y causas de inundación, se realizó a partir del trabajo de campo, así como análisis geomorfológicos, recopilación bibliográfica y entrevistas a los habitantes del municipio.

Dentro de los principales situaciones que se analizan están, la reducción de la sección transversal de los drenajes, principalmente en quebradas; obstrucción del cauce, mal diseño de alcantarillado y de obras civiles; aparte de las anteriores, el principal problema en el área de estudio, es el mal uso de la tierra, unido a un crecimiento demográfico sin planificación y una mala disposición de los desechos sólidos.

Como se ha mencionado anteriormente, las inundaciones se han dividido en dos, a partir del elemento que les de origen. Así tenemos, inundaciones naturales, que se originan por causas meramente naturales, como son desbordamiento de ríos y quebradas en áreas naturalmente inundables; mientras que las inundaciones antrópicas, se originan a partir de la influencia directa del ser humano, por medio de sus actividades y desarrollo, sin planificación.

### 5.4 Inundaciones de origen antrópico.

El desarrollo urbano, ha generado la impermeabilización del terreno, aumentando el agua en escorrentía libre. Como es común, el desarrollo superficial, no implica un desarrollo en los sistemas subterráneos de recolección de aguas, en este caso, el alcantarillado, la cual origina la colmatación del sistema de drenaje del Municipio.

Dentro de los principales problemas encontrados en el área de estudio se pueden citar: reducción de la sección transversal del cauce (entubamiento), obstrucción por obras civiles, ineficiencia del alcantarillado.

#### 5.4.1 Reducción del cauce

Esta situación es común en el área de estudio. La reducción del área transversal de los drenajes se presenta por varios motivos, dentro de los cuales están:

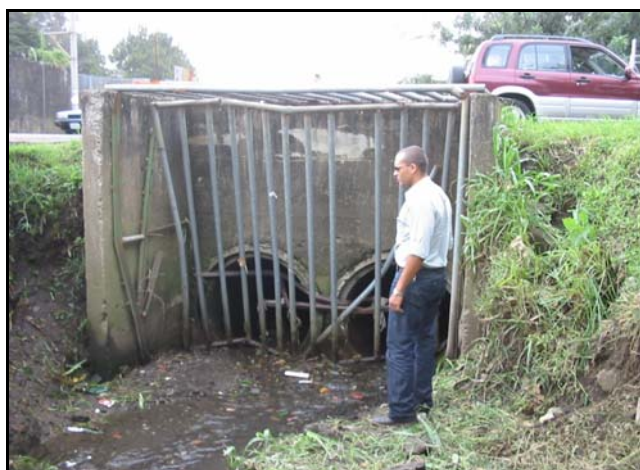
##### Entubamiento de cauces

Es común este procedimiento en el área de estudio, para maximizar el área de construcción de los diferentes proyectos civiles. En el sector de Alma Mater (S8 en Fig. 5.18), se entuba la quebrada Sabanilla. En la entrada principal del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), se entuba una quebrada que drena las aguas



provenientes de Vargas Araya y sitios aledaños (S1 en Fig. 5.18 y Fig. 5.2).

Es importante notar que en estos puntos se genera un tipo embudo, pues como se observa en la figura 2, el diámetro de la alcantarilla o tubo, es varias veces menor en proporción al tamaño del cauce de la quebrada; a esto se le debe de sumar el mantenimiento que se dé a las rejillas, pues es común que se atasquen con los desechos sólidos presentes en las quebradas y ríos (Fig. 5.3). Caso similar se presenta en el canal de alivio en el barrio Los Yoses, el cual, funciona como drenaje alternativo cuando se presenta un volumen mayor de agua al que pueda dar abasto el alcantarillado (S2 en Fig. 5.18, Fig. 5.4).



**Figura 5.2: Entubamiento y rejillas, frente al LANAMME.**



**Figura 5.3: Obstrucción del drenaje, frente al LANAMME**

### **Disminución de la sección transversal del cauce en los puentes.**

Esta situación se da, por falta de planeamiento en la construcción del paso sobre el cauce, pues el puente o paso se instala dentro del río o quebrada. Como se

observa en la Figura 5.5, el puente sobre el río Torres, en los alrededores de Paso Hondo (S3 en Fig. 5.18), fue construido dentro del cauce, reduciendo el área de la sección transversal. Esta situación es común en cada uno de los pasos donde se presentan puentes.

Lo antes expuesto se transforma en un obstáculo para avenidas grandes, pues cuando el área transversal del agua transportada a través del puente supere al área transversal de dicha estructura, se desbordará hacia los sitios aledaños. Un problema más serio que se podría presentar es la destrucción del puente, pues se puede originar el caso de que el flujo tenga la suficiente fuerza para desestabilizar la estructura, inclusive hasta el desplome de la misma.



**Figura 5.4: Obstrucción del canal de alivio por disposición de desechos sólidos, Los Yoses.**

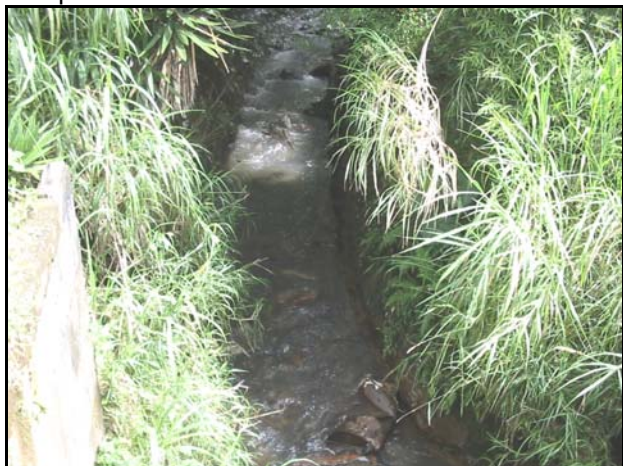


**Figura 5.5: Reducción del área transversal del cauce del río Torres, cerca de Paso Hondo.**

Al SE de Santa Marta, se observa el puente sobre la quebrada Poró, en el cual se generó un canal de 1,5 m de ancho por 5 m de longitud a la entrada del puente (S4 en Fig. 5.18, Fig. 5.6). Es notable la profundización en dicho canal, concentrando el flujo y aumentando la erosión; con este proceso se ha expuesto la base del



puente (Fig. 5.7). Igualmente que en casos anteriores, el área de la sección transversal bajo el puente es menor que el área de la sección transversal del cauce de la quebrada.



**Figura 5.6: Canal a la entrada del puente, quebrada Poró, cerca de Santa Marta.**



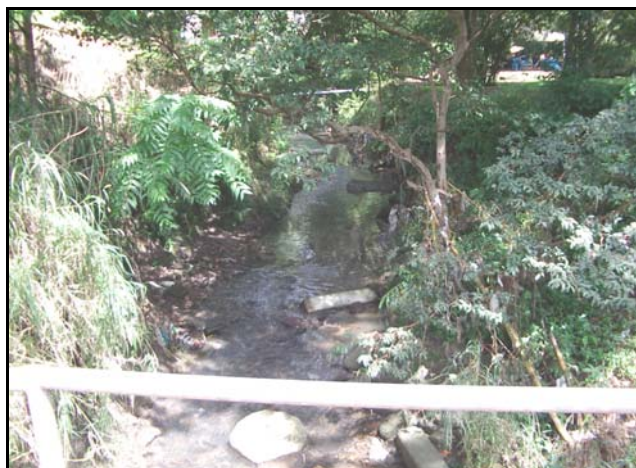
**Figura 5.7: Acortamiento del cauce de la quebrada Poró, cerca de Santa Marta.**

#### 5.4.2 Obstrucción del cauce

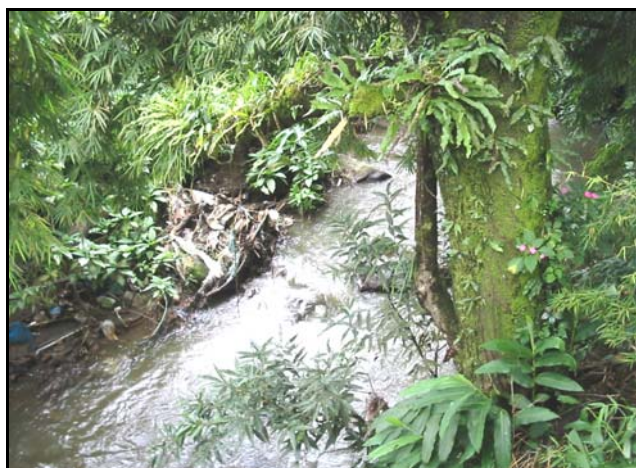
La mala disposición de los desechos sólidos hacia los cauces, ocasiona que estos se atasquen en las rejillas que se encuentran en la entrada de las tuberías las cuales canalizan alguna quebrada o río a lo largo de un tramo definido, esto origina una disminución de la capacidad de desagüe y posteriores problemas de desbordamiento, como se muestra en la figura 5.3 frente al LANAMME y en la figura 5.4, en el barrio Los Yoses, ambas figuras muestran la acumulación de los desechos sólidos a la entrada de los canales del municipio.

Cuando la acumulación de los desechos se origina en alguna sección del cauce, ya sea, por algún tipo de obstáculo, como lo puede ser un árbol (Fig. 5.8, quebrada Negritos), así como, estructuras civiles

abandonadas (S5 en Fig. 5.18), la acumulación de desechos puede originar, igualmente que el caso anterior, el desbordamiento de las aguas. Se debe dar importancia a la efecto de retención, que generan tanto, el árbol, los pilotes, así como cualquier otra desecho que se pueda encontrar en el fondo del cauce, o bien la simple acumulación, como sucede en el río Torres, al norte de San Rafael (Fig. 5.9 y S6 en Fig. 5.18).



**Figura 5.8: Obstáculos en el cauce de la quebrada Negritos, Frente al Comedor Universitario, U.C.R.**



**Figura 5.9: Obstáculos en el cauce del río Torres, al norte de San Rafael.**

#### 5.4.3 Ineficiencia del alcantarillado

La incapacidad del alcantarillado urbano, al drenar en su totalidad las aguas en escorrentía durante fuertes precipitaciones unida a la incorporación de los desechos sólidos al flujo del agua y la posterior acumulación en el alcantarillado, ocasionan la obstrucción de drenaje y origina el desbordamiento de las aguas, como se muestra en la figura 5.1, donde se muestra un carro que se atasco debido a la inundación.



A lo anterior se debe sumar los problemas de construcción, como se muestra en la figura 5.10, donde se observa la confluencia de aguas negras con las aguas pluviales en los alrededores del bar Fito's, en San Pedro (S7 en Fig. 5.18). Este tramo ha presentado problemas de inundación local, al haber una diferencia de diámetros inversa (entubamiento de un diámetro mayor a un diámetro menor, pendiente abajo), esto se transforma en agua estancada, con un mal olor.

En algunos sitios, los cimientos del alcantarillado se han visto afectados por problemas de confluencia indebida de drenajes, como se muestra en la figura 5.11 en las cercanías de Alma Mater, Sabanilla; la salida del entubamiento de la quebrada Sabanilla, unido a una mala disposición de las aguas de las viviendas aledañas, se unieron para desestabilizar los cimientos de la alcantarilla de la quebrada, originando el pequeño pero problemático deslizamiento de la acera peatonal, así como la desestabilización de los cimientos de las mismas viviendas.



**Figura 5.10: Alcantarilla libre, frente al Bar Fito's, San Pedro.**

## 5.5 Inundaciones de origen natural

Las áreas de inundaciones naturales, han sido definidas por el análisis de fotografías aéreas, trabajo de campo y la información obtenida de los Mapas de Amenazas Naturales Potenciales, de la Comisión Nacional de Emergencias (hoja Torres y Moravia, 1:10 000), clasificándose como áreas de alta susceptibilidad a la inundación y áreas de baja susceptibilidad a la inundación.

### 5.5.1 Áreas con alta susceptibilidad a la inundación

Las terrazas y planicies de inundación son naturalmente susceptibles a inundación, los problemas dentro de éstas son originados por la ocupación de terrazas y planicies de inundación, lo cual, originan

áreas de alta susceptibilidad a la inundación, actividades como: instalación de diques, invasión habitacional, desvió y/o canalización de las quebradas y ríos, modifican el comportamiento natural de los drenajes, aumentando así, el desbordamiento, producto de la disminución de la sección transversal de los cauces.



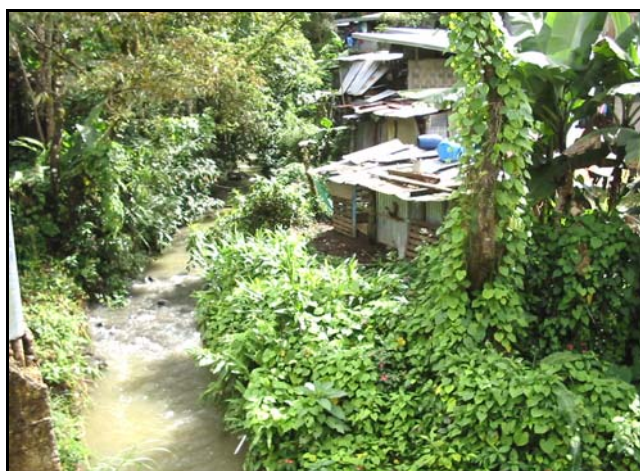
**Figura 5.11: Inestabilidad del terreno producto de la confluencia de las aguas y socavamiento de los cimientos, cerca de Alma Mater, Sabanilla.**

Las terrazas y planicies de inundación, no son mapeables a la escala del trabajo y han sido ubicadas en el Mapa de Puntos Críticos y Áreas Susceptibles a la Inundación (Fig. 5.18).

A continuación se hace un recuento de algunas zonas inundables que están siendo invadidas.

En la figura 5.12, se muestra un pequeño asentamiento en la llanura aluvial de la quebrada Patal, en los alrededores de Salitrillos; es evidente la pequeña diferencia de niveles entre el agua y las viviendas. Además, si se considera que dicha quebrada tiene una cuenca relativamente grande, con un gran aporte de agua, por lo tanto a esta quebrada se le debe de prestar atención. Aguas abajo de este sitio, cerca de la confluencia de la quebrada Patal con el río Torres (S9 en Fig. 5.18), se presenta otra invasión, como se muestra en la figura 5.13.





**Figura 5.12: Área de inundación de la quebrada Patal, en los alrededores de Salitrillos.**



**Figura 5.14: Área de inundación del río Torres, en los alrededores de San Rafael.**



**Figura 5.13: Invasión de la llanura aluvial de la quebrada Patal invadida por viviendas, Salitrillos.**



**Figura 5.15: Muro de contención que encausa el río Torres, cerca de San Rafael.**

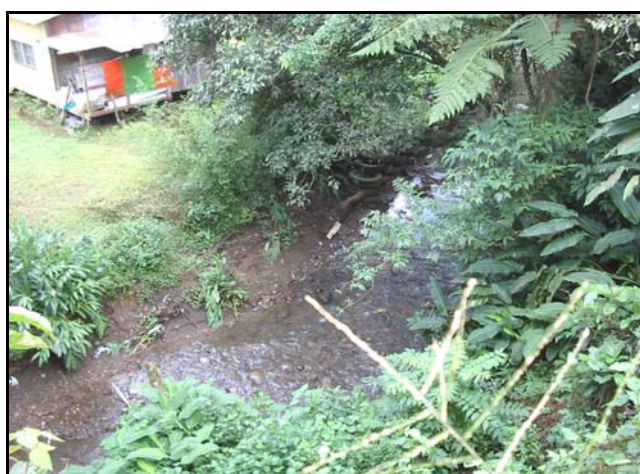
Un caso similar ocurre en los alrededores de San Rafael. La llanura aluvial del río Torres es invadida por una serie de viviendas (Fig. 5.14), las cuales para maximizar el área de construcción encausaron el río por medio de un muro de aproximadamente 30 m, como se muestra en la figura 15, se debe notar que los cimientos de dicho muro, se encuentran en los materiales depositados por el mismo río. En el mismo río se presentan gran cantidad de desechos sólidos (Fig. 5.9 y 5.16), dentro de los cuales podemos mencionar láminas de zinc, llantas de automóvil, ect.

Entre las técnicas que los personas utilizan para disminuir los efectos de las avenidas de los ríos, está la instalación de diques, en los cuales utilizan cualquier material, por ejemplo llantas, como es el caso en alrededores de Salitrillos, como se muestra en la figura 17. Los propietarios de las viviendas vecinas, ubicadas en la llanura de inundación del río, colocaron llantas para evitar los desbordamientos que se puedan presentar en el río Torres. Según los vecinos, este dique a resultado efectivo, para evitar el desbordamiento del río, así como la socavación de la terraza.





**Figura 5.16: Desechos sólidos en el cauce del río Torres, en las cercanías de San Rafael.**



**Figura 5.17: Área de inundación, en el río Torres, en las cercanías de Salitrillos.**

Las zonas de inundación definidas por la Comisión Nacional de Emergencias (C.N.E), en los Mapas de Amenazas Naturales Potenciales (hoja Torres y Moravia, escala 1:10 000), se han considerado en el presente trabajo como zonas de alta susceptibilidad a la inundación, al contar con un registro histórico del área afectada. En el Mapa de Ubicación de Puntos Críticos y áreas Susceptibles a la Inundación (Fig. 5.18), se muestran las áreas de inundación obtenidas de la C.N.E., estas áreas corresponden con pequeñas terrazas dentro de los valles fluviales de la parte baja del cantón.

### 5.5.2 Áreas con baja susceptibilidad a la inundación

El análisis de formas del terreno se realizó a partir de la clasificación de acuerdo a su morfogénesis, según los criterios de van Zuidan (1986), por lo que se considera a la unidad de *Valles fluviales de pendiente baja a moderada*, como una zona de susceptibilidad baja. Están compuestas principalmente por terrazas y

planicies de inundación, al no contar con registros históricos, se consideran que estos drenajes presentan periodos de retorno grandes, excepto los registros aportados por la C.N.E., en general, estas inundaciones son locales e influenciadas en baja a alto grado por las actividades antrópicas, mencionadas anteriormente,

En la figura 5.18, se muestran las áreas de susceptibilidad baja, localizadas en los valles de los ríos y quebradas de la zona baja del cantón, cabe resaltar que la mayor parte de los problemas antrópicos, expuestos anteriormente, se localizan dentro de las áreas de susceptibilidad baja.

## 5.6 Posibles medidas de corrección y mitigación

Como se ha expuesto anteriormente, los principales problemas de inundación que se presentan en el Cantón de Montes de Oca, están relacionados con la invasión de los ríos y quebradas, problemas de diseño y mantenimiento de los drenajes en las áreas bajas del Municipio, a los que se les debe de prestar atención inmediata. Además, la falta de una cultura orientada a la educación, conservación y manejo de las cuencas, aumentan los problemas de inundación.

Algunas medidas, para la disminución o incluso eliminación de las inundaciones en el cantón, se mencionan a continuación.

### 5.6.1 Alternativas de drenaje

El principio de las técnicas, que a continuación se describen, es el desvío del excedente de las aguas llovidas hacia el subsuelo, conociendo claramente las características topográficas, demográficas, geomorfológicas, geológicas, hidrológicas y geotécnicas del área analizada.

Para el caso del cantón de Montes de Oca, la determinación de las características hidrogeológicas del cantón, estuvo más allá del alcance del presente estudio, pero los autores manifiestan expresamente, que por las condiciones observadas en el campo, las técnicas de drenaje recomendadas a continuación, no se garantizan como mejor solución al problema, hasta que se disponga de campo de infiltración apropiados, en el sentido de un mejoramiento de la conductibilidad hidráulica de los suelos del municipio.

1) Dentro de las técnicas alternativas de drenaje urbano, para los excedentes de agua de escorrentía, la cual no puede ser desaguada por el sistema de drenaje (tanto natural como artificial), en el momento que sea requerido, se pueden diseñar campo de infiltración, con un sistema de alcantarillado que tome ese excedente de agua, en puntos como canales de alivio,

dirigiéndolos a dichos campos. En la superficie, las áreas designadas para los campos de infiltración, se pueden utilizar como parques, parqueos o cualquier otro tipo de construcción recreativa.

2) Campos de infiltración de menor escala, pero de mayor densidad, se pueden instalar en cada residencia, proyectos habitacionales o comerciales, de tal manera que en lugar de enviar el agua llovida al alcantarillado público, sea infiltrado en los suelos adyacentes al sitio.

3) Los aspectos paisajísticos y recreativos pueden ser favorecidos cuando el agua excedente sea almacenada en estanques o lagos, los cuales pueden ser combinados con los campos de infiltración para obtener un mayor volumen de agua utilizada.

4) Pozos de infiltración y/o inyección, pueden ser utilizados como medidas alternas en el drenaje urbano, siempre que se tenga presente las condiciones hidrogeológicas del área, ya que se puede modificar las condiciones de los acuíferos existentes en la zona, por la contaminación y alteración del medio.

5) Además de pozos y zanjas de infiltración, se pueden desarrollar asfentos, los cuales sean más permeables y con drenajes diseñados para cada caso, según Marco & Cayuela (1992).

Las soluciones o técnicas antes mencionadas, ayudan a reducir la cantidad de agua en escorrentía, pero cabe retomar, que se deben de conocer tanto las características hidrogeológicas, geomorfológicas, geotécnicas y ambientales del área en estudio. Así como desarrollar y mantener una cultura de manejo apropiado de las cuencas hidrográficas.

### 5.6.2 Corrección de problemas civiles

Los problemas hidráulicos del cantón deben de ser corregidos a corto plazo, para disminuir la susceptibilidad a la inundación. El mejoramiento del alcantarillado, la limpieza de los cauces y puentes es fundamental.

### 5.6.3 Educación de la población.

La creación de campañas orientadas a los habitantes del cantón para el conocimiento y cuidado de las cuencas, así como del recurso hídrico en general, ayudará en gran medida, a la disminución de la susceptibilidad a las inundaciones. Delimitar las zonas protectoras de los ríos y quebradas, así como las zonas de inundación natural, aportadas en este trabajo; para restringir el desarrollo en estas áreas, así como, desarrollar campañas de limpieza de los cauces, darán soluciones a corto plazo.

## 6. Fallas, historial sísmico y peligros volcánicos

### 6.1 Introducción

El contexto geológico de Costa Rica es muy complejo debido principalmente a su ubicación en un ambiente de subducción. La subducción produce en el país una elevada actividad sísmica y es además la responsable de la formación y ubicación de sus volcanes.

La mayoría de los sismos originados cerca o dentro del territorio nacional tienen magnitudes<sup>1</sup> relativamente bajas ( $M_L < 3,5$ ) y no son percibidos por la población (Intensidad<sup>2</sup> MM < III). Por otra parte existen sismos que son sentidos pero no generan daños considerables (intensidad MM de IV a VI) y otros que si generan daños y además pueden llevar a consecuencias catastróficas (intensidad MM > VI). La ocurrencia de sismos grandes ( $M_L > 5,0$ ), especialmente los de poca profundidad (menos de 30 km) resulta más trascendente para las personas puesto que alteran el orden civil.

Se ha determinado que las catástrofes volcánicas generan un 2 % de las pérdidas totales por desastres asociados a procesos naturales (Ortiz, 1996). El ser humano y sus actividades pueden verse seriamente afectados por estos procesos, especialmente en áreas con un desarrollo económico y demográfico creciente, como es el caso del Valle Central en Costa Rica.

A diferencia de los eventos sísmicos, los procesos volcánicos relevantes se presentan con una frecuencia mucho menor, debido a ello las personas se olvidan rápidamente de su ocurrencia y principalmente de sus efectos asociados. Hoy día el desarrollo urbanístico, industrial y agropecuario en áreas cercanas a edificios volcánicos se incrementa cada vez más; el carácter fértil de los suelos y el clima son básicamente las razones por las cuales se opta por el desarrollo en estas zonas. Si a esto se suma la falta de un ordenamiento territorial integrado, se puede decir que la vulnerabilidad y amenaza ante futuros procesos volcánicos aumenta.

Este capítulo pretende brindar un panorama general sobre cómo los procesos sísmicos y volcánicos que operan en Costa Rica podrían afectar directa o indirectamente al cantón de Montes de Oca. Esta información constituye un insumo importante tanto para

<sup>1</sup> Magnitud (sismos): es la medida del tamaño de un terremoto.

<sup>2</sup> Intensidad: Es una medida de la sacudida sísmica, obtenida del daño causado a estructuras edificadas por el hombre, y de los efectos del terremoto en la superficie de la tierra y sobre la población. MM: escala de Mercalli modificada.



el plan regulador del Municipio como para un plan futuro de gestión del riesgo.

El capítulo se ha dividido en tres partes. En la primera se trata la geotectónica del país. En la segunda se tratan los aspectos relacionados a los procesos sísmicos y se hace una recopilación y análisis sobre los sismos históricos (de los cuales no se tienen registros instrumentales), las fallas, la neotectónica y la sismicidad instrumental relacionados al cantón de Montes de Oca y zonas aledañas. La tercera parte es concerniente a los procesos volcánicos y se identifican de manera general los distintos peligros volcánicos que pueden manifestarse dentro del cantón.

## 6.2 Contexto geotectónico<sup>3</sup> de Costa Rica

Costa Rica se localiza en un contexto de subducción. La placa del Coco se desplaza al noreste con una velocidad absoluta de 6,5 cm/año y al chocar contra la placa Caribe (que se mueve 1,9 cm/año) se hunde por debajo de ésta. Este proceso es capaz de generar sismos debido a la liberación de energía provocada por la fricción entre las placas (temblores interplaca, entre 10-40 km de profundidad), así como a los esfuerzos internos dentro de la placa Caribe (temblores intraplaca, entre 10-15 km de profundidad); también el proceso de subducción provoca la formación de fallas corticales ubicadas dentro de la placa Caribe y es además el responsable de la generación de magmas, que son el motor de la actividad volcánica. La orientación y ángulo de la zona de subducción es la que controla la posición de las cadenas volcánicas de Costa Rica (noroeste-sureste).

Otro rasgo geotectónico importante para nuestro país es la Falla de Panamá (constituye parte del límite entre las placas Coco y Nazca), la cual es una zona de fractura de alta sismicidad. Asimismo, algunos autores sugieren la existencia de una subplaca llamada Microplaca Panamá, cuyo límite noroeste estaría situado a lo largo de la región central de Costa Rica, esta zona se caracteriza por la presencia de gran cantidad de fallas (incluidas las del Valle Central) y se conoce como Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica.

Otras estructuras geotectónicas importantes son el levantamiento de Cocos (cuyo punto más elevado es la Isla del Coco) y cuyo eje se está subduciendo frente a las costas de la península de Osa y el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (relacionado al terremoto de Limón de 1991). En la figura 6.1 se resume el contexto geotectónico general de Costa Rica.

<sup>3</sup> *Tectónica*: Es el estudio de los movimientos y deformación de la corteza terrestre a gran escala.

## 6.3 Sismicidad y neotectónica

### 6.3.1 Sismicidad y fuentes sísmicas del Valle Central de Costa Rica

En el Valle Central, gran parte de la liberación de energía sísmica se lleva a cabo por medio de fallas corticales (temblores intraplaca) (Montero & Dewey, 1982; Morales, 1985). Según Fernández & Pacheco (1998), la profundidad promedio de los hipocentros<sup>4</sup> para los sismos en el Valle Central se estima en unos 12,3 km.

Los sismos de mayor magnitud (Ms) en el Valle Central tienen valores promedio entre 5,0 y 6,5 (Fernández & Montero, 2002). Algunos de los terremotos más destructivos de Costa Rica han ocurrido en fallas ubicadas en este valle, tal es el caso de los terremotos de Cartago (1910) y Fraijanes (1888), entre otros. Los sismos que han ocurrido en el Valle Central han llegado a originar intensidades (VII-IX MM) y aceleraciones importantes (0,2-0,5 g) (Montero 1983; Morales, 1985).

La sismicidad del cantón de Montes de Oca está ligada a muchas de las fuentes sismogénicas que afectan directamente al Valle Central (Fig. 6.2); éstas fuentes sísmicas se localizan en toda la región central de Costa Rica y no están asociadas a límites políticos ni geográficos. La ocurrencia de un sismo de gran magnitud (mayor a 5,5) en esta zona provocará sin duda considerables daños al cantón.

### 6.3.2 Principales fallas cercanas al cantón de Montes de Oca

La identificación de una falla<sup>5</sup> o sistema de fallamiento (conjunto de fallas) constituye el eje central para cualquier estudio relacionado con la sismicidad de una región. Es necesario conocer las características geológicas y sismológicas de cada falla, por ejemplo, su ubicación, dirección, su expresión en superficie, si es activa o no, el tipo de falla, su relación con el contexto geológico, etc.; esta información constituye un aporte significativo para un estudio riguroso posterior de amenaza sísmica.

<sup>4</sup> Lugar bajo la superficie en donde se produce el sismo, es perpendicular al epicentro.

<sup>5</sup> Zona de debilidad cortical con un patrón lineal.





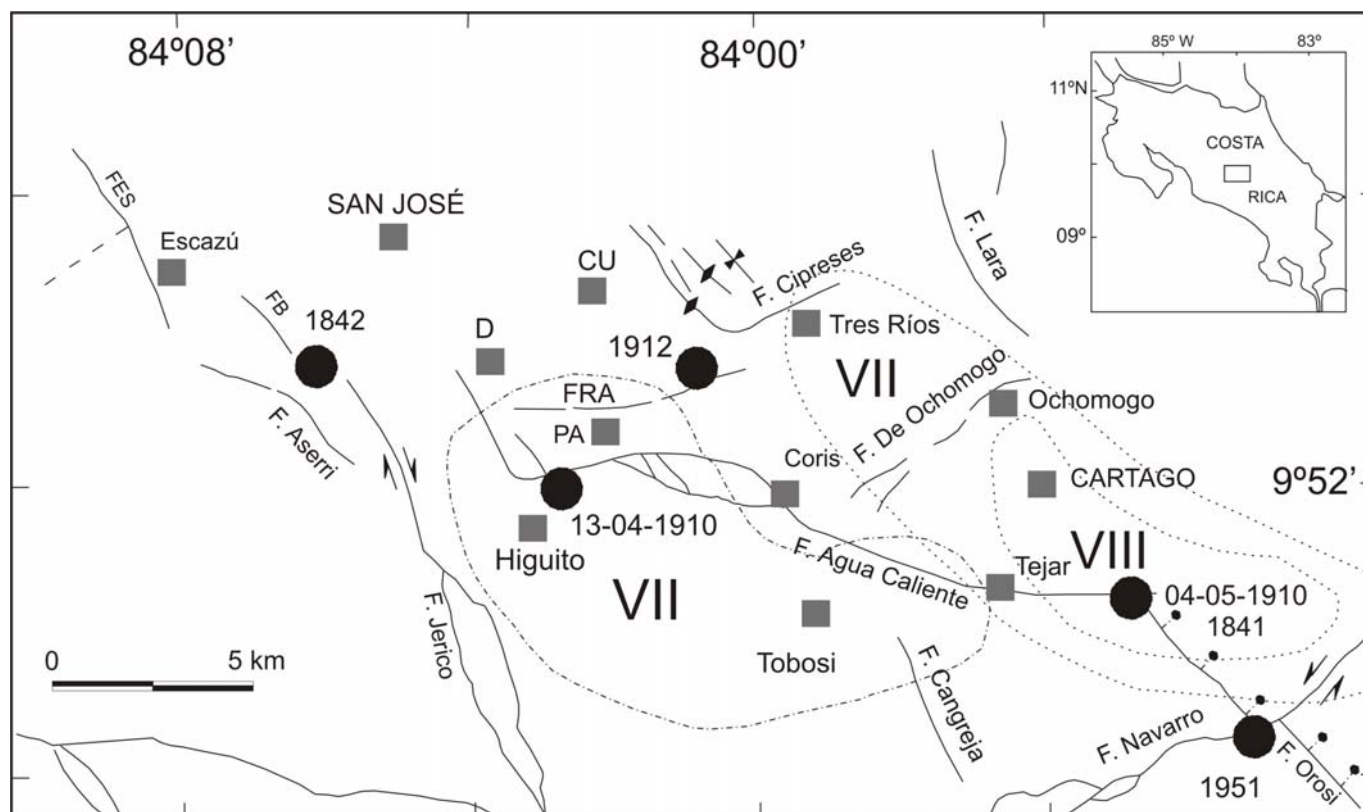


Figura 6.2: Mapa de Fallas ubicadas al sur del Valle Central, (Tomado de Fernández & Montero, 2002).

Para este trabajo se realizó un inventario de las fallas más importantes ubicadas hacia la parte sur y este del Valle Central (Fig.6.3), la razón de ello obedece a la ubicación geográfica del cantón y a los precedentes sísmicos históricos de esta zona. Se pretende así, brindar una perspectiva del contexto geológico-estructural de la región y también algunos criterios técnicos y científicos relacionados al tema de la sismicidad y la neotectónica.

Antes de profundizar en el tema debe aclararse y definirse apropiadamente el concepto de alineamiento utilizado en esta investigación. Un alineamiento es una geoforma o un conjunto de geoformas con un patrón lineal; esta linealidad puede obedecer a varias causas, por ejemplo la dirección de rumbo de capas sedimentarias la orientación de focos eruptivos, etc; los alineamientos acá mencionados se refieren a elementos morfotectónicos asociados (con criterios neotectónicos) a la presencia de la traza de una falla (p.e. escarpes o sillas de falla).

Algunas de las fallas descritas en este trabajo (Laguna, Dorita y Cipreses) fueron determinadas mediante la interpretación de fotografías aéreas y revisión de las geoformas en el campo. La interpretación resultó difícil debido a las características urbanas de la zona, principalmente en la parte oeste del cantón. Por otra parte las características litológicas de los depósitos

volcánicos dificultaron aún más la búsqueda de evidencias de falla, pues resulta complejo determinar y observar desplazamientos u estrías de planos de falla en depósitos volcánicos cuaternarios<sup>6</sup>.

### Sistema de falla Lara

Se localiza 5,3 km al noreste del cantón de Montes de Oca; según Montero *et al.* (1998) consiste de 4 fallas con segmentos de desplazamiento orientados con rumbo NW y buzando<sup>7</sup> al SW (fallas Lara, Rancho Redondo, Laguna y Dorita); el segmento principal es la falla Lara y se extiende a lo largo de 18 km; Montero (2001) basado en criterios geomorfológicos sugiere una componente dextral para esta falla. El terremoto de San Antolín de 1841 (magnitud 6,5) ha sido asociado a la falla Lara (Peraldo & Montero, 1999).

### Neotectónica

En esta investigación se buscaron nuevas evidencias neotectónicas asociadas con este sistema de fallamiento, específicamente para las fallas Laguna y Dorita mencionadas por Montero *et al* (1998).

<sup>6</sup> Depósito de material reciente.

<sup>7</sup> El buzamiento corresponde a la inclinación del plano de falla.

La falla Laguna presenta un alineamiento que se extiende en dirección nor-noroeste a lo largo de aproximadamente 5,5 km; además muestra en su extremo sureste un facetamiento<sup>8</sup> rectangular con escarpes de 25-30 m de altura (Fig. 6.4); en su sector noroeste las facetas tienen una forma más triangular con alturas entre 40-50 m. También se identificaron sillas de falla<sup>9</sup> (Fig. 6.5), una de ellas se localiza en el sitio conocido como Laguna y se expresa morfológicamente por un pequeño valle alineado; otros elementos neotectónicos asociados a la falla Laguna son bermas<sup>10</sup>, colinas alargadas, contraescarpes (Fig. 6.6) y ríos desplazados dextralmente. No se encontraron evidencias de movimiento dentro de los depósitos volcánicos para esta falla.



**Figura 6.4: Fotografía del facetamiento rectangular asociado al alineamiento Laguna, foto tomada hacia el NE.**



**Figura 6.5: Fotografía de una silla de falla asociada al alineamiento de Laguna, ambas laderas forman un pequeño valle lineal.**



**Figura 6.6: Fotografía de contraescarpe de la silla asociada al alineamiento Laguna.**

La falla Dorita presenta dos alineamientos, uno (falla Dorita 1) con rumbo nor-noroeste y el otro (falla Dorita 2) con orientación noroeste; estas fallas se extienden a lo largo de 6,7 y 5,5 km respectivamente.

La falla Dorita 1 muestra un escarpe evidente en su extremo sureste de unos 100 m de altura, por su parte la falla Dorita 2 muestra frentes de escarpes hacia el suroeste con alturas entre 30-40 m aproximadamente. Ambas fallas presentan además sillas de falla (Fig. 6.7) y contraescarpes. Otra geoforma neotectónica es una zona deprimida y plana en la parte trasera de un escarpe asociado a la falla Dorita 2, esta zona se interpretó como un cuaternario represado en cuya base se encuentra la traza del alineamiento.

Las fallas Laguna y Dorita son consideradas como fallas neotectónicas (afectan depósitos cuaternarios) sin embargo no pueden ser calificadas como fallas activas<sup>11</sup>, pues no se encontró evidencias de actividad reciente (últimos 10 mil años).

El cuarto segmento es definido por Montero *et al* (1998) como falla Rancho Redondo, su orientación es hacia el noreste y se extiende a lo largo de 8 km de longitud, no se buscó evidencias neotectónicas para esta falla en este estudio.

### Falla Cipreses y sistema de pliegues asociados

La falla Cipreses es la fuente sísmica conocida de mayor peligro dentro del cantón de Montes de Oca. El extremo noroeste de esta falla se incluye en este trabajo en la parte central del cantón. Anteriormente esta falla era relacionada con un alineamiento sugestivo de fallamiento reciente llamado Granadilla (Montero *et al*, 1998; Woodward & Clyde, 1993).

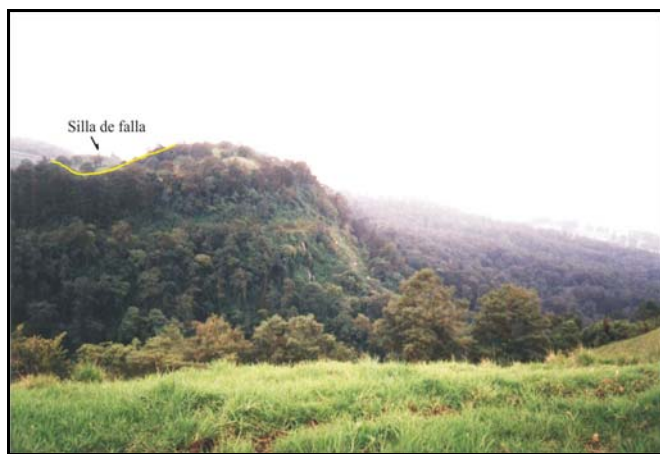
<sup>8</sup> Faceta es una geoforma de erosión del frente de un escarpe

<sup>9</sup> Depresión del terreno similar a una silla de montar, asociada a la traza de una falla.

<sup>10</sup> Cambio de inclinación en la pendiente de una ladera.

<sup>11</sup> Falla que ha tenido actividad en los últimos 10 mil años.





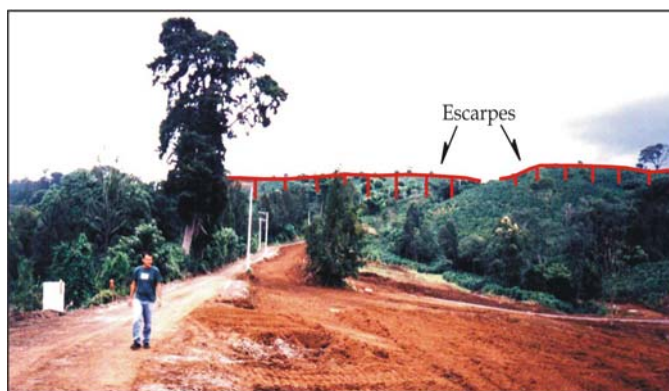
**Figura 6.7: Fotografía de silla de falla asociada al alineamiento principal de Dorita.**

Esta falla se ubica básicamente al SE del Cantón de Montes de Oca, entre Granadilla y Tres Ríos. De acuerdo con Fernández & Montero (2002), la traza corresponde con un pliegue sinclinal<sup>12</sup> que pasa cerca del Río Pío; además estos mismos autores la consideran como una falla activa.

### Neotectónica

La falla Cipreses muestra expresiones geomorfológicas más claras en su extremo sureste (fuera del cantón) (Fig. 6.8) y en su parte central, donde sobresale un escarpe de rumbo este-oeste que luego se desvía en dirección noroeste en la zona de Cipreses; este escarpe presenta una altura entre 30 y 40 m. En su extremo noroeste las evidencias geomorfológicas son difíciles de observar, la traza está definida con base en escarpes de menor altura y se extendió hasta dentro del cantón de Montes de Oca, culminando en la zona de Hortensias (fuera del cantón). La longitud total estimada para esta falla es de 8 km.

De acuerdo con Fernández & Montero (2002), esta falla corresponde en su extremo oeste y sur con una serie de superficies geomorfológicas abovedadas de rumbo noroeste a este-oeste, que se relacionan con una secuencia de pliegues sinformas y antiformas asociados con una falla de propagación. También estos autores mencionan la existencia de fallamiento con separación normal separando capas de suelo, en un afloramiento localizado al norte de San Juan; esto indica que la falla es activa.



**Figura 6.8: Fotografía del escarpe asociado a la traza de la Falla Cipreses.**

### Falla Agua Caliente

Se localiza 6 km al sur del cantón de Montes de Oca; es una falla activa y de acuerdo con Fernández y Montero (2002) su traza activa se inicia al sur de la Loma Salitral y continúa hacia el oeste con rumbo oscilante entre este-oeste y oeste-noroeste; su movimiento predominante es sinistral<sup>13</sup> y en su extremo este la falla tiene una menor prominencia; por su parte, se ha propuesto la existencia de alineamientos sugestivos relacionados con esta falla en su extremo oeste que se ubican por debajo de la ciudad de San José (Montero *et al*, 2002). De acuerdo a esto la longitud total aproximada de la falla es de 17 km.

Montero & Miyamura (1981) sugirieron que la falla Aguacaliente originó el terremoto de Santa Mónica en Cartago del 4 de mayo 1910.

### Neotectónica

La falla Agua Caliente presenta geomorfológicamente alineamiento de promontorios truncados, contraescarpes en depósitos recientes, valles y fuentes termales alineados, lomos de falla y sillars de falla (Fernández & Montero, 2002).

### Falla Río Azul

Se localiza 4,5 km al sureste del cantón de Montes de Oca. No obstante una traza inferida de esta falla ha sido extendida por Montero *et al* (2002) muy cerca del límite oeste entre el cantón y San José. El rumbo de la falla Río Azul es este-noreste y tiene una longitud de unos 5 km (Fernández & Montero, 2002).

Eventualmente esta falla representa un gran peligro para el cantón de Montes de Oca, debido a su

<sup>12</sup> Disposición del material o la roca en forma de u.

<sup>13</sup> Movimiento relativo entre dos bloques hacia a la izquierda uno con respecto al otro.

proximidad con la zona de mayor densidad de población.

### Neotectónica

Se caracteriza por un profundo valle lineal cuando atraviesa la quebrada Quebradas, también presenta sillars de falla, espolón truncado y facetamiento triangular (Fernández & Montero, 2002).

### 6.3.3 Sismicidad histórica del Valle Central de Costa Rica

El conocimiento de la sismicidad histórica nos permite conocer los entornos geográficos que fueron impactados por acontecimientos sísmicos en el pasado reciente (Peraldo & Montero, 1999), también nos dan una idea del potencial sísmico de las fuentes sísmicas que existen en un área; en este caso el Valle Central y específicamente el cantón de Montes de Oca.

Este tipo de estudios son fundamentales dentro de estudios de amenaza sísmica, pues es difícil saber si existen o no fallas activas en una determinada zona si

no conocemos los sismos históricos (Peraldo & Montero, 1999).

En el caso del Valle Central se revisó la actividad sísmica histórica de los últimos 200 años, pues es el período en donde se pueden obtener localizaciones epicentrales más confiables. A lo largo de este tiempo no se encontró referencia de ningún sismo destructivo con epicentro en el cantón central de San José y mucho menos en el cantón de Montes de Oca.

En el cuadro 6.1 se describen los eventos sísmicos más trascendentes ocurridos dentro del Valle Central durante los siglos XIX y XX. Se incluyen también algunos sismos que provocaron daños de consideración en el Valle Central pero ubicados fuera de éste; además se resumen los efectos provocados por los sismos y se enfatiza en la provincia de San José y en algunas ocasiones se detalla para el cantón de Montes de Oca (MO).

**Cuadro 6.1: Sinopsis de los sismos más importantes ocurridos durante los siglos XIX y XX en el Valle Central de Costa Rica y otros que lo han afectado severamente.**

Sismo	Fecha	Hora (TL)	M (Ms)	I (MM) (S. José)	A (% g)	Efectos (San José)
Valle Central						
10 Junio <sup>◇</sup>	10-06-1835	-	5,4	VII	-	Efectos en Escazú, daños en templo.-
San Antolín <sup>◇</sup>	02-09-1841	06: 30	6,0- 6,5	VII <sup>□</sup>	-	Daños muy fuertes, en Cartago y San José, 38 muertos. Asociado a la falla Lara.
Alajuelita <sup>◇</sup>	21-03-1842	-	5,4	VII	-	Bastante fuerte, causó algunos daños. Asociado a la Falla Aserri o Belo Horizonte*
Alajuela <sup>□</sup>	18-03-1851	07:15	5,4- 6	VIII	-	Daños importantes (145 casas sufrieron daños).
Fraijanes*	30-12-1888	04:12 30 km	5,8 *	VI	30-50	Muchas Personas asustadas, muebles desplazados. Des-trucción en muchas viviendas de adobe y en algunas edificios incluyendo la Catedral de San José.. 36 casas caídas, 732 casa inutilizadas, 832 casas para reparación. 5 edificios públicos para reparación.*
Cartago* (El Tablazo)	13-04-1910	01:05 12 km	5,2 *	VI –VII VI-VII (S.Pedro, Sabanilla, S. Rafael)	-	Sabanilla y San Pedro de Montes de Oca sufrieron más daños que San José pese a estar más alejados del epicentro. Esto obedece a un comportamiento diferente del suelo. ♦ +
Santa Mónica, Cartago ♦	04-05-1910	18:47 18 km	6,4	V-VI V (S. Pedro y Sabanilla)	-	Destrucción parcial de Cartago,. Daños en otras partes del valle central. (Falla Agua Caliente)
Tres Ríos*	1912	-	5,0 - 5,5	-	-	Daños en Tres Ríos
Patillos♦	30-12-1952	06:07 18 km	5,9	V VI (MO)	-	Fuerte y sin daños.

◇Peraldo & Montero(1999); □ Montero (1989); ♦Montero & Miyamura (1981);\* Morales *et al* (1992), \*González (1910); +Alfaro (1924); • Montero & Alvarado (1995);\* Montero *et al* 2002 , ♦ Rojas (1993) \*M<sub>L</sub>.