

9. ANÁLISIS DE LAS INESTABILIDADES

Como ya se ha indicado, las inestabilidades constituyen una de las amenazas principales presentes en el área de estudio, no tanto en cuanto al proceso de movimiento de ladera en sí, sino por las consecuencias que éste acarrea. La gran cantidad de material que se genera con estos movimientos, queda depositado al pie del talud, lugar de los cauces de las quebradas. Estos materiales pueden ser arrastrados por las aguas durante el periodo de lluvias, haciendo variar la dinámica de las quebradas y llevando asociado en último término la ocurrencia de avenidas e inundaciones.

En el siguiente capítulo se realiza una caracterización de las inestabilidades identificadas en cuanto a su tipología, para lo cual se creó un inventario en el que se reflejan las características de estas zonas (anexo1), y su localización, representada mediante la cartografía de las áreas afectadas (mapa n°7."inestabilidades gravitatorias".anexo2)

Por otra parte se ha realizado una caracterización de los factores condicionantes y desencadenantes de estos procesos, para ofrecer un mayor entendimiento de su dinámica.

Los factores condicionantes son aquellas características propias del terreno que determinan en qué puntos concretos se pueden generar movimientos de ladera, determinando principalmente la tipología, mecanismos y modelos de rotura. Es decir, son aquellas componentes del terreno que lo van a hacer más o menos vulnerable a la ocurrencia del fenómeno estudiado. Se han considerado siete factores condicionantes: pendientes, grado de fracturación, litología, vegetación, orientación de laderas, geomorfología y procesos activos, de los que se han realizado las correspondientes cartografías. La influencia de cada uno de estos factores se detalla en el apartado correspondiente, en el que se explica la metodología empleada para la elaboración de los mapas temáticos.

La identificación de estos factores y el inventario de inestabilidades ha sido la base para la elaboración del mapa de susceptibilidad por inestabilidades de ladera del volcán de Usulután.

Los factores desencadenantes son aquellos que determinan el momento de ocurrencia de un proceso. Son responsables, en gran medida, de la magnitud de los movimientos. En el caso de ocurrencia de inestabilidades de ladera en el área de estudio, son los sismos y el comportamiento hídrico los generadores de estos movimientos. Ambos factores han sido analizados con el fin de establecer una probabilidad de ocurrencia y evolución.

9.1. Caracterización de la Amenaza

Durante el trabajo de campo se llevó a cabo la identificación de inestabilidades de ladera en las quebradas de estudio más en detalle y de forma general para todo el volcán. Estas fueron cartografiadas e inventariadas, como ya se ha indicado, con el fin de analizar tipologías, dimensiones, depósitos asociados, grado de desarrollo, grado de estabilidad, entre otras características. No han sido caracterizadas el total de las inestabilidades cartografiadas por la dificultad de acceso a algunas áreas.

9.1.1. Tipología de las inestabilidades

De forma general se pueden diferenciar dos tipos de movimientos de ladera, los deslizamientos (traslacionales o rotacionales) y los desprendimientos. Los tipos de inestabilidades identificadas en el campo son principalmente deslizamientos traslacionales, en conjuntos de depósitos piroclásticos y niveles de colada basáltica intercalados, con desprendimientos asociados.

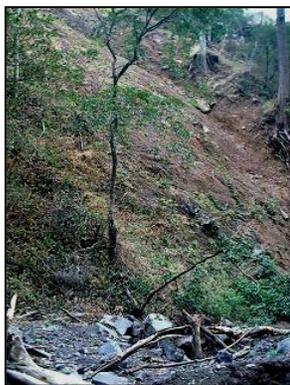


Foto 15- Deslizamiento traslacional en la quebrada El Cargadero

Deslizamientos

Los deslizamientos traslacionales se producen a favor de una rotura generada por la existencia de planos de debilidad con dirección más o menos paralela a la superficie del talud e inclinación menor o igual que la cara del talud. Generalmente es una superficie de discontinuidad estructural o de contacto entre dos materiales de diferente competencia, piroclastos y niveles de colada de lava, la que ha servido de plano de rotura. Son

desplazamientos poco profundos con relación a la longitud del deslizamiento. Se observan así unas alturas medias de escarpes de unos 70m., correspondiendo con unas profundidades de 2 a 3m. Se pueden producir en vertientes suaves, aunque generalmente se encuentran asociados a la ladera alta del volcán y vertientes de las quebradas, con pendientes mayores del 30%. Es el tipo de movimiento predominante en las tres quebradas.

Los deslizamientos de bloques rocosos están controlados por superficies de discontinuidad en las que el esfuerzo cortante supera la resistencia a la cizalla. Tiene una enorme importancia el sistema de fracturas y diaclasas que afectan a la roca masiva, pero también influyen otros factores como la variación de la presión del agua entre las fracturas o grietas y la meteorización de la roca. La rotura tenderá a ser progresiva ya que el debilitamiento en un punto cualquiera de la roca producirá esfuerzos adicionales en otros puntos. Son movimientos asociados a las cabeceras de las quebradas, con un importante control de la red de fracturación y favorecidos por las altas pendientes y la meteorización de los basaltos.

Desprendimientos

Los desprendimientos son aquellos movimientos que implican la caída de bloques de un talud (cuyo ángulo de pendiente es mayor de 40%), individualizados por planos de rotura, con caída libre al menos en parte de su recorrido. El material se deposita a cotas más bajas o al pie del talud. Generalmente este mecanismo ocurre en taludes escarpados, en aquellas zonas que ya han sido afectadas por los deslizamientos traslacionales y desprovistas de cobertera. Los niveles de basaltos, intercalados entre depósitos piroclásticos de menor competencia fácilmente erosionables, se presentan dando resalte en el terreno, por lo que la propia fuerza de la gravedad provoca la caída de los bloques.

Este mecanismo está condicionado por las características geomecánicas de la roca, como la existencia de diaclasas y fallas, más que por la resistencia de las mismas. La superficie de rotura que individualiza al bloque verticalmente puede ser una discontinuidad preexistente o una grieta de tracción provocada por los sismos. En el caso de erosión diferencial de materiales, estas grietas son provocadas por la pérdida de sustentación del bloque que sobresale.

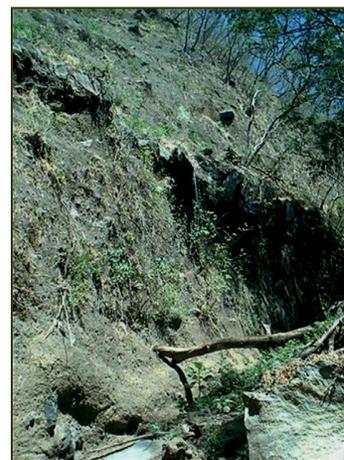


Foto 16- Niveles basálticos sobre depósitos piroclásticos de menor competencia.

La pérdida de resistencia y apertura de las superficies de discontinuidad es motivada, en gran medida, por la presencia de agua en las mismas, dando lugar a la creación de presiones intersticiales que actúan sobre el bloque.

Estos procesos ocurren de manera relativamente frecuente, desencadenados por los continuos sismos o las precipitaciones (ver apartado 9.3). En zonas en las que la roca material se encuentra más disgregada, la caída en conjunto de pequeños bloques y partículas finas puede ser provocada por la actuación de los vientos.

En algunos lugares encontramos deslizamientos denominados complejos, en los que se produce un deslizamiento rotacional, (a favor de un plano de rotura curvo), en las partes elevadas del talud, y un deslizamiento traslacional, (a favor del plano del talud). Las zonas superiores muestran profundidades mayores, mientras que el movimiento traslacional conlleva un arrastre más superficial, en el que en ocasiones sólo se ven involucrados en el proceso las fracciones de suelo y cobertera vegetal.

9.1.2. Grado de desarrollo

El grado de desarrollo en el que se encuentran las inestabilidades varía desde zonas en las que se observa un proceso de lavado incipiente de suelo y cobertera vegetal, hasta áreas en las que el conjunto de la ladera se presenta inestable. En el inventario de inestabilidades (anexo1) se muestra el grado de desarrollo que ha sido identificado para cada inestabilidad. Los criterios usados para establecer este rango han sido las dimensiones del escarpe, ancho, largo y, especialmente la profundidad.

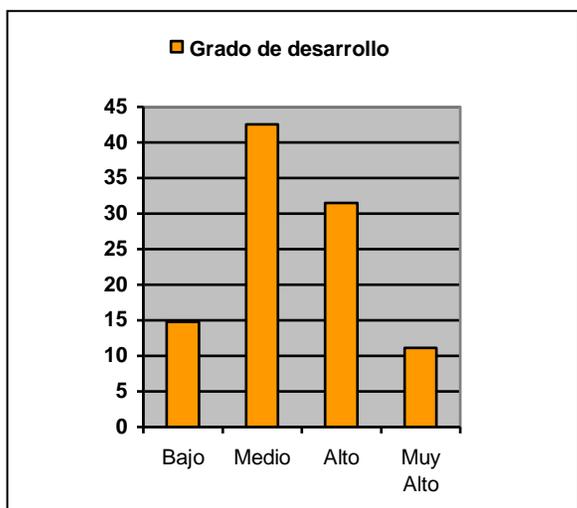


Fig-1. Grado de desarrollo de las inestabilidades de ladera de las quebradas El Cargadero, La Quebradona y California

Como puede observarse en el gráfico, las inestabilidades se encuentran principalmente, en un grado de desarrollo de medio a alto, siendo menor el número de zonas con desarrollo bajo o muy alto. Esto es muestra de que no existe un grado de equilibrio en las laderas. A priori se puede estimar que las zonas que actualmente presentan un grado de desarrollo medio, tiendan a evolucionar hacia un grado de desarrollo alto, en el que se encuentran más del 30% de las inestabilidades identificadas.

9.1.3. Grado de estabilidad

El grado de estabilidad ha sido estimado en función de la actividad, determinada por el volumen de depósitos y el desarrollo de vegetación y de la existencia de grietas en las cabeceras de las inestabilidades.

El volumen de depósitos presentes, cuando no han sido erosionados, y el tipo o ausencia de vegetación en escarpes y depósitos, nos dan una idea sobre el grado de actividad de las inestabilidades. Como el estudio ha sido realizado durante la estación seca, aquellos depósitos que se presentan nada consolidados ni lavados y con ausencia de vegetación, evidencian una actividad reciente. Por el contrario, los depósitos que presentan una vegetación desarrollada, asociados a escarpes igualmente vegetados, reflejarían una menor actividad y por tanto una mayor estabilidad. No hay que olvidar sin embargo que nos encontramos bajo un clima muy propicio para el desarrollo de vegetación, y que la presencia de una vegetación arbórea en escarpes o depósitos no implica necesariamente más de tres años para su formación.

La estimación del volumen de depósitos se ha realizado no sólo para aquellos depósitos que se encuentran al pie de los taludes sino también los dispuestos en barras a lo largo del cauce con la doble finalidad de caracterizar la amenaza de inestabilidades y de inundaciones ya que la ocurrencia de éstas, como ya se ha explicado, está relacionada con el volumen de material disponible para ser transportado.

	<i>El Cargadero</i>	<i>La Quebradona</i>	<i>California</i>
Depósitos a pie de taludes	13.750m ³	10.000m ³	3.000m ³
Depósitos en barras	4.560m ³	11.500m ³	500m ³
Total material en cauce	18.310m ³	16.500m ³	3.500m ³

Tabla 1- Estimación de depósitos en cauce.

En la quebrada *El Cargadero* la mayor parte de los depósitos normalmente se encuentra al pie de las inestabilidades. Se presentan desnudos o con vegetación herbácea. Las dimensiones del conjunto de material, superan o rondan, de forma general, los 100m³, especialmente en ciertos puntos en los que estos depósitos superan los 700m³ (inventario inestabilidades.n-17.anexo1). Se puede pensar que se trata de procesos recientes con un alto grado de actividad.

En la quebrada *La Quebradona*, se observa una mayor cantidad de depósitos, susceptibles de ser transportados, en barras. Los depósitos asociados a las inestabilidades se presentan dando lugar a formas convexas bajo las laderas, y con una cobertura vegetal desarrollada. Esto refleja que los procesos de erosión llevan actuando más tiempo en esta quebrada.

En la quebrada *California*, la menos desarrollada, los depósitos asociados a las inestabilidades se presentan en forma caótica, con acumulaciones de materia vegetal, muestra de episodios recientes de gran magnitud.

De forma general, se ha detectado un grado de estabilidad bajo, como se muestra en el gráfico. Este hecho confirma la hipótesis anteriormente planteada de una tendencia de evolución de las inestabilidades de ladera, en la búsqueda de un estado de equilibrio.

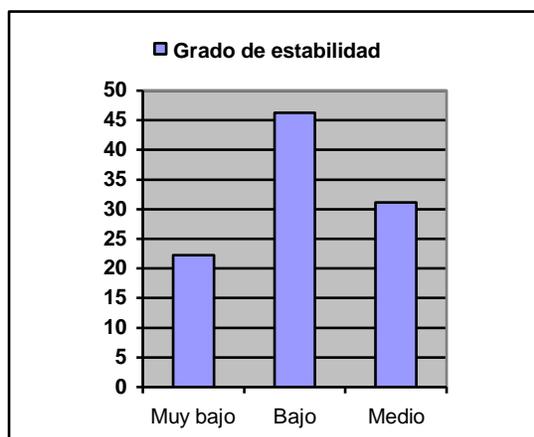


Fig2- Grado de estabilidad de las inestabilidades de ladera en las quebradas *El Cargadero*, *California* y *La Quebradona*.

Los menores grados de estabilidad coinciden en muchos casos con grados de desarrollo elevados, como en la inestabilidad n-9 de *California*, las n-7,n-17,n-18,n-24,n-25 de *El Cargadero* o las n-14,n-15,n-16,n-19 de *La Quebradona* (inventario inestabilidades.anexo1). Representan los puntos más problemáticos, debido al continuo aporte de material que generan. Han sido delimitadas como *zonas inestables* en el mapa de inestabilidades (mapa n°7."inestabilidades gravitatorias".anexo2) comentadas en el siguiente apartado.

9.1.4. Localización de las inestabilidades

Para la elaboración del mapa de inestabilidades se ha realizado, además del estudio en las quebradas *El Cargadero*, *La Quebradona*, y *California*, una vista general de todo el volcán, completada con la observación de foto aérea. De manera general, se aprecia una distribución preferente en las zonas de ladera alta, en las que las pendientes son más elevadas y existe un mayor control estructural. La mayoría de ellas se encuentran asociadas a las quebradas.

Se ha elaborado igualmente una cartografía para cada una de las tres quebradas, con el fin de caracterizar más en detalle la amenaza existente.

En la quebrada *El Cargadero* (mapa n°8.1."Quebrada El Cargadero".anexo2), se observan inestabilidades desde las partes más bajas (a una cota de 470m.). Como conjuntos de ladera inestable se pueden distinguir cuatro zonas. Tres de estas zonas, las más evolucionadas, se encuentran situadas en la ladera oeste, una de ellas prácticamente en la

cabecera, en las que se detecta una importante red de fracturas y laderas muy verticales. Debido a estas altas pendientes se estima que se sigan produciendo los procesos de erosión, en la búsqueda de un perfil de equilibrio. La otra zona inestable se ubica en la ladera este, la cual, aunque presenta unas dimensiones menores que las otras tres, es un punto de posible evolución de inestabilidades debido a la alta densidad de fracturas detectadas y a la litología muy susceptible que la conforma. Además de estos tramos, la cabecera se encuentra igualmente afectada por numerosas inestabilidades, situadas preferencialmente en zonas de cambio de pendiente y delimitadas por líneas de fracturación.

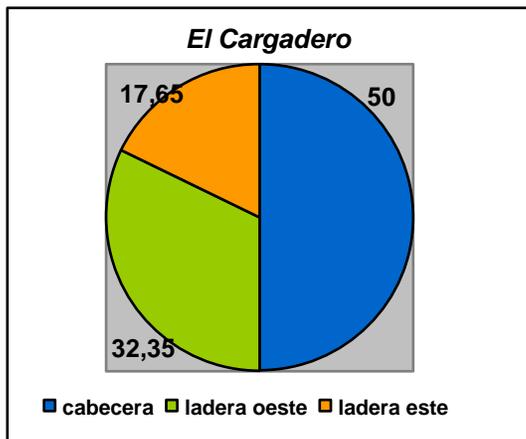


Fig3-Densidad de inestabilidades. El Cargadero

En el gráfico se muestra la densidad de inestabilidades que han sido identificadas en las distintas zonas de la quebrada. Se puede observar esta mayor afectación en la cabecera y en la ladera oeste.

Se han cartografiado también zonas de erosión preferencial, sobre las que se pueden generar inestabilidades por socavación de las partes bajas del talud.

En la quebrada *La Quebradona* (mapa n°8.2."Quebrada La Quebradona".anexo2), se encuentran igualmente las laderas afectadas desde casi los primeros tramos (cota de 680m). En la parte más baja se presentan ambas laderas, norte y sur, como zonas inestables, especialmente la ladera sur, en la que las inestabilidades presentan una gran profundidad. A lo largo de estos tramos, en las partes altas, de zonas inestables, que contribuirán a la desestabilización evolución de estas zonas. Las cabeceras se encuentran también altamente afectadas, con la presencia de roca basalto-andesítica muy meteorizada y un fuerte control estructural. En la cabecera norte se han observado grietas en la cresta que divide esta quebrada con la de *California*, afectando por tanto a ambas. Ha sido también considerada como zona inestable.

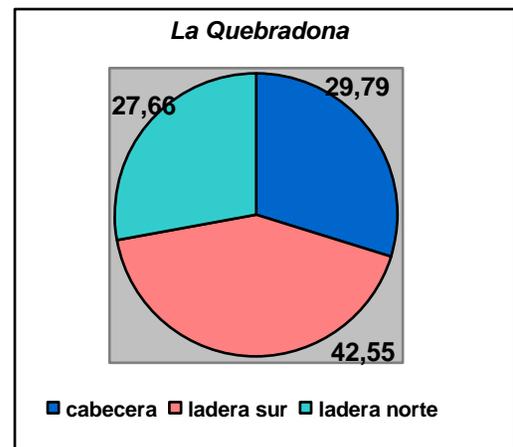


Fig4-Densidad de inestabilidades.La Quebradona

En el mapa se ha cartografiado también una zona de deposición en la que se encuentra un gran volumen de sedimentos bajo una cobertura vegetal bien desarrollada, como se describe en el apartado anterior.

En el gráfico de densidad de inestabilidades se detecta la mayor afectación de la ladera sur y, casi con igual, medida la ladera norte y la cabecera, como ya se había indicado.

En la quebrada de *California* (mapa n°8.3."Quebrada California".anexo2), las inestabilidades son a menudo cubiertas de vegetación, ya que es la zona más húmeda del volcán por su orientación norte, con lo que las zonas inestables quedan rápidamente vegetadas, visualizándose menos escarpes. Se observa más afectada la ladera oeste debido al control tectónico, a las fuertes pendientes y a la existencia de una litología vulnerable. A la altura de la ladera media, el encajamiento de los dos cauces principales ha dado lugar a la presencia de una pequeña cresta que los divide, conocida como cresta el caballo. Esta zona se presenta fuertemente alterada y afectada por numerosos derrumbes. Aunque no presenta unos taludes altos y por tanto no se pueden individualizar ni cartografiar inestabilidades, el aporte de material que puede generar es importante. Se ha considerado como zona inestable. Al igual que en las otras dos quebradas, la cabecera se presenta afectada por inestabilidades de grandes dimensiones, siendo esta la zona más afectada de la quebrada.

En el gráfico se muestra la densidad de inestabilidades y la afectación de la ladera oeste de manera más acusada. Se han asociado los mismos colores que para la quebrada *El Cargadero* por estar ambas alineadas y poder corresponderse las dos laderas.

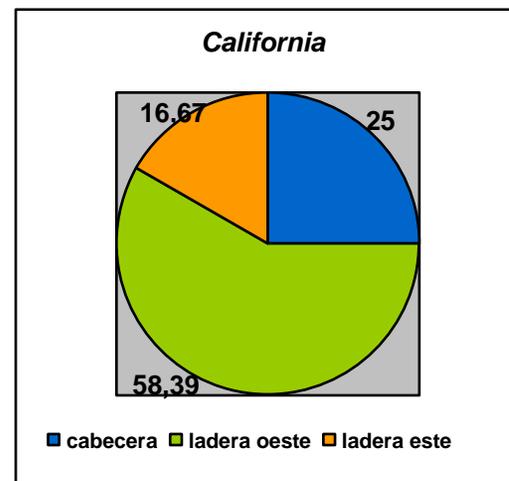


Fig5-Densidad de inestabilidades. California

En los mapas realizados en detalle para cada quebrada se han identificado igualmente *zonas de futura inestabilidad*, zonas de erosión preferencial, zonas de depósitos. mediante el análisis de características de las laderas como: identificación de líneas estructurales en fotografía aérea, zonas de fuertes pendientes o resaltes en el terreno. Se encuentran principalmente en las cabeceras de las quebradas.