

*Cuando hay grandes inviernos, caen derrumbes y bajan inundaciones,  
pero en ellas vienen los niños y niñas que nacen del agua.  
Es un mal porque arrastran tierras, piedras, árboles, puentes, animales,  
sembrados, casas, gente. Pero es un bien porque en ellas viven los  
jefes de nosotros. Se los saca del agua, se los cría y tienen historias grandes;  
de ellos nacen los valores culturales. Las inundaciones y los derrumbes no  
son solamente inundaciones y derrumbes, sino que tienen historias.*

***Guambianos: Hijos del Aroiris y del Agua***

Por Abelino Dagua Hurtado, Misael Aranda y

Luis Guillermo Vasco.

Bogotá, 1998

APROXIMACION A UN MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASA  
EN EL EJE CAFETERO, COLOMBIA.

VIVIANA AGUILAR MUÑOZ

DIANA PATRICIA MENDOZA GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

SANTIAGO DE CALI

2002

APROXIMACION A UN MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASA  
EN EL EJE CAFETERO, COLOMBIA.

VIVIANA AGUILAR MUÑOZ

DIANA PATRICIA MENDOZA GONZÁLEZ

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniera Topográfica

Director

ANDRÉS VELÁSQUEZ

Profesor

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

SANTIAGO DE CALI

2002

## PROYECTO

Título: APROXIMACION A UN MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASA EN EL EJE CAFETERO, COLOMBIA.

### Autoras

Viviana Aguilar Muñoz

Cod. 9328875

Universidad del Valle

[viaguila@osso.univalle.edu.co](mailto:viaguila@osso.univalle.edu.co)

Diana Patricia Mendoza González

Cod. 9331016

Universidad del Valle

[dimendoz@osso.univalle.edu.co](mailto:dimendoz@osso.univalle.edu.co)

### Director

Prof. Andrés Velásquez

Ingeniero Geólogo

Director del Observatorio Sismológico del Sur Occidente

Profesor Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle

[ave@osso.univalle.edu.co](mailto:ave@osso.univalle.edu.co)

### Asesores

Prof. Diego González

Meteorólogo

Profesor de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

[digonz@ciencias.unal.edu.co](mailto:digonz@ciencias.unal.edu.co)

Tec. Jorge Eduardo Mendoza

Coordinador Sección Procesamiento Gráfico Observatorio Sismológico del Sur  
Occidente

[jomendoz@osso.univalle.edu.co](mailto:jomendoz@osso.univalle.edu.co)

Nota de aceptación.

---

---

---

---

---

Jurado

---

Jurado

Santiago de Cali, 26 de abril del 2002.

## DEDICATORIA.

VIVIANA

Dedico este esfuerzo a mi familia por el amor, a mis amig@s por la amistad, a mi misma porque lo logré y a usted si le da sentido.

DIANA

A mi familia y al Clan del Cuco por su cariño, confianza, paciencia y complicidad permanentes.

## **AGRADECIMIENTOS.**

El trabajo que aquí se presenta precisó de tres años de maduración. Durante este tiempo se contó con el apoyo permanente de la CORPORACIÓN OSSO y con la orientación de varios investigadores del Observatorio Sismológico del Sur Occidente, entre los cuales queremos resaltar:

Al Profesor Andrés Velásquez por su paciente labor de dirección, sus valiosas y apasionadas contribuciones tanto a la forma como al fondo del documento, por su aporte a nuestra formación en el ámbito de la investigación científica y por ser un abanderado del proyecto.

Al profesor Hansjürgen Meyer por creer en nosotras, brindarnos su apoyo y disculpar nuestros pequeños desastres.

Al profesor Diego González por su conocimiento, orientación y productiva contribución al manejo de la información sobre humedad del terreno.

Al técnico Jorge Eduardo Mendoza por su permanente apoyo en el procesamiento y producción gráfica y cartográfica, por habernos transmitido su

conocimiento, por su entusiasmo y por creer en el proyecto.

A la Geóloga Myriam López por sus aportes en geología, trabajo de campo e inventario de movimientos de masa cosísmicos y flujos. También por su apoyo en la gestión de insumos.

A la Ingeniera Cristina Rosales Climent por transmitirnos su pasión y entusiasmo por el trabajo científico y por su apoyo en la edición del documento.

A Sebastián Pedrosa y Mauricio Rengifo por su apoyo en el procesamiento cartográfico.

A Carolina Delgado y Adriana Moná del Centro de Documentación del OSSO, CENDOC, por su paciencia, comprensión y apoyo.

A Eugenio Jaramillo por enseñarnos el significado del punto.

A SWISSAID por patrocinar y hacer posible este proyecto.

A las instituciones que suministraron información:

CENICAFE: registros pluviométricos.

OSQ, CARDER, C.V.C., C.R.Q., DNPAD, FEDECAFE, INGEOMINAS, IDEAM, CREPAD, Defensa Civil de La Virginia y Universidad del Quindío: documentos de sus investigaciones e informes.

A los profesores e investigadores que suministraron información invaluable durante la revisión del estado del conocimiento: Ana Campos, Michel Hermelín, Alejandro Martínez, David Keefer, Guillermo Santamaría, Leonello Serva, Matthew C. Larsen, Sabina Porfido, Scott Miles, Pier Giorgio Nicoletti, Randy Jibson, Lucia Luzi, Peter Kingsbury, Annetty Benavides, Julián Bommer y Hugo Monsalve.

Nuestro agradecimiento a los profesores Francisco Hernández y Hernán Materón y a la Universidad del Valle.

Finalmente a tod@s los amig@s que nos brindaron techo, comida, ropa, masajes, flores, escucharon con paciencia durante 3 años nuestras quejas, pero sobre todo, nos regalaron a manos llenas el animo suficiente para avanzar cuando hizo falta.

## RESUMEN.

En la región central de los Andes colombianos ocurrieron múltiples movimientos de masa asociados a actividad sísmica y lluvias intensas durante 1999. El 25 de enero un terremoto de magnitud 5,9 Mb, a menos de 20 km de profundidad, produjo, además, agrietamientos en las vertientes que se transformaron en movimientos a raíz de prolongadas lluvias asociadas al fenómeno La Niña. Con el fin de contribuir al entendimiento de los procesos de denudación del paisaje en ambientes tropicales húmedos de montaña, todavía poco comprendidos, así como a la planificación del territorio teniendo en consideración las amenazas derivadas, se seleccionó un área de 1960 km<sup>2</sup> de tal manera que contuviera la mayor parte de los procesos señalados.

Se enfatizó en la generación de modelos de susceptibilidad del territorio a los movimientos de masa con base en las variables pendientes naturales, humedad del terreno y geología. Con base en la cantidad y calidad de información y revisión de literatura sobre métodos de modelamiento y casos históricos, se adoptó una metodología heurística en la cual se combinan modelos de las variables seleccionadas.

Se aplicaron los criterios sobre pendientes naturales, unidades geológicas e isohietas, de un modelo de susceptibilidad a movimientos de masa desarrollado a escala 1:500 000 por el OSSO en 1995a, el cual se trabajó a escala 1:100 000, en la zona. Este modelo se denominó **So**.

A partir de lo anterior se generaron otros dos modelos:

- **Som**: modificando la clasificación de las variables pendientes, geología y humedad del modelo anterior.
- **Sp**: a partir de Som aplicando, adicionalmente, tratamientos de la variable estructuras geológicas.

De manera independiente se generó un inventario de huellas de movimientos de masa a partir de un modelo de sombras del territorio, que se comparó con las áreas de cada clase de susceptibilidad obtenidas en So, Som y Sp.

Se concluye que el modelo Sp se ajusta de mejor manera a la dinámica de los movimientos de masa en la región, porque las densidades de huellas de movimientos de masa aumentan sistemáticamente en las áreas definidas como de mayor susceptibilidad.

Los resultados finales, con base en los criterios y tratamiento de las variables consideradas, son un avance con respecto a los modelamientos cualitativos revisados en la literatura en Colombia y se proponen como insumos para el ordenamiento territorial, la evaluación de amenazas y futuros estudios con metodologías cuantitativas.

# CONTENIDO

<b>0. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. CONTEXTO GENERAL.....</b>	<b>6</b>
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	6
1.2 ZONA DE ESTUDIO.....	9
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	12
1.3.1 Alcances.....	12
1.3.2 Limitaciones.....	13
1.4 OBJETIVOS.....	14
1.4.1 Objetivo general.....	14
1.4.2 Objetivos específicos propuestos (P) y alcanzados (A).....	14
<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>17</b>
2.1 DESCRIPCIÓN.....	17
2.1.1 Identificación y planteamiento del problema.....	17
2.1.2 Fuentes de información.....	18
2.1.3 Procesamiento de la información.....	18
2.1.4 Modelamiento.....	19
2.1.5 Presentación de resultados.....	19

<b>ESQUEMA METODOLÓGICO.....</b>	<b>20</b>
<b>3. BASES CONCEPTUALES Y REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 CONCEPTUALIZACIÓN DE PAISAJE.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 EVOLUCIÓN DEL PAISAJE.....</b>	<b>22</b>
3.2.1 Aspectos históricos y desarrollo del pensamiento en Geomorfología.....	24
3.2.2 Doctrinas y postulados.....	25
<b>3.3 EVOLUCIÓN DEL PAISAJE EN AMBIENTE TROPICAL DE MONTAÑA.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4 MOVIMIENTOS DE MASA.....</b>	<b>37</b>
3.4.1 Definición.....	37
<b>3.5 CLASIFICACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE MASA.....</b>	<b>38</b>
3.5.1 Caídas.....	39
3.5.2 Volcamiento o inclinación.....	40
3.5.3 Deslizamientos.....	40
3.5.4 Esparcimientos laterales.....	42
3.5.5 Flujos.....	42
3.5.6 Avalanchas.....	43
3.5.7 Movimientos complejos.....	43
<b>3.6 FACTORES QUE CONTROLAN LA ESTABILIDAD.....</b>	<b>45</b>
3.6.1 Factores de susceptibilidad.....	46
3.6.2 Factores de disparo.....	47
<b>3.7 MOVIMIENTOS DE MASA DISPARADOS POR LLUVIAS.....</b>	<b>48</b>
3.7.1 Parámetros hidrometeorológicos.....	49
<b>3.8 MOVIMIENTOS DE MASA DISPARADOS POR SISMOS.....</b>	<b>52</b>
3.8.1 Parámetros sísmicos.....	54
<b>3.9 MODELAMIENTO DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS DE MASA.....</b>	<b>60</b>
3.9.1 Definición de términos.....	60

3.9.2	Escala de trabajo.....	61
3.9.3	Datos de entrada.....	62
3.9.4	Técnicas de análisis para el modelamiento de la susceptibilidad y/o amenaza.....	65
3.9.5	Selección de la técnica.....	70
3.9.6	Precisión y objetividad.....	72
<b>3.10</b>	<b>USO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO EN EL MODELAMIENTO DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y/O AMENAZA.....</b>	<b>73</b>
<b>4.</b>	<b>DESCRIPCIÓN FISIAGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>75</b>
<b>4.1</b>	<b>TOPOGRAFÍA.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2</b>	<b>DRENAJES.....</b>	<b>75</b>
<b>4.3</b>	<b>DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA.....</b>	<b>76</b>
<b>4.4</b>	<b>TECTÓNICA REGIONAL.....</b>	<b>78</b>
4.4.1	Fuentes asociadas con la zona de subducción.....	79
4.4.2	Fuentes intraplaca.....	80
<b>4.5</b>	<b>UNIDADES LITOLÓGICAS.....</b>	<b>80</b>
4.5.1	Paleozoico.....	80
4.5.2	Mesozoico (Cretáceo).....	81
4.5.3	Terciario.....	83
4.5.4	Cuaternario.....	85
<b>4.6</b>	<b>GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....</b>	<b>85</b>
4.6.1	Falla Cali – Patía.....	87
4.6.2	Falla Quebradanueva.....	87
4.6.3	Falla Cauca – Almaguer.....	87
4.6.4	Falla Armenia.....	88
4.6.5	Falla Silvia – Pijao.....	88
4.6.6	Fallas con tendencia E - W y WNW-ESE.....	89
4.6.7	Falla Ibagué.....	90
4.6.8	Falla Navarco.....	91

4.6.9	Falla Montenegro.....	91
<b>4.7</b>	<b>MACROSÍSMICA.....</b>	<b>91</b>
<b>4.8</b>	<b>AMENAZA SÍSMICA.....</b>	<b>96</b>
<b>5.</b>	<b>MOVIMIENTOS DE MASA EN EL EJE CAFETERO EN 1999.....</b>	<b>98</b>
<b>5.1</b>	<b>SISMO DEL EJE CAFETERO del 25 DE ENERO DE 1999.....</b>	<b>98</b>
5.1.1	Análisis de réplicas.....	99
5.1.2	Mecanismos focales.....	101
5.1.3	Aceleraciones.....	102
5.1.4	Macrosísmica del 25 de enero de 1999.....	103
<b>5.2</b>	<b>ANÁLISIS DE LLUVIAS PRE Y POSTSISMO.....</b>	<b>105</b>
5.2.1	Secuencia ENOS 1998 – 1999.....	105
5.2.2	Precipitaciones en 1999 en la región Andina de Colombia.....	107
5.2.3	Precipitaciones diciembre de 1998 a diciembre de 1999 en el Eje Cafetero.....	108
5.2.4	Precipitaciones y movimientos de masa en 1999.....	109
<b>5.3</b>	<b>MOVIMIENTOS DE MASA ENERO Y FEBRERO DE 1999.....</b>	<b>114</b>
5.3.1	Movimientos de masa.....	116
5.3.2	Agrietamientos.....	116
5.3.3	Hundimientos.....	116
5.3.4	Nacimientos de agua.....	117
<b>5.4</b>	<b>MOVIMIENTOS DE MASA EN DICIEMBRE DE 1999.....</b>	<b>117</b>
<b>6.</b>	<b>MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASA EN EL EJE CAFETERO.....</b>	<b>119</b>
<b>6.1</b>	<b>CONSIDERACIONES GENERALES.....</b>	<b>120</b>
<b>6.2</b>	<b>DEFINICIÓN DE VARIABLES.....</b>	<b>121</b>

<b>6.3</b>	<b>DEFINICIÓN DEL MODELO.</b> .....	<b>122</b>
<b>6.4</b>	<b>LIMITACIONES DEL MODELAMIENTO.</b> .....	<b>122</b>
<b>6.5</b>	<b>EVALUACIÓN DEL MODELAMIENTO.</b> .....	<b>123</b>
<b>6.6</b>	<b>SUBMODELO DE PENDIENTES.</b> .....	<b>125</b>
6.6.1	Base conceptual.....	125
6.6.2	Desarrollo del submodelo de pendientes.....	128
6.6.3	Evaluación submodelo de pendientes. ....	132
<b>6.7</b>	<b>SUBMODELO DE HUMEDAD.</b> .....	<b>133</b>
6.7.1	Base conceptual.....	133
6.7.2	Desarrollo del submodelo de humedad. ....	136
6.7.3	Evaluación del submodelo de humedad. ....	143
<b>6.8</b>	<b>SUBMODELO DE GEOLOGÍA.</b> .....	<b>145</b>
6.8.1	Base conceptual.....	145
6.8.2	Desarrollo del submodelo de geología.....	153
6.8.3	Evaluación submodelo de geología. ....	166
<b>6.9</b>	<b>MODELOS.</b> .....	<b>167</b>
6.9.1	Modelo So. ....	167
6.9.2	Modelo Som. ....	170
6.9.3	Modelo Sp. ....	174
6.9.4	Evaluación de modelos. ....	178
<b>6.10</b>	<b>RESULTADOS.</b> .....	<b>182</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b> .....	<b>184</b>
<b>7.1</b>	<b>CONCLUSIONES.</b> .....	<b>184</b>
<b>7.2</b>	<b>RECOMENDACIONES.</b> .....	<b>187</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.</b> .....	<b>189</b>

<b>9. ANEXOS.....</b>	<b>214</b>
-----------------------	------------

## LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Localización de la zona de estudio.....	10
Figura 2. Detalle de la zona de estudio.....	11
Figura 3. Estados del paisaje en un ciclo fluvial de erosión.....	27
Figura 4. Curvas hipsométricas típicas.....	30
Figura 5. Sismicidad histórica con efectos en el Eje Cafetero.....	92
Figura 6. Sismicidad regional OSSO 1987 - 2001.....	97
Figura 7. Epicentros sismo 25 de enero de 1999.....	99
Figura 8. Distribución temporal de replicas 25/01/1999 - 05/02/1999 (OSSO).....	100
Figura 9. Mecanismos focales de para el evento principal del 25 de enero de 1999. ..	102
Figura 10. Secuencia ENOS 1998 (NOAA, 2001). .....	106
Figura 11. Secuencia ENOS 1999 (NOAA, 2001). .....	107
Figura 12. Índice de precipitación para 12 estaciones entre 1998 y 1999.....	109
Figura 13. Precipitación acumulada del trimestre diciembre de 1998 a febrero de 1999 con respecto al promedio multianual (18 años) del mismo trimestre.....	110
Figura 14. Precipitación acumulada diciembre de 1998 al 25 de enero de 1999, con respecto a la precipitación promedio multianual (18 años), del mismo periodo. ...	111
Figura 15. Variación de la precipitación de febrero de 1999 con respecto a la precipitación promedio (18 años) para este mes en el Eje Cafetero.....	112
Figura 16. Curvas de masas trimestre DEF (1998 – 1999). .....	113
Figura 17. Curva de masas diciembre de 1999, Eje Cafetero, zona de estudio.....	114
Figura 18. Inventario de movimientos de masa.....	124
Figura 19. Pendientes del terreno.....	129
Figura 20. Submodelo de pendientes (So). .....	130
Figura 21. Submodelo de pendientes (Sp y Som). .....	132
Figura 22. Densidad de movimientos de masa según submodelos de pendientes.....	133

Figura 23. Pisos térmicos.....	137
Figura 24. Isohietas anuales.....	139
Figura 25. Zonas climáticas.....	140
Figura 26. Submodelo de humedad So.....	141
Figura 27. Submodelo de humedad Som y Sp.....	143
Figura 28. Densidad de movimientos de masa según submodelos de humedad.....	144
Figura 29. Unidades litológicas.....	153
Figura 30. Submodelo geología (So).....	155
Figura 31. Submodelo geología (Som).....	157
Figura 32. Estructuras lineales.....	158
Figura 33. Submodelo de estructuras lineales.....	159
Figura 34. Estructuras puntuales regionalizadas con relación al aspecto.....	162
Figura 35. Submodelo de estructuras puntuales.....	162
Figura 36. Submodelo geología (Sp) sin clasificar.....	164
Figura 37. Píxeles por valores de susceptibilidad de geología (Sp).....	164
Figura 38. Submodelo geología (Sp).....	165
Figura 39. Densidad de movimientos de masa según submodelos de geología.....	167
Figura 40. Modelo So sin reclasificar.....	168
Figura 41. Píxeles por valores de susceptibilidad de So.....	169
Figura 42. Modelo So.....	170
Figura 43. Modelo Som sin reclasificar.....	171
Figura 44. Píxeles por valores de susceptibilidad de Som.....	172
Figura 45. Modelo Som.....	173
Figura 46. Modelo Sp sin reclasificar.....	174
Figura 47. Píxeles por valor de susceptibilidad de Sp.....	176
Figura 48. Modelo Sp.....	177
Figura 49. Valores de susceptibilidad por modelos sin reclasificar.....	178
Figura 50. Número de huellas de movimiento de masa por modelo.....	179
Figura 51. Densidad de huellas de movimientos de masa por modelo.....	180
Figura 52. Índice de ocurrencia de movimientos de masa por modelo.....	181

## LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Características de los movimientos de masa inducidos por sismos. ....	44
Tabla 2. Datos de entrada para un análisis de susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa. ....	63
Tabla 3. Técnicas de análisis en relación con la escala de trabajo. ....	71
Tabla 4. Zonificación climática. ....	77
Tabla 5. Parámetros epicentrales del evento principal. ....	99
Tabla 6. Parámetros epicentrales réplica principal. ....	101
Tabla 7. Aceleraciones máximas del evento principal. ....	103
Tabla 8. Clasificación de pendientes (So). ....	129
Tabla 9. Clasificación de pendientes (Som, Sp). ....	131
Tabla 10. Clasificación de los pisos térmicos. ....	137
Tabla 11. Zonas climáticas. ....	139
Tabla 12. Clasificación de humedad (So). ....	140
Tabla 13. Evapotranspiración potencial y valores de precipitación límite. ....	142
Tabla 14. Clasificación de la humedad (Som y Sp). ....	142
Tabla 15. Susceptibilidad de litología a los movimientos de masa. ....	146
Tabla 16. Clasificación de geología (So). ....	154
Tabla 17. Clasificación de geología (Som). ....	156
Tabla 18. Clasificación de las estructuras lineales. ....	159
Tabla 19. Clasificación de las estructuras puntales. ....	161
Tabla 20. Valores de susceptibilidad modelo geológico – estructural. ....	163
Tabla 21. Clasificación de la geología (Sp). ....	165
Tabla 22. Valores de susceptibilidad del modelo So. ....	168
Tabla 23. Reclasificación del modelo So. ....	170
Tabla 24. Valores de susceptibilidad modelo Som. ....	171

Tabla 25. Reclasificación modelo Som. ....	173
Tabla 26. Valores de susceptibilidad modelo Sp. ....	175
Tabla 27. Reclasificación modelo Sp. ....	176
Tabla 28. Áreas por modelo de susceptibilidad. ....	177

## **LISTADO DE ANEXOS.**

**ANEXO A.** Productos Cartográficos.

**ANEXO B.** Memorias del procesamiento cartográfico

**ANEXO C.** Análisis de precipitaciones en la zona de estudio, periodo 1982 – 1999.

**ANEXO D.** Reportes de efectos geológicos inducidos por sismos.

**ANEXO E.** Inventario de movimientos de masa 1999.

**ANEXO F.** Consideraciones sobre la susceptibilidad en los municipios de la zona de estudio.

## **PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS EN EL ANEXO A.**

Información general.

Convenciones de la cartografía base.

Índice de planchas IGAC 1:25 000 del área de estudio.

**MAPA 1.** Municipios.

**MAPA 2.** Sitios de interés general.

**MAPA 3.** Vías y líneas de alta tensión.

**MAPA 4.** Drenajes.

**MAPA 5.** Curvas de nivel.

**MAPA 6.** Zonas climáticas.

**MAPA 7.** Pendientes naturales.

**MAPA 8.** Unidades geológicas.

**MAPA 9.** Estructuras geológicas.

**MAPA 10.** Tipo y orientación de estructuras.

**MAPA 11.** Inventario de huellas de movimientos de masa.

**MAPA 12.** Movimientos de masa 1999.

**MAPA 13.** Flujos 1999.

**MAPA 14.** Área de movimientos de masa cosísmicos.

**MAPA 15.** Modelo de susceptibilidad  $S_o$ .

**MAPA 16.** Modelo de susceptibilidad  $S_{om}$ .

**MAPA 17.** Modelo de susceptibilidad  $S_p$ .

## 0. INTRODUCCIÓN.

En la historia de Colombia se recuerdan grandes tragedias provocadas por inundaciones, sismos, movimientos de masa, actividad volcánica, tsunamis, etc.; estos fenómenos hacen que la evolución del paisaje en el país sea un proceso dinámico, complejo y diverso. El Eje Cafetero, ubicado en la región andina, posee condiciones de relieve, clima, geología (orogénesis, tectónica, litología, erosión superficial), entre otras, que son ideales para que algunos de esos procesos se manifiesten amenazando a las comunidades asentadas allí; es el caso de los movimientos de masa.

En 1999 se presentaron dos fenómenos que pusieron en evidencia la dinámica de la evolución del paisaje del Eje Cafetero. Por un lado, el 25 de enero ocurrió un sismo a las 1:19 p.m. hora local, con magnitud 5.9, localizado en el municipio de Córdoba (Quindío), 2 km al Noreste de la cabecera municipal, con efectos en 28 municipios de los departamentos de Quindío, Valle del Cauca, Caldas, Tolima y Risaralda, afectando directamente unas 570 000 personas (CEPAL, 1999). El sismo disparó movimientos de masa en toda la región epicentral, además de agrietamientos, hundimientos y, en algunos sitios, alteraciones en afloramientos de agua. Los movimientos de masa obstruyeron durante varios días las vías de acceso, complicando las labores de rescate y los agrietamientos y hundimientos ocasionaron un incremento en la inestabilidad de las laderas de la zona.

Muchas de las acciones posteriores al sismo se orientaron hacia asuntos relacionados con la infraestructura, sin embargo, el entendimiento de los cambios en el paisaje fue aplazado o simplemente olvidado; en este contexto el proyecto Aproximación a un

Modelo de Susceptibilidad a los Movimientos de Masa en el Eje Cafetero surge como la posibilidad de contribuir al entendimiento de los movimientos de masa y cómo éstos afectan los cambios del paisaje tropical de montaña, aprovechando la ocurrencia prácticamente simultánea de dos eventos disparadores: lluvias y sismo.

A finales de enero y durante febrero de 1999 ocurrieron lluvias torrenciales, posiblemente relacionadas con el fenómeno climático La Niña, que afectaron la mayor parte del país; en la región epicentral alcanzaron niveles críticos hacia finales de febrero, ocasionando más movimientos de masa, muchos de ellos en laderas previamente agrietadas por el sismo. En trabajo de campo se encontraron evidencias para correlacionar estos eventos con la presencia de grietas y hundimientos cosísmicos. En diciembre del mismo año un nuevo periodo de intensas lluvias, que ocasionó efectos en toda la región andina, disparó flujos de lodo en el corregimiento de La Virginia, municipio de Calarcá (Quindío), asociados a la presencia de agrietamientos cosísmicos.

Por otro lado, la investigación sobre los procesos de remoción en masa en las áreas tropicales húmedas de montaña es todavía incipiente, entre otras razones por déficit de información y conocimientos sobre procesos que influyen en los mismos, tales como grado y espesor de meteorización de las rocas, grado de fracturamiento, niveles de humedad del terreno y la participación de los procesos antrópicos.

Con base en estos antecedentes se seleccionó un área de estudio, donde se concentraron los mayores efectos, para estudiar estos fenómenos y obtener información que permitiera generar conocimiento sobre la comprensión de los procesos y factores que definen la ocurrencia de movimientos de masa. El área comprende 1960 km<sup>2</sup>, en los departamentos de Quindío, Valle del Cauca y Tolima, entre las coordenadas 1 120 000 W, 990 000 N y 1 169 000 W, 950 000 N. Como escala de trabajo se adoptó 1:100 000 y se identificaron la humedad, la geología y las pendientes como variables que en su interacción, a la escala elegida, pueden explicar la susceptibilidad a los movimientos de masa.

Entre las metodologías generalmente adoptadas para estudios de susceptibilidad se encuentran las cuantitativas, normalmente usadas a escalas grandes, en áreas con información detallada, y las cualitativas, aplicadas a escala regional. Por la densidad y calidad de la información básica disponible en la zona de estudio se adoptó una metodología heurística, con base en el tratamiento regional de las variables pendientes naturales, humedad del terreno y geología. Se construyeron submodelos de estas variables que fueron clasificados con base en reglas de decisión adaptadas de la literatura sobre el papel que juega cada una en los movimientos de masa y con base en evidencia empírica de casos documentados en Colombia.

Se desarrollaron tres modelos de susceptibilidad en cada uno de los cuales la región se clasificó en zonas de susceptibilidad a movimientos de masa muy alta, alta, media, baja y muy baja.

Para este propósito se adquirió y procesó información cartográfica y temática disponible a diversas escalas entre 1:25 000 y 1:500 000, la cual se integró y manipuló en un sistema de información geográfica. Se efectuaron salidas de campo a la zona para la observación de fenómenos cosísmicos y se documentaron los efectos del sismo del 25 de enero y las lluvias de febrero y diciembre de 1999.

Por la falta de inventarios detallados, sistemáticos y homogéneos de movimientos de masa disparados por el sismo y las lluvias de enero y febrero de 1999, el objetivo principal del estudio se enfocó hacia la comprensión de los factores que intervienen en la generación de los movimientos de masa.

Se realizó una revisión lo más detallada posible tanto de estudios de caso como de teorías existentes sobre evolución del paisaje y movimientos de masa, para fundamentar la selección de variables y la metodología de modelamiento de la susceptibilidad del territorio a este tipo de fenómenos.

Se aplicaron los criterios (pendientes naturales, unidades geológicas e isohietas) de un modelo de susceptibilidad a movimientos de masa desarrollado a escala 1:500 000 por el OSSO (1995a, b), el cual se trabajó a escala 1:100 000, en la zona. Este modelo se denominó **So**.

A partir de lo anterior se generaron otros dos modelos, a saber:

- **Som**: modificando la clasificación de las variables pendientes, geología y humedad del modelo anterior.
- **Sp**: a partir de Som, aplicando adicionalmente la variable estructuras geológicas.

Para evaluar la calidad y ajuste de cada modelo se realizó, de manera independiente, un inventario visual de huellas de movimientos de masa a partir de un modelo de sombras de la región. Por ser independiente del proceso de modelamiento, este inventario se adoptó como mapa de referencia para la validación. El área cubierta por cada clase de susceptibilidad, en cada uno de los tres modelos, se comparó con la densidad de huellas de movimientos de masa (número de huellas por km cuadrado), con base en la hipótesis que las áreas con clases de mayor susceptibilidad deben coincidir con mayores densidades de huellas.

El estudio realizado significa un avance con respecto a modelos regionales de susceptibilidad previamente realizados en Colombia, al incorporar variables como un modelo de humedad del terreno, obtenido a partir de isohietas y pisos térmicos, y un modelo geológico en el cual se considera, además de la litología, el grado de fracturamiento (fallas cartografiadas) y estructuras puntuales como rumbo y buzamiento de estratificación y foliación.

Aún cuando la metodología utilizada es heurística (cualitativa), el modelo finalmente obtenido puede ser utilizado como insumo para el ordenamiento territorial y para

cartografía de amenazas por movimientos de masa. Sin embargo, en razón de la metodología misma, no se recomienda extrapolar los resultados a otras áreas que puedan tener características litológicas, de pendientes y régimen climático diferentes.

Aunque con este trabajo no se llega a comprender la evolución del paisaje en el Eje Cafetero, en su complejidad total, los resultados son satisfactorios en cuanto a que se contribuye a entender uno de los procesos que generan cambios en las geoformas superficiales muy evidentes en el corto plazo. Se espera que este trabajo no solo sea un aporte significativo para la planificación del desarrollo de los municipios de la zona de estudio sino también un avance importante hacia el entendimiento de la evolución de los paisajes en el trópico húmedo de montaña.

Para una comprensión más detallada de los insumos y procesos de este trabajo, se incluyen, en los Anexos, los datos y memorias explicativas de la cartografía, la investigación sobre efectos geológicos inducidos por sismos en Colombia, el análisis de las precipitaciones durante el periodo 1982-1999, así como inventarios georreferenciados de movimientos de masa y análisis de susceptibilidad para los territorios de cada municipio del área del proyecto.

## **1. CONTEXTO GENERAL.**

### **1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.**

Los movimientos de masa son un fenómeno frecuente en Colombia, donde han causado grandes pérdidas económicas y de vidas humanas. DESINVENTAR<sup>1</sup> reporta para Colombia, entre 1921 y 2001, 3243 movimientos de masa que afectaron 11 085 viviendas y destruyeron otras 7063. Muchos de estos eventos han estado asociados a periodos de lluvias fuertes.

En Colombia se han realizado diversos estudios sobre movimientos de masa enfocados a evaluar la susceptibilidad y la amenaza. Sin embargo han sido pocas las oportunidades de evaluar la acción conjunta de dos de los principales factores de disparo, como son los sismos y las lluvias.

El terremoto del 25 de enero de 1999 que tuvo como epicentro la región del Eje Cafetero de Colombia, disparó severos efectos sobre poblaciones y medio ambiente, asociados con condiciones topográficas, geológicas, meteorológicas y socioculturales. La información obtenida de medios de comunicación, junto con trabajo de campo

---

<sup>1</sup> DESINVENTAR: Base de datos de sobre desastres en Colombia. ([www.desinventar.org](http://www.desinventar.org))

inmediatamente después del sismo, permitió obtener evidencia de la ocurrencia de movimientos de masa co y postsísmicos.

Los fenómenos cosísmicos correspondieron en su mayor porcentaje a desprendimientos de taludes en vías construídas sobre cenizas volcánicas, principalmente cortes verticales o subverticales entre 2 y 6 metros de altura, que sufrieron desplome cerrando las vías, y agrietamientos longitudinales de centenares de metros que comprometieron ceniza volcánica y saprolitos; los fenómenos postsísmicos estuvieron relacionados con lluvias torrenciales ocurridas días después del sismo, con un pico máximo el 27 de febrero, las cuales precipitaron nuevos movimientos de masa en terrenos agrietados cosísmicamente, a la vez que reactivaron los preexistentes.

Durante 1998 y 1999 se registró un evento frío del Pacífico o La Niña (NOAA, 2001), que en la región Andina de Colombia se caracteriza por precipitaciones por encima de los promedios históricos. Asociado a este fenómeno, a finales de 1999 se presentaron prolongadas lluvias que abarcaron gran parte de la región Andina. Cerca de la región más afectada por movimientos de masa cosísmicos, múltiples movimientos de masa y avenidas torrenciales, especialmente el 24 y 25 de diciembre. En el corregimiento La Virginia, al SE de Calarcá, los movimientos de masa se desprendieron a partir de agrietamientos cosísmicos (INGEOMINAS, 2000b)

Los fenómenos ocurridos en el período enero a diciembre de 1999 en el Eje Cafetero se constituyen en una buena oportunidad para explorar y avanzar en la comprensión de los cambios en los paisajes, en razón de la ocurrencia y superposición de factores endógenos y exógenos sobre el territorio: diversidad de pendientes naturales del terreno, geofomas, unidades litológicas, condiciones climáticas específicas, etc.

Por otra parte, dada la alta densidad de población, su relativa riqueza asociada al cultivo del Café y la presencia de múltiples instituciones técnicas, permitía preveer una buena disponibilidad de información para la zona, incluida cartografía digital e imágenes y

productos de sensoramiento remoto.

Para aproximarse al conocimiento de los procesos que dieron lugar a estos fenómenos, se seleccionó un área de estudio teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- inclusión de la zona epicentral del sismo del 25 de enero de 1999, y de la más afectada por movimientos de masa;
- disponibilidad de información básica y temática, incluyendo cartografía, y sobre efectos del terremoto y de las lluvias;
- Inclusión de áreas municipales afectadas por el sismo, de tal manera que los resultados del proyecto pudieran aportar para su planificación.

Una vez identificado el tema y seleccionada la zona de estudio, se plantearon unas primeras preguntas que sirvieron de punto de partida:

- ¿Cuáles son las variables, y cuáles sus relaciones, que definen y/o controlan la evolución del paisaje en la región del Eje Cafetero colombiano?
- ¿Cuáles son las características de los movimientos de masa ocurridos en el Eje Cafetero de Colombia en cuanto a tipo de material involucrado, volúmenes desplazados, áreas afectadas, usos del suelo, topografía del terreno, fenómenos disparadores, entre otros?
- En los movimientos de masa ocurridos a raíz del sismo del 25 de enero ¿cuál es la relación existente entre la vibración sísmica y el período de lluvias fuertes como fenómenos disparadores de éstos?
- ¿Existe una diferencia significativa entre los movimientos de masa cosísmicos y los postsísmicos? ¿Cuál es esa diferencia y cómo podría estimarse?
- En la literatura se reportan diferentes relaciones entre parámetros sísmicos y movimientos de masa, tales como: tamaño del sismo por área total afectada, tamaño del sismo por distancia del movimiento al epicentro, tamaño del sismo por

tipo de movimiento de masa. Los movimientos de masa a raíz del sismo del 25 de enero concuerdan con alguna de estas relaciones preestablecidas? Si no lo están ¿se podría establecer una relación entre ellos?

A lo largo de la ejecución del proyecto estas preguntas iniciales tuvieron que ser modificadas en cuanto a sus alcances, principalmente porque en la práctica la información esperada y reportada como existente en la zona no estuvo del disponible.

## **1.2 ZONA DE ESTUDIO.**

Comprende un área de 1960 km<sup>2</sup>, entre las coordenadas geográficas (75° 59' 59" 00 W, 4° 30' 28"1244 N) y (75° 33' 32"5677 W, 4° 8' 43"5356 N), correspondientes a las coordenadas planas del IGAC (1'120.000 E, 990.000 N) y (1'169.000 E, 950.000 N), respectivamente. Abarca parte de las cuencas de los ríos Quindío, Barragán - Pijao - La Vieja en la vertiente occidental de la Cordillera Central y parte de la porción alta de la vertiente oriental de la misma Cordillera, en límites de los departamentos Valle del Cauca y Quindío con Tolima (Figuras 1 y 2).

Comprende total o parcialmente territorios de los municipios de Armenia, Buenavista, Calarcá, Córdoba, Génova, La Tebaida y Montenegro (Quindío), Roncesvalle y Cajamarca (Tolima), Caicedonia, Bugalagrande, La Victoria, Sevilla y Tuluá (Valle del Cauca), como se ilustra en la Figura 2.

En el Anexo A (Cartografía) se detallan las áreas municipales cubiertas, sitios de interés general, vías y drenajes, entre otros. En el Anexo B se encuentra la memoria técnica del procesamiento cartográfico .

Las alturas van desde los 900 m.s.n.m. en los valles hasta los casi 4000 m.s.n.m. en la cordillera. El régimen de lluvias es bimodal con dos períodos de lluvias bajas y dos de altas. El primer período de lluvias altas se presenta en los meses de abril y mayo y el segundo entre octubre y noviembre. Los mínimos de precipitaciones corresponden a

los meses de enero, julio y agosto. La humedad relativa es generalmente alta, con promedio anual de un 80 % (IGAC, 1992, 1995; INGEOMINAS, 1991a; 1992). En el Capítulo 4 se hace una descripción complementaria de la zona, que surge del análisis de las variables fisiográficas en el desarrollo del proyecto.

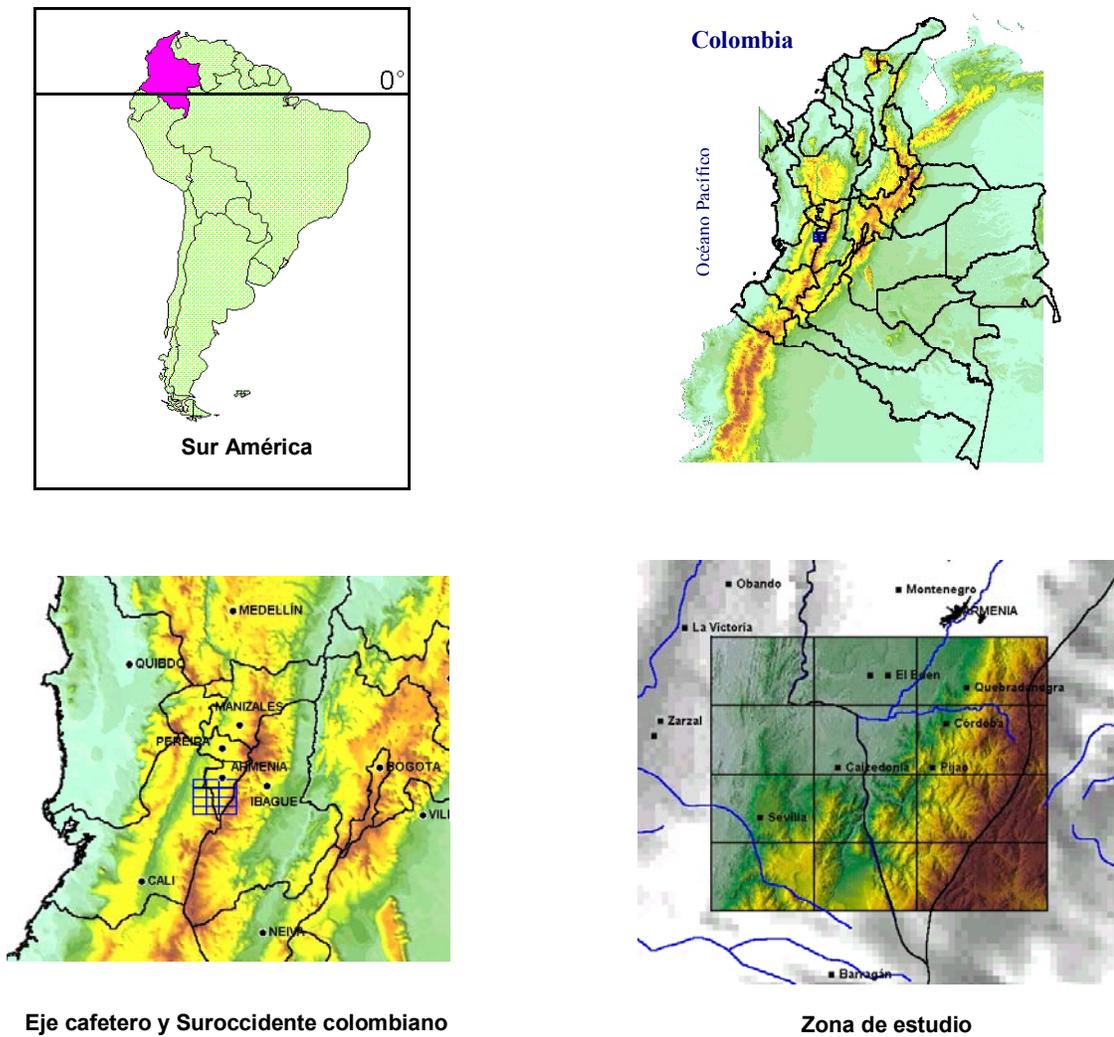
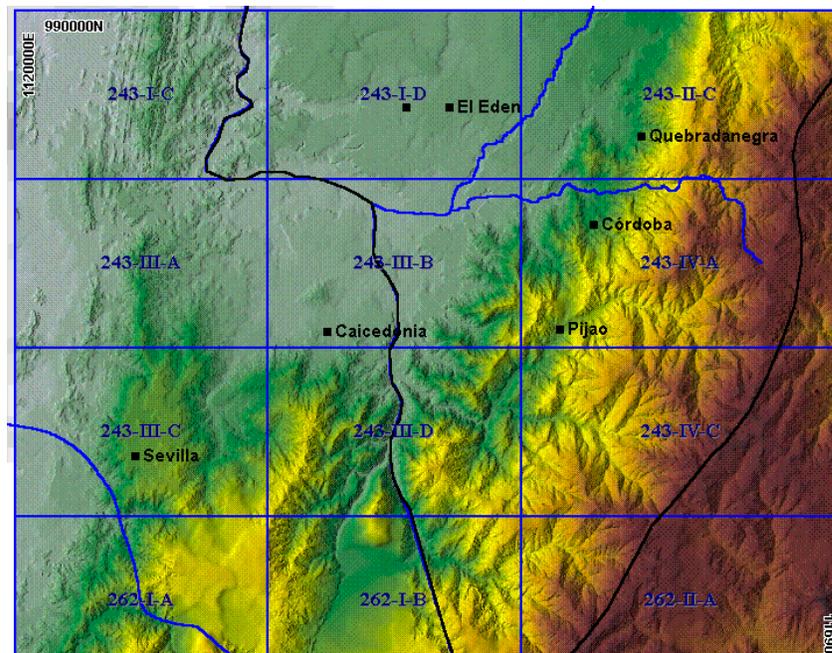


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

Este territorio del trópico húmedo de montaña, está distribuido entre las zonas de vida bosque húmedo premontano, bh-pm (precipitación y temperatura promedio anual 1 900 mm, >24 °C), bosque húmedo, bh (precipitación y temperatura promedio anual 2 600 mm, >24 °C), bosque muy húmedo montano bajo, bmh-mb y bosque muy húmedo premontano, bmh-pm (precipitación y temperatura promedio anual 2 200 mm, >16 °C y <20 °C), bosque muy húmedo montano, bmh-m y bosque pluvial montano, bp-m (precipitación y temperatura promedio anual 2000 mm, >8 °C y <12 °C), bosque muy húmedo montano, bmh-m y bosque húmedo montano bajo, bh-mb (1800 mm anuales  $t > 12$  °C y  $< 16$  °C), de acuerdo con la clasificación de Holdridge (Espinal y Montenegro, 1977).



**Figura 2.** Detalle de la zona de estudio.

### **1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES.**

Frente a las preguntas y expectativas inicialmente formuladas en el anteproyecto de grado, durante su ejecución se encontró una realidad diferente a la esperada, especialmente en cuanto a disponibilidad de información (cartografía básica y temática en formato digital, usos del suelo a partir de imágenes de satélite, bases de datos temáticas, georreferenciadas o no, etc.).

No obstante la valiosa ayuda del Centro Nacional de Investigaciones del Café CENICAFÉ (Chinchiná), que suministró series meteorológicas de 12 estaciones y de la Federación Nacional de Cafeteros FEDECAFÉ, con el aporte de cartografía digitalizada, para la realización del proyecto se tuvo que recurrir a dispendiosas búsquedas de información, muchas de ellas con pocos resultados, y a la digitalización de 12 planchas de la cartografía básica del IGAC a escala 1:25 000 y dos geológicas a escala 1:100 000 del INGEOMINAS.

#### **1.3.1 Alcances.**

Con base en las limitaciones arriba mencionadas, y previa adquisición y procesamiento analógico y digital de información, los alcances se describen a continuación:

- recopilación análisis y síntesis bibliográfica (aproximación al estado del arte), sobre movimientos de masa inducidos por sismos, clasificación de movimientos de masa y metodologías de zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos de masa;
- selección de metodología, de acuerdo con los insumos disponibles;
- descripción de los parámetros sísmicos que definen el sismo del 25 de enero, en términos de epicentro, magnitud, profundidad, aceleraciones, zonas afectadas y niveles de daño, entre otros, a partir de documentación disponible;

- evaluación del papel de las lluvias en la región en términos de estabilidad de las laderas;
- discusión de alternativas para el tratamiento de las variables pendientes naturales del terreno, humedad y geología para un modelo de susceptibilidad a los movimientos de masa;
- adquisición, depuración e integración de información cartográfica, básica y temática, así como de bases de datos (sismicidad histórica, catálogo de efectos geológicos inducidos por sismos en Colombia, series históricas de lluvias, etc.), y su tratamiento con herramientas de sistemas de información geográfica (SIG);
- inventario de huellas de movimientos de masa a partir de un modelo digital de elevación del terreno (MDE);
- descripción de las correlaciones entre factores de preparación y disparo de los movimientos de masa, mediante modelamiento de la susceptibilidad en la zona de estudio;
- desarrollo de tres modelos de susceptibilidad a los movimientos de masa, comparación de los mismo y validación;
- generación de insumos para proyectos regionales como la zonificación de riesgos para la atención y prevención de desastres, en el marco de los planes de ordenamiento territorial.

### **1.3.2 Limitaciones.**

- La cartografía básica disponible (IGAC a escala 1:25 000 con curvas de nivel cada 50 m), no está actualizada y es cronológicamente heterogénea. Esto conlleva a errores en la integración de atributos entre diferentes planchas (p. ej., coherencia y continuidad de curvas de nivel) y marca un límite de resolución para la identificación de patrones geomorfológicos indicadores de movimientos de masa;

- entre la cartografía básica de curvas de nivel a 1:25 000 y la geología a escala 1:100 000 no se encontró información temática relevante para su incorporación en las propuestas de modelos de susceptibilidad. Por otra parte, la información sobre isohietas se generó a partir de 12 estaciones pluviométricas, complementada con isohietas (CVC, 1997), a escala aproximada 1:300 000, lo que significa un salto en disminución de resolución en esta variable de los modelos.
- Las imágenes multiespectrales de sensores satelitales son muy costosas por lo cual no se pudo contar con varias imágenes tomadas de la misma zona en diferentes fechas; esto limita la posibilidad de hacer un estudio multitemporal;
- aunque se obtuvo información de diferentes fuentes sobre movimientos de masa pre, co y postsísmicos, la mayoría de los datos son difíciles de compatibilizar por razones de divergencia de nomenclatura y falta de precisión en la localización, entre otros.

#### **1.4 OBJETIVOS.**

##### **1.4.1 Objetivo general.**

Aportar al entendimiento de la evolución del paisaje en el Eje Cafetero, a partir del estudio de las variables que intervienen en la dinámica de los movimientos de masa y de los factores disparadores de éstos.

##### **1.4.2 Objetivos específicos propuestos (P) y alcanzados (A).**

- **P.** Identificación y análisis de la interacción de los fenómenos endógenos y exógenos que pueden influenciar la ocurrencia de los movimientos de masa.
- **A.** Se alcanzó en términos de documentar eventos cosísmicos (endógenos) y

postsísmicos asociados con lluvias (exógenos), incluida revisión de literatura sobre fenómenos causantes.

- **P.** Estudio de la dinámica de los movimientos de masa inducidos por sismos.  
**A.** No alcanzado, es un objetivo por fuera de los alcances generales y recursos específicos del proyecto.
- **P.** Análisis de los parámetros sísmicos del terremoto del 25 de enero de 1999.  
**A.** Parcialmente alcanzado. Se recopiló casi toda la literatura sobre este sismo y se presenta una síntesis de la misma. No se contó con suficiente información de réplicas para una mejor caracterización del evento.
- **P.** Análisis del régimen hídrico de la zona de estudio y la influencia de las lluvias en los movimientos de masa posteriores al sismo del 25 de Enero de 1999.  
**A.** El régimen hídrico no se evaluó, por falta de acceso a información de caudales. En cambio, se generó un modelo de humedad del terreno en la zona y un análisis de series históricas de precipitación, con clara influencia en los movimientos de masa.
- **P.** Producción de cartografía temática con la utilización de un SIG en la cual se integren las bases de datos, la cartografía digital y los Modelos Digitales del Terreno MDT.  
**A.** Si fue alcanzado. Fue necesario digitalizar información cartográfica básica y temática.
- **P.** Recopilación de la historia de los movimientos de masa en la zona de estudio.  
**A.** Se acopió información cosísmica y postsísmica y se realizó un inventario de huellas de movimientos de masa por anomalías geomorfológicas a partir de un modelo de sombras. Otra información histórica recopilada no se incluyó en este trabajo por heterogeneidad de las fuentes (institucionales y hemerográficas).

- **P.** Modelamiento de factores en la evolución del paisaje en el Eje Cafetero de Colombia.

**A.** A partir de tres conjuntos de variables naturales (pendientes, humedad y geología) se generaron, compararon y validaron tres modelos de susceptibilidad a los movimientos de masa.

- **P.** Aporte de un insumo que contribuya a la mejor planificación del desarrollo de los municipios afectados por el sismo.

**A.** Alcanzado.

- **P.** Aporte de interrogantes de partida para futuras investigaciones.

**A.** Alcanzado.

## **2. METODOLOGÍA.**

### **2.1 DESCRIPCIÓN.**

#### **2.1.1 Identificación y planteamiento del problema.**

El 25 de enero de 1999 ocurrió un evento sísmico, que afectó suelos debilitados por las condiciones de humedad previas. Más o menos desde mayo de 1998 se debilitó el evento El Niño que se había iniciado en 1997, cuyas repercusiones en la zona Andina de Colombia son, esencialmente, déficit de lluvias (IDEAM, 1999). Las precipitaciones en la zona del Eje Cafetero empezaron a incrementarse, en el contexto del fenómeno La Niña, que duraría hasta 1999 (IDEAM, 2000). La superposición de dos importantes eventos naturales (sismo y lluvias) disparó movimientos de masa que modificaron el paisaje de la zona.

Para aportar al entendimiento de la relación entre sismo, lluvias y movimientos de masa en esta zona se presentó una propuesta de investigación en torno al análisis y zonificación de la susceptibilidad a movimientos de masa en un área seleccionada del Eje Cafetero. Esta propuesta se planteó con base en una primera revisión bibliográfica sobre el estado del conocimiento en los temas de interés para el proyecto, con la

asistencia y asesoría de geólogos, cartógrafos, sismólogos y otros investigadores.

### **2.1.2 Fuentes de información.**

Se identificaron las posibles fuentes de cartografía, bases de datos (registros pluviométricos, inventarios de movimientos de masa, datos sísmicos), prensa y trabajos de investigación que hubiesen avanzado en el problema de interés; se plantearon los convenios y cartas de intención de cooperación que podrían surgir entre el OSSO, grupo de investigación desde el cual se desarrolla la investigación e instituciones que dispusieran de información, como CENICAFÉ, CRQ, INGEOMINAS, IGAC, IDEAM, FEDECAFÉ, PROSIS S.A., etc.

### **2.1.3 Procesamiento de la información.**

Se digitalizaron 12 planchas topográficas a escala 1:25 000 (IGAC, varios años) y dos planchas geológicas a escala 1:100 000 (INGEOMINAS, 1983, 1984) para generar la cartografía utilizada en el proyecto: mapas temáticos por cobertura, modelos digitales de terreno y modelos de elevación digital. Se construyeron dos mosaicos con fotografías aéreas de 1995, para fotointerpretación de geología. Se procesaron bases de datos de series de precipitación, las cuales se evaluaron con respecto a indicadores internacionales del fenómeno El Niño Oscilación del Sur - ENOS (ver Anexo C). Se diseñó una base de datos para el manejo y análisis de inventarios de movimientos de masa. Se acopiaron estudios sobre aceleraciones sísmicas (Monsalve et al., 2000; AIS, 1996); fallas y neotectónica (Paris, 1997, Ingeominas 1983, 1984), y zonificación climática e isohietas (Castaño et al., 1980; CVC, 1997).

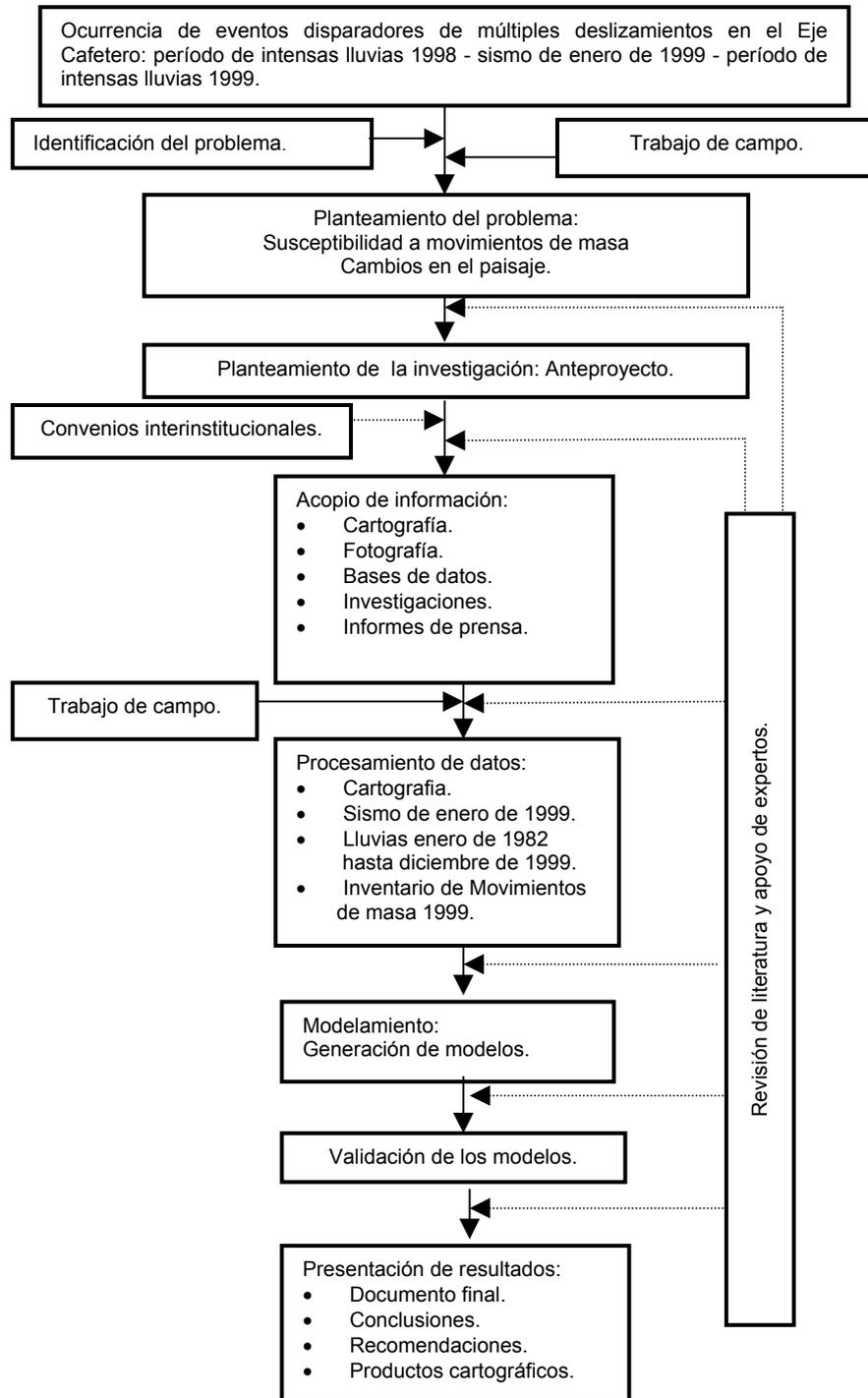
#### **2.1.4 Modelamiento.**

Con base en revisión de metodologías y estudios de caso de modelos de susceptibilidad a movimientos de masa, acompañados de documentación sobre casos específicos de movimientos de masa, se seleccionaron, analizaron y prepararon las variables pendientes naturales del terreno, humedad y geología, y se generaron dos modelos de susceptibilidad. Estos fueron comparados con el modelo de susceptibilidad desarrollado por el OSSO (1995 a, b). Sobre el modelo de sombras se identificaron 3044 huellas de movimientos de masa con los cuales se validaron los tres modelos de susceptibilidad. Los resultados de la validación permitieron estimar tanto la calidad de cada modelo como el estado de susceptibilidad de la zona de estudio.

#### **2.1.5 Presentación de resultados.**

Tanto el trabajo de investigación como los resultados, conclusiones y recomendaciones, son presentados como tesis de pregrado para optar por el título de Ingeniera Topográfica de la Universidad del Valle.

## 2.2 ESQUEMA METODOLÓGICO.



### **3. BASES CONCEPTUALES Y REVISIÓN DE LITERATURA.**

#### **3.1 CONCEPTUALIZACIÓN DE PAISAJE.**

En 1810, A. Von Humboldt definió el paisaje (Landschaft) como el “carácter íntegro de un trecho de la tierra”. Posteriormente desde la geografía se propone una aproximación horizontal al análisis espacial de los fenómenos naturales y desde la biología una aproximación vertical del análisis funcional de los sistemas naturales. Etter (1990) menciona a Troll y a Bertalanffy: Troll (1950), desarrolló el concepto de Ecotopo o mínima unidad de paisaje con funcionalidad ecológica y Karl Ludwig Von Bertalanffy (1968) desarrolló lo que sería la base epistemológica de la Ecología del Paisaje, la Teoría General de Sistemas (T.G.S.), como una respuesta a las aproximaciones atomistas. La visión de la T.G.S. se basa en la identificación de patrones de organización o la estructura de relaciones entre los elementos componentes de un sistema; la visión reduccionista precedente se basa en la identificación de aspectos comunes y componentes de las estructuras (Capra, 1996; Etter, 1990; Morin, 1990).

Según Etter (1990), son factores formadores del paisaje el clima, la litología, la hidrología, el suelo, la vegetación, la fauna y el hombre, junto con sus actividades. Las interacciones que tienen lugar entre estos factores le confieren una serie de cualidades propias a cada paisaje, de acuerdo con el estado y combinación particular de las variables. Estas propiedades se reflejan en aspectos como la forma del relieve, patrones de drenaje, fisonomía y estructura de la cobertura vegetal, biomasa, productividad del suelo, diversidad biológica y estabilidad de los geoprocesos y bioprocesos. En este sentido, un paisaje puede ser definido como una asociación característica de patrones estructurales y funcionales que responden a la interacción de los factores formadores.

Los paisajes así entendidos tienen dos componentes: el fenosistémico o conjunto de patrones visibles (geoformas, coberturas) y el criptosistémico o grupo de procesos no visibles que subyacen a la expresión fenosistémica.

Esta nueva concepción del paisaje retoma el axioma holístico de Aristóteles “el todo es más que la suma de sus partes” en un sentido cualitativo. Koestler (1968) en Etter (1990), menciona las “estructuras que encapsulan subestructuras”, un “proceso activado por subprocesos” y concluye que no existen en realidad ni todos ni partes en sentido absoluto, sino estructuras intermedias semiautónomas que componen niveles de complejidad creciente. Las características de la estructura emergen de las interacciones como de las cualidades de los elementos que las constituyen (Etter, 1990).

### **3.2 EVOLUCIÓN DEL PAISAJE.**

La geomorfología es la especialidad científica que se ocupa del estudio de las formas de la tierra (geoformas) sobre los continentes y en el interior de las cuencas oceánicas. Incluye el análisis del desarrollo e historia de las superficies planetarias. Está relacionada con procesos geológicos internos de la corteza terrestre y con fuerzas extremadamente dinámicas de viento, agua, ondas y glaciales que modifican las geoformas (Bloom, 1991; Baker, 2001; Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).

El estado de desarrollo actual de la geomorfología ha llevado a hablar de diferentes líneas de investigación de acuerdo con el área de conocimiento (Sala y Batalla, 1996).

- Conceptos y métodos: investiga principios y fundamentos de la geomorfología, métodos y técnicas de observación, descripción, experimentación y análisis.
- Geomorfología estructural: retoma aportes de la geofísica en cuanto a la estructura dinámica de la corteza y estudia las geoformas propiamente dichas.
- Geomorfología dinámica o de procesos: estudia los mecanismos y efectos de los agentes geomorfológicos y de los grandes procesos y formas asociadas.

- Geomorfología climática: se enfoca al estudio de los grandes paisajes como glaciares, periglaciares, templados – húmedos, semi – áridos, áridos, cálidos - húmedos, áreas de montaña (desarrollo altitudinal en contraposición al latitudinal).
- Geomorfología histórica: es el estudio de la evolución en la historia geológica de las formas, se ocupa de la reconstrucción de procesos y paisajes pasados por medio de la interpretación de sus restos y del impacto de los mismos en el relieve actual.
- Geomorfología ambiental: estudia los impactos naturales y antrópicos en el medio. Es de suma importancia el papel que ejercen la corteza terrestre y el relieve en los asentamientos humanos; en este sentido, el aporte de la Hidrología y la Pedología han dado a la Geomorfología una importancia cada vez más relevante en cuanto a su papel en la sociedad, la primera porque de ella procede gran parte de la renovación teórica y metodológica a partir del concepto de sistema y de su aplicación a la cuenca de drenaje; la segunda por sus aportes en cuanto a los procesos de erosión y las subsecuentes metodologías para el control y manejo de pérdida de tierras (Bloom, 1991).
- Geomorfología regional: estudio geomorfológico de grandes extensiones enfocado a regiones naturales o regiones políticas (aunque éstas últimas fragmentan a las primeras limitando un enfoque más coherente).
- Teorema de ergodicidad: los geomorfólogos infieren la naturaleza de la evolución del paisaje por comparación de formas similares de diferente edad y, dada la escala de tiempo humana, una secuencia temporal generalmente no es observada pero puede ser reconstruida a partir de bases teóricas. El concepto fundamental es que el significado de la observación de un hecho individual sobre el tiempo es igual al significado de la observación de muchos hechos individuales en un área: se substituyen observaciones en el tiempo por observaciones en el espacio. Un caso especial de ergodicidad es la alometría o estudio de cambios proporcionales correlacionados con variación de tamaños. La alometría dinámica describe cambios en las relaciones entre partes de un individuo a través del tiempo (p. ej., variaciones en una estación hidroclimática en un intervalo de tiempo). La alometría estática

describe cambios en las relaciones entre miembros de variado tamaño de un grupo en un momento en el tiempo (variaciones a lo largo del perfil de una cuenca en un momento dado). Las relaciones alométricas son relaciones cuantitativas entre formas superficiales de escalamiento no lineal. (Baker, 2001; Sauchyn, 2001; Sala y Batalla, 1996; Wood, 1999).

- Autosimilaridad y autosemejanza: la mayoría de los objetos de la naturaleza tienen un comportamiento que se puede describir con base en los conceptos de la teoría geométrica de la medida y de la geometría fractal (Bloom, 1991; Guzmán et al., 1993).

Se hace a continuación un recorrido por la historia de la evolución del pensamiento en torno a las formas de la superficie terrestre, los conceptos controversiales y la tendencia actual.

### **3.2.1 Aspectos históricos y desarrollo del pensamiento en Geomorfología.**

Entre los griegos Homero (novena centuria a.C), Pitágoras (590-510 a.C), Heródoto (484-426 a.C.) hicieron descripciones de erosión e inundaciones, que están aparentemente en el registro estratigráfico y referenciaron ideas de ciclicidad en la naturaleza, denudación de geformas y un “universo infinito”; en textos de Aristóteles (384-322 a.C) aparecen datos sobre la acción de los ríos y el mar como responsable del nivelamiento del globo y en Estrabon (63 a.C. - 21 a.C.) la idea de una formación del relieve mediante procesos de deformación. Más adelante el italiano Leonardo Da Vinci detectó tanto la lentitud de los procesos de erosión como la importancia de la acción fluvial. Los conceptos que dominaron durante siglos partieron de los textos bíblicos, es el caso del *creacionismo* (relieve como creación divina) y el *catastrofismo* (relieve como producto de grandes catástrofes, principalmente el diluvio universal). Con relación a este último, el *neptunismo* postulado por Werner (1749 – 1818) introdujo el origen marino de las rocas por sedimentación seguida de compresión; aunque ya en 1669 Nicolaus Steno's Prodomus había hablado del *principio de superposición* (las capas más antiguas se encuentran en el fondo sucedidas progresivamente por capas más jóvenes), del

*principio de horizontalidad original* (los sedimentos se acumulan horizontalmente) y del *principio de continuidad lateral* (cuerpos sedimentarios formados en lentes), él también creyó en una tierra joven y en unos paisajes formados a partir del diluvio (Baker, 2001; Chaison, 2001; Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).

El surgimiento y consolidación de la Geomorfología como una ciencia independiente de la geología y de la geofísica se dió a finales del siglo XIX y a lo largo del siglo XX; por la década de 1970, la geomorfología tuvo un crecimiento hacia la incorporación de problemas relacionados a los procesos formadores del paisaje, incluyendo movimientos de masa y procesos costeros, todos los cuales afectan a las personas que viven en regiones con cierta susceptibilidad.

Las teorías y paradigmas que reflejan el desarrollo del pensamiento alrededor de las geoformas y del paisaje evolucionaron de la descripción puramente cualitativa al modelado matemático y la teoría de sistemas; de la visión regional y planetaria a la cuenca hidrográfica como unidad fundamental y, finalmente, han retornado a una visión planetaria a partir del surgimiento de las técnicas de teledetección y de los Sistemas de Información Geográfica. En los siguientes numerales se hace un recorrido por los postulados y teorías que han motivado su desarrollo y por algunos de los conceptos que los fundamentan.

### **3.2.2 Doctrinas y postulados.**

#### **Cuvier.**

Sintetizador y defensor de la doctrina del *Catastrofismo*, que afirma que en intervalos de la historia de la tierra todas las cosas vivas han sido destruidas por cataclismos, como flujos y sísmos y han sido reemplazadas por poblaciones completamente diferentes. Durante estos cataclismos fueron formadas las características de la superficie de la tierra, tales como montañas y valles. El catastrofismo fue correlacionado con doctrinas

religiosas y permaneció por algún tiempo como la interpretación de la historia de la tierra aceptada por la gran mayoría de geólogos. Georges Cuvier, se posicionó como el geólogo más importante de su tiempo ("Catastrophism." Infoplease Dictionary © 2000).

### **Hutton.**

El geólogo escocés James Hutton concibe el *Uniformitarianismo* en oposición al Catastrofismo en su *Theory of the Earth* (1785, 1795), afirma que los cambios en la superficie de la tierra que ocurrieron en el tiempo geológico pasado se refieren a las mismas causas de los cambios que ahora son producidos sobre la superficie de la tierra. Esta doctrina fue presentada posteriormente por John Playfair en su *Illustrations of the Huttonian Theory* (1802). El uniformitarianismo, que fue ampliamente aceptado como un resultado de los esfuerzos de Lyell, está sintetizado en la frase de Geikie (1897) "el presente es la clave del pasado"; la historia de la tierra puede ser explicada a partir de las actuales observaciones y relaciones (causas) ("Uniformitarianism." Infoplease Dictionary © 2000, Sauchyn. 2001).

### **Lyell.**

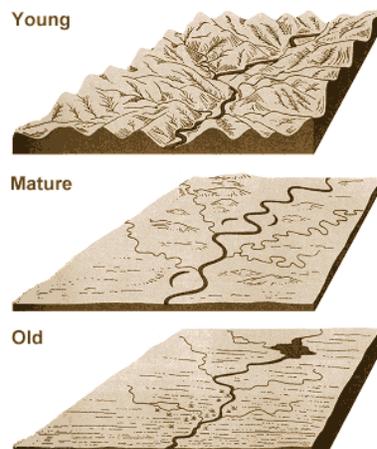
El geólogo británico Sir Charles Lyell fue un gran abanderado del Uniformitarianismo, y quién lo popularizó. Concibió la idea según la cual todos los procesos (por ejemplo biológicos y geológicos) fueron delicadamente balanceados. Su trabajo influyó fuertemente las ideas científicas en el siglo XIX, no solo específicamente en el campo de la geología: él facilitó la aceptación posterior de la teoría de la evolución de las especies de Charles Darwin ("Lyell, Sir Charles." Infoplease Dictionary © 2000).

### **Davis.**

El *Ciclo Geográfico* (llamado también ciclo de erosión o teoría de la peneplanización) de William Morris Davis, fue publicado entre 1880 y 1938. Fue el primer modelo de evolución del paisaje de amplia aceptación: *las geoforma a través de periodos de tiempo geológicos, pasarían por estados de juventud, madurez y senectud por acción de*

*agentes erosivos*, como está representado en Figura 3. Influenciado por Lyell y Darwin, fundamentó su teoría en los conceptos de estructura, proceso y tiempo: la estructura fue considerada como una condición inicial (fuera del alcance de su modelo); los procesos fueron la suma de meteorización y transporte en el contexto de un clima “normal” (temperatura húmeda, procesos fluviales predominantes), los procesos ligados a otros climas se llamaron accidentales; el tiempo fue el tema central en el sentido del desarrollo relativo de las geoformas para completar el ciclo geográfico: *Las geoformas son el resultado de procesos constructivos o destructivos actuando sobre las estructuras en un lapso determinado de tiempo.*

Otras investigaciones indicaron que la evolución del paisaje no es cíclica y que los términos “juventud”, “madurez” y “senectud” aplicados a un paisaje son puramente cualitativo. (Bloom, 1991; Flórez, 1994; Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).



**Figura 3.** Estados del paisaje en un ciclo fluvial de erosión.

Modelo propuesto por William Morris Davis (Geomorphologist, 2000).

### **Gilbert.**

Contemporáneo de Davis, desarrolló la idea de *Tierra Esculpida*. En sus apreciaciones aparece el concepto de sistema en el sentido de que todo cambio es siempre

compensado y, por tanto, en el caso de ríos y vertientes, existe siempre un estado de equilibrio dinámico. Hizo énfasis en la acción de los procesos externos sobre las estructuras geológicas y consideró las formas del terreno como el resultado de la tensión entre la fuerza de los agentes erosivos y la resistencia de las rocas (Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).

### **Penck.**

En su obra *Die Morphologische Analyse (1924)* postuló la idea de una relación entre las geoformas y los movimientos de la corteza; relacionó la forma con la proporción de levantamiento y rechazó la afirmación de Davis acerca de que el levantamiento es seguido por la erosión en una corteza estable; él no vio una secuencia de formas desarrolladas sino varias posibles secuencias de acuerdo con las proporciones diferenciales de levantamiento y erosión. Fue cuidadoso en definir su modelo como sub – aéreo, excluyendo procesos eólicos y glaciares y variabilidad climática. Enfocó su análisis al modelamiento de perfiles de talud para diferentes combinaciones de erosión de ríos, levantamientos y resistencia de rocas, supone que las rocas mas fuertes requieren taludes más empinados para la misma proporción de denudación; modeló el perfil de flujo longitudinal controlado adicionalmente por la descarga de flujo. Definió tres categorías de geoformas de acuerdo con la historia tectónica (con un clima “normal”): plegamiento de fuerzas laterales (orogénesis), formación de cúpulas o domos sin plegamiento (epirogénesis) y regiones estables. Concibió tres geoformas resultantes de levantamientos, lentos, intermedios y rápidos, que morfológicamente fueron similares a los estados de denudación postulados por Davis, aunque con base en la historia tectónica, considerando la evolución de los paisajes desde el punto de vista tiempo independiente (Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).

### **King.**

Formado en la escuela davisiana, no estuvo de acuerdo con muchas de sus apreciaciones; postuló que el estudio de la geomorfología debe fundamentarse en el

contexto de la época estudiada. El modelo de King (1953) se basa en un perfil de talud consistente en cuatro segmentos, alguno de los cuales pueden no estar presente:

- Talud liso: segmento convexo de una cresta, dominado por deslizamientos de suelo de un manto desgastado; se requiere un incremento de ángulo de talud para transportar grandes cantidades de escombros hacia el pie del mismo.
- Cara Libre: afloramiento de roca madre; retiro paralelo de material meteorizado y remoción uniforme; puede no ocurrir en zonas de bajo relieve.
- Talud de escombros: los escombros de cara libre descansan en un ángulo de reposo, no esconden la cara libre pero se retiran con ésta.
- Decaimiento de talud: perfil suave y cóncavo controlado por lámina lavada de sedimentos sobre roca madre erodada (Sauchyn. 2001).

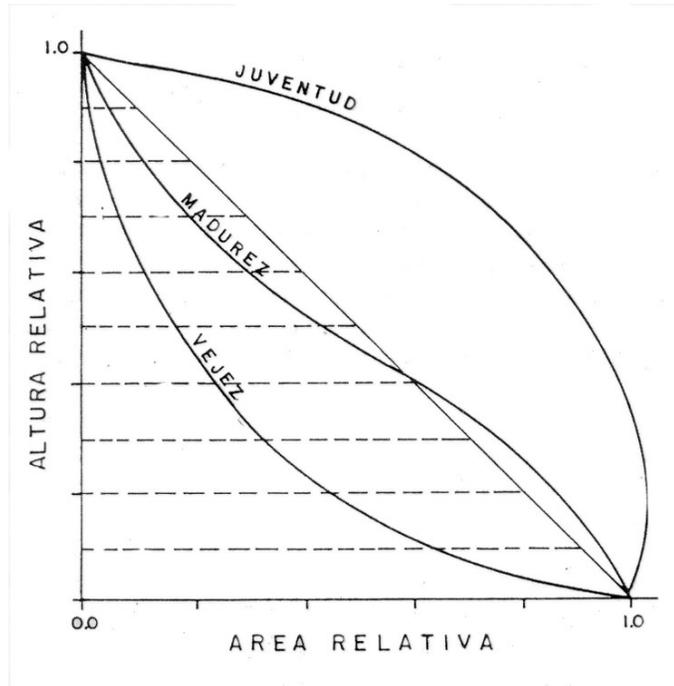
### **Horton.**

Introdujo el nivel cuantitativo a los estudios geomorfológicos en 1945; desarrolló una descripción cuantitativa de la red de drenaje fluvial con la finalidad de hacer que fuera posible predecir su comportamiento. Elaboró un modelo de escorrentía y erosión del agua en las vertientes y de los procesos hidráulicos (Sala y Batalla, 1996).

### **Strahler.**

Algunos afirman que sus postulados, expuestos en 1952, pueden considerarse las bases de la geomorfología moderna: énfasis en el estudio de los procesos que rigen el modelado de las geformas, enfoque de carácter dinámico, es decir, con base en los principios de la física, formulación de modelos matemáticos, deducción a partir de la observación y análisis en términos de sistemas abiertos. Con base en sus observaciones (1957), concluye que la curva hipsométrica de un paisaje “joven” es convexa, la de un paisaje “maduro” es más o menos recta y la de un paisaje “viejo” es

cóncava, como se observa en la Figura 4. (Sala y Batalla, 1996; Flórez, 1994).



**Figura 4.** Curvas hipsométricas típicas.

Según Strahler (1957). En línea interrumpida está el triángulo isósceles (Flórez A., 1994: p.70).

### **Hack.**

Hizo énfasis en el estudio de procesos (1960). Fuertemente influenciado por Gilbert, sus deducciones se basan en el concepto de equilibrio dinámico y procesos tiempo - independientes. Según este supuesto todas las formas del terreno están mutuamente ajustadas, de manera que reflejan el equilibrio existente entre la estructura geológica y el proceso de modelado dominante. Esta forma o formas, producto del equilibrio, prevalecen mientras prevalezcan el o los procesos que las determinan (Sauchyn, 2001).

## **Scheidegger.**

Postuló (1970) que los paisajes como sistemas están sujetos a un número relativamente pequeño de principios que gobiernan su evolución, los cuales son medibles:

- Principio del antagonismo: un paisaje representa el equilibrio instantáneo en la interacción de dos procesos antagónicos, los procesos endógenos y exógenos. Los procesos exógenos ocurren esencialmente al azar (ligados a la turbulencia en el aire y en el agua) y los endógenos son no aleatorios (ligados a la tectónica de placas). Los parámetros de intensidad de los procesos son básicamente velocidades de levantamiento y denudación.
- Principio de la inestabilidad: el equilibrio dinámico de un paisaje es generalmente inestable; las formas individuales del paisaje cambian y cualquier desviación de la uniformidad tiende a crecer, es decir que la tasa de crecimiento de una desviación de la uniformidad aumenta con la cantidad de desviación que ya había sido alcanzada. Por ejemplo, las tasas de erosión pueden crecer con el tamaño de una depresión o con la pendiente de una vertiente.
- Principio de la catena: el paisaje global se compone de catenas (secuencias precisas), cada una de las cuales consiste en una cima plana, una parte media abrupta y una parte inferior plana constituyendo una secuencia. A mayor pendiente, más rápido retrocede la vertiente, las partes planas de arriba y abajo permanecen más tiempo.
- Principio de selección (enunciado inicialmente por Gerber, 1969): en la acción ocurre cierta direccionalidad. Las formas naturales y las configuraciones en un paisaje son primariamente aquéllas que son más estables bajo su propio peso.
- Principio del control estructural: muchas formas están diseñadas por procesos tectónicos de profundidad. La erosión ocurre preferencialmente a lo largo de las direcciones del esfuerzo del campo de estrés neotectónico, por lo tanto la orientación de las formas erosionales tiende a alinearse en esas direcciones. Las

direcciones del esfuerzo del campo de estrés neotectónico son aquellas direcciones en que el material está más cerca del límite de fractura. Los procesos exógenos actúan como un generador adicional de estrés y por consiguiente la ruptura ocurre en la dirección del esfuerzo preexistente (Flórez, 1994).

### **Kirkby.**

El *Modelamiento determinístico de proceso – respuesta* de Kirkby se fundamentó en una ecuación de balance de masas. Modeló el talud como un perfil continuo en el cual la elevación cambia en función de procesos de transporte químico y mecánico del suelo. Consideró una erosión límite y un submodelo hidrológico con base en la precipitación anual y el análisis de movimientos de masa (Sauchyn, 2001).

### **Anhert.**

Anhert postuló un *Modelo matemático de evolución de pendientes* (1980) con base en el concepto de equilibrio central, sustitución y remoción de escombros. Modeló espacial y temporalmente tasas variables de producción de erosión, transporte y depositación de elementos del paisaje. Dependiendo del gradiente de la pendiente y la fluidez del material, los movimientos de masa lentos serían viscosos o plásticos. En ambos casos habría un ángulo de talud crítico que para el caso de masa viscosa sería cero. El desgaste no sería acumulativo, así se tendría un material removido a un nivel próximo más bajo donde el gradiente de la pendiente sería menor del umbral (Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).

### **Slaymaker.**

Propone clasificar los experimentos de campo de la siguiente manera: mediciones de evolución de una forma del terreno, mediciones de los cambios morfológicos en diferentes conjuntos, mediciones de la acción de un proceso bajo el control artificial de

alguna de las variables (Sala y Batalla, 1996).

### **Álvarez.**

La interpretación de Cuvier sobre los registros geológicos en términos de discontinuidades o catástrofes fue más o menos abortada durante el S XIX debido al éxito del Uniformitarismo de Lyell y de la Teoría de la Evolución Darwiniana, pero recientes teorías sobre impactos de meteoritos, asteroides y cometas que habrían provocado una gran destrucción, son semejantes a las ideas del Catastrofismo. Luis Álvarez y su grupo de investigadores publicaron (1980) sobre sus hallazgos de altos niveles del elemento Iridio en un estrato de origen marino que se encontraba separando los sedimentos del Cretáceo y el Terciario, lo cual podría ser una evidencia de impactos catastróficos ("mass extinction." Infoplease Dictionary © 2000).

### **Bertalanffy.**

El padre de la Teoría General de Sistemas, Karl Ludwig Von Bertalanffy, introdujo sus ideas como una respuesta a las aproximaciones atomistas de la explicación de la naturaleza. Con el gradual éxito de esta teoría, las tendencias de las diferentes escuelas de geomorfología no cambiaron: estudio de los procesos y su mecánica para la escuela anglosajona, estudios climáticos para la escuela europea, temas estructurales y aplicados para la escuela soviética (Sala y Batalla, 1996). Pero a partir de la definición de sistema como grupo de objetos junto con sus relaciones y atributos, el paisaje viene a considerarse como un sistema donde los objetos son los elementos en una escala particular, las relaciones son los procesos geomorfológicos y los atributos son las propiedades físicas de los elementos. Los sistemas pueden ser aislados (condiciones ideales inexistentes en la naturaleza), cerrados (intercambio de energía pero no de masa) o abiertos (intercambio libre de masa y energía). Un sistema aislado es la base del concepto de máxima entropía, en tanto que un sistema abierto tiende a autoajustarse y a permanecer cerca del equilibrio (mantiene una condición constante a pesar de su dinámica; comportamiento que es llamado dinámica estable). Cada uno de los

procesos geomorfológicos constituye sistemas abiertos y por lo tanto las formas que modelan han de entenderse como en equilibrio dinámico (Etter, 1990; Flórez, 1994; Sala y Batalla, 1996; Sauchyn, 2001).

## **NASA.**

En la actualidad, las investigaciones sobre geomorfología del National Aeronautic and Space Administration –NASA- están orientadas en una perspectiva de “mega geomorfología”, término que se introdujo en 1981. Esto significa un retorno de los geomorfólogos al estudio de los fenómenos en escalas espaciales del rango de regiones, continentes y planetas, con ayuda de la Teledetección Espacial. El programa espacial inicialmente llamado “Habitabilidad Global” surgió en 1982 de la idea de establecer un programa de cooperación internacional que entendiera a la Tierra como un sistema (Baker, 2001). Más recientemente las investigaciones se han orientado hacia el concepto de interferometría que desde el punto de vista geofísico conlleva a aplicaciones como el monitoreo de deformaciones de la corteza ocasionadas por sismos, erupciones volcánicas u otros procesos tectónicos. Desde el punto de vista geológico y medioambiental, permite el monitoreo de riesgos naturales tales como subsidencia o movimientos de masa (Baker, 2001; Massonnet, 1998).

### **3.3 EVOLUCIÓN DEL PAISAJE EN AMBIENTE TROPICAL DE MONTAÑA.**

La morfología de las zonas montañosas tropicales está caracterizada por un complejo mosaico de materiales y formas superficiales producto de la también compleja interacción entre sus factores formadores.

El estudio particular de geomorfología tropical se fundamenta en el balance entre procesos de desgaste y acumulación de materiales residuales y mecanismos de remoción y deposición que operan sobre estos productos residuales (movimientos de masa, sedimentación, etc.). Aunque algunos estudios han concluido que muchos de los procesos son químicos, o más precisamente bioquímicos - “la erosión química es el

más poderoso medio de diferenciación vertical del relieve en ambientes tropicales” -, son escasos los estudios conocidos sobre patrones e interacciones que intervienen en la alteración química de las rocas y la formación de suelo en ambientes tropicales (Thomas, 1994).

Los perfiles de meteorización involucran largos períodos de tiempo durante los cuales su desarrollo variará considerablemente. La precipitación y el brillo solar característicos de las áreas tropicales son factores críticos en la meteorización de las rocas porque constituye el control primario sobre la temperatura, la disponibilidad de agua y ácido orgánico derivado de la vegetación y del suelo. Todo lo que se sabe acerca del medio ambiente caliente y húmedo indica condiciones favorables para la meteorización química (Thomas, 1994).

Los estudios en África y América se han limitado a casos aislados; ambientes pobremente explorados en el sentido geomorfológico son los Andes y el Chocó Biogeográfico, no obstante el particular comportamiento climático de este último: precipitaciones del orden de los 300 a los 600 mm mensuales, entre 30 y 100 horas con sol mensuales, temperaturas del orden de 20 a 30 °C, evaporación entre 10 y 80 mm mensuales y humedad relativa entre el 83 % y el 96 % (CVC, 1997). Trojer (1958) planteó que la interpretación promedio de los sistemas dinámicos (en este caso el clima) permite determinar características importantes adicionales debido al reconocimiento de las causas físicas intermedias: “...éstos fenómenos locales, como todos los procesos de la atmósfera obedecen a las leyes de la física, lo cual permite generalizaciones por analogías”; sin embargo él mismo concluía “...en las condiciones actuales, es difícil que por medio de una interpretación dinámica se pueda obtener una descripción completa del clima”.

La relación entre precipitación y evapotranspiración controla muchos procesos geomorfológicos en el trópico; la mayoría de los bosques húmedos exhiben un balance hídrico anual positivo. El agua subterránea o almacenada probablemente inflencie más que ningún otro factor climático el potencial de desgaste de la roca en el trópico, por la

infiltración de grandes cantidades de agua (Thomas, 1994).

La importancia de la precipitación como factor modelador del paisaje no se reduce a su influencia en los procesos de erosión y sedimentación. De acuerdo con la experiencia costarricense y colombiana, la intensidad y la frecuencia de lluvias son factores fundamentales en la cantidad y distribución de los movimientos de masa (Mora y Mora, 1994; Restrepo y Velásquez, 1997). Los suelos residuales permanecen usualmente en estado de saturación parcial con una fase de aire continua entre sus intersticios; la presión de poros por contenido de aire se aproxima a la presión atmosférica como resultado de la capilaridad en los poros más pequeños, confiriéndole al sistema un estado de equilibrio. Esto implica efectividad en la absorción de humedad. La pérdida de capacidad de absorción de agua posterior a una fuerte lluvia predispone muchos taludes a falla, puesto que aquella implica mayor densidad, mayor presión de poros por contenido de agua y pérdida de cohesión (Thomas, 1994).

Por otra parte es importante el papel de las pendientes en la activación de eventos modeladores como movimientos de masa. Estudios alrededor del globo llevaron a conclusiones como las siguientes: taludes menores o iguales a 20 grados son aparentemente estables pero no pueden ser considerados 100 % seguros durante eventos extremos; taludes entre 26 y 28 grados se caracterizan por su gran inestabilidad; entre 38 y 50 grados son propicios para eventos de flujos de escombros en Puerto Rico; los deslizamientos en el Japón son comunes en el rango de 35 a 40 grados; en 1982 se presentó en el Gunung Mulu National Park el deslizamiento planar más grande sobre roca madre en un talud de 40 a 50 grados; pendientes más escarpadas pueden ser más o menos inestables dependiendo de la profundidad del saprolito (Thomas, 1994). En todo caso, es necesario evaluar las condiciones locales de las pendientes y su relación con la frecuencia y distribución de los movimientos de masa. En el Capítulo 6 se relacionan algunos trabajos desarrollados en los Andes colombianos.

La tectónica es un proceso global a gran escala también presente en el trópico. La

sismicidad se suma a las variables climáticas, topográficas y geológicas, adicionando complejidad a los procesos de cambio de las geoformas tropicales.

En el trópico húmedo de montaña colombiano convergen factores climáticos, topográficos, litológicos y ecosistémicos que se conjugan con procesos tectónicos haciendo de éste una unidad de paisaje con diversos niveles de complejidad que debe ser estudiada con prudencia; la extrapolación a estas áreas de los resultados de estudios en otros ambientes es un ejercicio arriesgado.

### **3.4 MOVIMIENTOS DE MASA.**

#### **3.4.1 Definición.**

Muchos investigadores tienen su propia definición de movimientos de masa. Medina (1991) los define como fenómenos geológicos que en su mecanismo involucran la movilización de volúmenes de materiales hacia niveles inferiores, bajo la acción directa de la gravitación terrestre. Para Villota (1991), son procesos denudativos relacionados con desplazamientos o transposición más o menos rápida de volúmenes variables de suelo, roca o detritos sobre una pendiente, por incidencia de fuerzas de desplazamiento y agentes geomorfológicos. Suárez (1998) afirma que son procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas que corresponden generalmente a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforma un talud de roca, suelo natural, relleno artificial o una combinación de ellos. Los movimientos ocurren generalmente a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos. Algunos segmentos de la ladera pueden moverse hacia arriba mientras otros lo hacen hacia abajo.

Estos movimientos de masa ocurren sobre una ladera o talud, términos que son usados indistintamente para referirse a una masa de tierra con cierta pendiente. La definición de Shuk (1990) se refiere a ellos como los tramos que partiendo de la cresta de los altos

topográficos (cerros, montes, riscos, etc.) llegan hasta los canales hidrográficos ubicados en su parte inferior o base; Bloom (1991) dice que la mayoría de las geoformas consisten en grandes curvas y superficies de talud formadas por movimientos de masa y la mayoría de las laderas son geoformas que resultan del paso de los ríos cortando los valles. Para Suárez (1998), una ladera o talud natural es una masa de tierra no plana sino con pendiente o cambio de altura significativo que se define como ladera si su conformación tuvo como origen un proceso natural y como talud si se conformó de manera artificial. Para Bloom (1991), los taludes son superficies irregulares que no pueden ser descritos por una simple ecuación matemática. El mejor mapa topográfico es solamente una aproximación de las infinitas irregularidades de una ladera.

### **3.5 CLASIFICACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE MASA.**

Puede decirse que existe tanta diversidad de clasificaciones de movimientos de masa, como investigadores del tema; tal vez por ello no sea raro encontrar contradicciones e inconsistencias entre ellas. La mayoría de las clasificaciones consideran dos variables básicas: el tipo de movimiento y el tipo de material involucrado.

Según Suárez (1998), se deben considerar cuatro etapas diferentes en la clasificación de los movimientos:

- Etapa de deterioro o antes de la falla, durante la cual el suelo está esencialmente intacto.
- Etapa de falla, caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.
- Etapa post-falla, incluye los movimientos de la masa involucrada en un movimiento de masa desde el momento de la falla y hasta el preciso instante en el cual se detiene totalmente.

- La etapa de posible reactivación en la cual pueden ocurrir movimientos que pueden, considerarse como una nueva falla, e incluye las tres etapas anteriores.

Millán (1998), afirma que se pueden complementar las clasificaciones al considerar elementos como: la tasa de movimiento, morfometría de área afectada y depósito resultante, la edad, el grado de alteración de la masa desplazada, las causas, el grado de desarrollo y el estado de actividad.

En Colombia la clasificación mas usada es la de Varnes (1978), definida básicamente por el tipo de material y el tipo de movimiento. A continuación se presenta la adaptación de Suárez (1998), complementada con apreciaciones de otros autores:

### **3.5.1 Caídas.**

En las caídas una masa de cualquier tamaño se desprende de un talud de pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte y desciende principalmente a través del aire por caída libre, a saltos o rodando. (Suárez, 1998). Soeters y Van Westen (1996) afirman que están siempre relacionadas con pendientes mayores a 40 grados, donde la roca está directamente expuesta. Las caídas son comúnmente controladas por discontinuidades en la roca y la acumulación de talus en la parte inferior de la ladera es un fenómeno asociado a estos movimientos.

Respecto al material involucrado, Suárez (1998) dice que las caídas de roca corresponden a bloques de roca relativamente sana. Las caídas de residuos o detritos están compuestos por fragmentos de materiales pétreos y las caídas de tierra corresponden a materiales compuestos de partículas pequeñas de suelo o masas blandas.

Vargas (1999) en su adaptación de Varnes (1978), divide las caídas en tres categorías:

- Caídas: movimientos intermitentes en caída libre, asociadas a escarpes de rocas duras y fracturadas, el volumen de material es bajo y el tamaño varía de cantos a bloques.
- Desprendimientos: disgregación de una masa litológica, ya sea de suelo o de roca fracturada, mediante un descenso súbito con fragmentación del material a lo largo de la ladera.
- Desplomes: disgregación de una masa litológica, generalmente rocosa y de volumen considerable, que forma un depósito de material grueso en la base.

### **3.5.2 Volcamiento o inclinación.**

Consiste en una rotación hacia adelante de una unidad o unidades de material térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad que generalmente ocurre en las formaciones rocosas. Las fuerzas que lo producen son generadas por las unidades adyacentes, el agua en las grietas o juntas, expansiones y los movimientos sísmicos (Suárez, 1998).

Se presentan con mayor facilidad en regiones donde existen diaclasas inclinadas excesivamente con una falla alineada aproximadamente paralela al frente de la ladera. (Soeters and Van Westen, 1996).

### **3.5.3 Deslizamientos.**

Este movimiento consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies. El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a la largo de toda la superficie de falla. Los deslizamientos pueden ser de una sola masa que se mueve, o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes (Suárez, 1998).

Los deslizamientos se dividen en dos subtipos, de acuerdo con el mecanismo de ruptura:

- Deslizamiento rotacional: la superficie de falla está formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo en movimiento. Posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El deslizamiento rotacional presenta en su parte superior hundimientos y en su parte inferior se producen flujos de materiales que se acumulan en la pata de la ladera o son transportados (Suárez, 1998). Soeters y Van Westen (1996) dicen que un deslizamiento rotacional está principalmente asociado con pendientes entre 20 y 40 grados y su relación profundidad-longitud D/L (Depth/Length), es del orden de 0.3 a 0.1. Además ocurren usualmente en suelos homogéneos, sean naturales o artificiales (Suárez, 1998).
- Deslizamiento traslacional ó planar: el movimiento de la masa se desplaza hacia fuera o hacia abajo a lo largo de una superficie mas o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación. Son generalmente controlados por superficies de debilidad tales como diaclasas, fallas, planos de estratificación (Suárez, 1998).

Suárez también tipifica las subclases de deslizamiento traslacional: si ocurren sobre discontinuidades sencillas en roca se les conoce como deslizamientos de bloque, cuando ocurren a lo largo de dos discontinuidades se les conoce como cuñas de roca (Suárez, 1998).

Suárez (1998) y Soeters and Van Westen (1996) coinciden al afirmar que la relación D/L es mucho menor en deslizamientos traslacionales que en rotacionales, generalmente menos que 0.1 y que este tipo de deslizamiento es propio de ambiente rocosos.

#### **3.5.4 Esparcimientos laterales.**

El modo de movimiento dominante es la extensión lateral acomodada por fracturas de corte y tensión. El mecanismo de falla puede incluir elementos no solo de rotación y traslación, sino también de flujo (Suárez, 1998). Soeters y Van Westen (1996) explican mejor este proceso: son movimientos de masa que ocurren en laderas suaves o moderadas donde una deformación plástica lenta ocurre en una subsuperficie horizontal extendida sobre una capa más coherente. Esta capa superior es rota por los movimientos del material subyacente y se mueve y desliza hacia afuera sobre la capa subyacente. Los esparcimientos laterales pueden ocurrir en masas de roca sobre suelos plásticos, como también en suelos finos (Suárez, 1998; Soeters and Van Westen, 1996).

#### **3.5.5 Flujos.**

En los flujos existen movimientos laterales de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla (Suárez, 1998). Generalmente asociados a la presencia de agua, se subdividen en:

- Flujos de roca. Comprenden las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas. Este tipo de movimiento ocurre en laderas muy empinadas mayores a 45 grados. Son ligeramente húmedos y de velocidad rápida a muy rápida (Suárez, 1998).
- Flujos de detritos (escombros). Se pueden considerar como la terminación de un flujo de rocas; fragmentos de roca se van formando debido al transporte del material. (Suárez, 1998).
- Flujo de lodo: los materiales transportados son muy finos y el contenido de humedad es muy alto. Suárez caracteriza este movimiento diciendo, “un flujo de lodo posee tres unidades morfológicas: un área de origen que generalmente es un

deslizamiento, un camino o canal de flujo y finalmente una zona de acumulación, a semejanza de un abanico de depositación” (Suárez, 1998).

### **3.5.6 Avalanchas.**

Son movimientos de una masa de hielo o nieve sobre una ladera, asociada a zonas glaciares de alta montaña. El principal agente es la gravedad y pueden variar desde un pequeño flujo hasta una gigantesca masa destructiva (Vargas, 1999).

### **3.5.7 Movimientos complejos.**

Se les denomina complejos, debido a que se producen por una combinación de dos o más de los tipos descritos anteriormente (Suárez, 1998).

Un movimiento de masa, no incluido en esta clasificación, es el conocido como reptación (creep), que por sí sólo puede afectar grandes áreas y preceder otros tipos de movimientos de masa. Pueden ser movimientos desde lentos hasta extremadamente lentos (unos pocos centímetros por año) del suelo subsuperficial, sin una superficie de falla definida (Suárez, 1988).

Keefer (1984), al exponer las características de los movimientos de masa, también realiza una adaptación de la clasificación de Varnes (1978), en la que, además del tipo de material y el tipo de movimiento, tiene en cuenta otros parámetros como el grado de ruptura interna, contenido de agua, velocidad del movimiento y profundidad. Esta clasificación se presenta en la tabla 1 y permite comparar los diferentes tipos entre sí.

**Tabla 1.** Características de los movimientos de masa inducidos por sismos.

Nombre	Tipo de Movimiento	Ruptura Interna <sup>1</sup>	Humedad <sup>2</sup>				Velocidad <sup>3</sup>	Profundidad <sup>4</sup>
			D	U	PS	S		
<b>DESGLIZAMIENTOS EN ROCA</b>								
<b>Caídas y Rupturas</b>								
Caída de Roca	Rebote, rodamiento o caída libre.	Alta o muy alta	X	X	X	X	Extremadamente rápido	Superficial
Deslizamiento de Roca	Deslizamiento traslacional sobre superficie de cizalla	Alta	X	X	X	X	Rápido a extremadamente rápido	Superficial
Avalancha de Roca	Flujo de fragmentos de roca	Muy alta	X	X	X	X	Extremadamente Rápido	Profundo
<b>Deslizamientos Coherentes</b>								
Desplome de Roca	Deslizamiento sobre una superficie de cizalla con una componente rotacional	Escasa a moderada	?	X	X	X	Lento a rápido	Profundo
Deslizamiento de Bloque de Roca	Deslizamiento traslacional sobre una superficie de cizalla	Escasa a moderada	?	X	X	X	Lento a rápido	Profundo
<b>DESGLIZAMIENTOS EN SUELO</b>								
<b>Caídas y Rupturas</b>								
Caídas de Suelo	Rebote, rodamiento o caída libre.	Alta o muy alta	X	X	X	X	Extremadamente rápido	Superficial
Rupturas de Suelo	Deslizamiento traslacional sobre superficie de cizalla o sobre una zona debilitada.	Alta	X	X	X	X	Moderada a rápido	Superficial
Avalanchas de Suelo	Deslizamiento traslacional con flujo	Muy alta	X	X	X	X	Muy rápido a extremadamente rápido	Superficial
<b>Deslizamientos Coherentes</b>								
Desplomes de Suelo	Deslizamiento sobre una superficie de cizalla con una componente rotacional	Escasa a moderada	?	X	X	X	Lento a rápido	Profundo
Deslizamiento de Bloque de Suelo	Deslizamiento traslacional sobre una superficie de cizalla	Escasa a moderada	?	?	X	X	Lento a muy rápido	Profundo
Flujos de Tierra Lentos	Deslizamiento traslacional sobre una superficie de cizalla con un flujo interno mínimo	Escasa			X	X	Muy lento a moderado	Generalmente superficial.
<b>Desprendimientos Laterales y Flujos</b>								
Desprendimientos Laterales de Suelo	Traslación sobre una zona de materiales blandos.	Generalmente Moderada			X	X	Muy rápido	Variable

Flujos de Suelo Rápido	Flujos	Muy alta	?	?	?	X	Muy rápido a extremadamente rápido	Superficial.
Deslizamientos Subacuosos	Complejo. Desprendimiento lateral y/o flujos. Ocasionalmente desplomes y deslizamientos de desplomes.	Generalmente Alta			X	X	Generalmente rápido a extremadamente rápido	Variable

Traducido de Keefer (1984) según Varnes (1978).

1. Ruptura interna: "Escasa" significa que el movimiento de masa consiste de uno o unos pocos bloques coherentes; "Moderada", varios bloques coherentes; "Alta" significa numerosos pequeños bloques, granos individuales o fragmentos de roca; "Muy Alta" significa completa desagregación en granos finos o pequeños fragmentos de roca.

2. Contenido de Humedad: D significa Seco; U significa Mojado pero no saturado; PS significa Parcialmente saturado; S significa Saturado.

3. Velocidad: "Extremadamente Lento" significa < 0.6 m/año; "Muy Lento" significa entre 0.6 y 1.5 m/año; "Lento" significa entre 1.5 m/año y 1.5 m/mes; "Moderada" significa entre 1.5 m/mes y 1.5 m/día; "Rápido" significa entre 1.5 m/día y 0.3 m/minuto; "Muy rápido" significa entre 0.3 m/minuto y 3 m/seg; "Extremadamente rápido" significa > 3 m/seg.

4. Profundidad: "Superficial" significa espesor < 3 metros; "Profundo" significa espesor > 3 metros.

### 3.6 FACTORES QUE CONTROLAN LA ESTABILIDAD.

La distribución espacial y temporal de los movimientos de masa está condicionada por la presencia de diversos factores, propios de la ladera y externos a ella.

Suárez (1998), agrupa estos factores en tres grupos:

- Condiciones originales del talud, que determinan la susceptibilidad al deterioro.
- Factores de deterioro, que producen una modificación lenta de las condiciones originales del talud y son capaces de producir movimientos leves.
- Factores detonantes, los que activan el movimiento; pueden traslaparse con los factores de deterioro.

Otros autores como Mora y Vahrson (1993), Soeters and Van Westen (1996) distinguen solo dos tipos de factores, los de susceptibilidad y los de disparo. Mora y Vahrson

(1993) los definen así:

- Factores de susceptibilidad: aquellos que intrínsecamente forman parte de las propiedades y comportamiento del medio, es decir, que constituyen los elementos pasivos. Tal es el caso del relieve del terreno, su constitución geológica y las condiciones naturales de humedad.
- Factores de disparo: los que inducen desde el exterior, hacia un comportamiento dinámico activo que, a partir de las condiciones iniciales generarán, con mayor o menor intensidad, los fenómenos de movilización. Se trata de la intensidad de los sismos y lluvias (Mora y Vahrson, 1993).

### **3.6.1 Factores de susceptibilidad.**

- Topografía: son las características morfológicas de la superficie terrestre. En el proceso de los movimientos de masa, interesan parámetros como la pendiente, altura, amplitud de la ladera, éstas nos dan una idea del grado de equilibrio de los materiales que la componen. Por ejemplo, se espera que ocurran movimientos de masa en pendiente moderadas a muy fuertes (Medina, 1991).
- Constitución geológica: tipo de material que se encuentra en la ladera, sus propiedades químicas y físicas, resistencia al esfuerzo y a su modo de evolución en cada ambiente natural; incluye las estructuras de los materiales del sitio, fracturas, fallas, pliegues, planos de estratificación y foliación y cómo estos pueden favorecer o no los procesos de inestabilidad y, por último, la capacidad de drenaje de los materiales y el grado de meteorización de los materiales (Medina, 1991; Mora y Vahrson, 1993).
- Contenido de humedad: tiene la capacidad de acelerar la meteorización y disminuir la resistencia mecánica de los suelos. Deben estudiarse la intensidad, frecuencia y magnitud de precipitaciones; la acción de la escorrentía superficial, subterránea y la infiltración; en general, todos los procesos de carácter climático e hidrológico

presentes en la ladera, que afectan su contenido de humedad (Medina, 1991; Mora y Vahrson, 1993).

Otro parámetro considerado es la vegetación, aunque su influencia en los movimientos de masa es objeto de discusiones y, en el trópico húmedo, apenas objeto inicial de investigación (Restrepo y Velásquez, 1997). Para Suárez (1998) el tipo de vegetación, tanto en el talud como en el área por encima de él, es un parámetro importante para la estabilidad. La vegetación cumple dos funciones principales: en primer lugar, tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y, en segundo, da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces. La deforestación afecta la estabilidad en varias formas: disminuye las tensiones capilares de la humedad superficial, elimina el factor de refuerzo de las raíces y facilita la infiltración masiva de agua. Sin embargo, esta parece ser una aseveración simplista, pues no considera el papel que la masa vegetal, aérea y subaérea, puede cumplir en la preparación de la inestabilización de una ladera.

### **3.6.2 Factores de disparo.**

Los factores de disparo son variables decisivas en la activación de los movimientos de masa, desencadenando movimientos, aún en una ladera en equilibrio. Aunque se tratarán con mayor detalle la vibración sísmica y las lluvias como disparadores de movimientos de masa, se dará un breve repaso por algunos otros mecanismos de disparo, como son la actividad antrópica y volcánica:

- **Actividad volcánica:** los movimientos de masa pueden estar relacionados con la erupción o con sismos previos a ésta en un volcán. En las primeras etapas de la erupción se depositan flujos piroclásticos, los cuales forman nuevos depósitos o amplían algunos existentes, produciéndose movimientos de material en las faldas del volcán.

En los volcanes nevados las altas temperaturas producidas por una erupción funden los depósitos de hielo y nieve, éstos se mezclan con los materiales piroclásticos

preciamente expulsados, de tal manera que generan avalanchas (en sentido estricto), y flujos de lodo que pueden recorrer grandes distancias, como en el caso del Nevado del Ruiz en 1985 (entre la numerosa literatura al respecto, ver, IGAC, 1993).

- Actividad antrópica: el hombre ha sido un permanente modificador de los elementos que conforman la superficie de la tierra y el efecto sobre los taludes ha sido el de agente desestabilizador.

La acción del hombre sobre las laderas puede clasificarse en cuatro tipos:

- Cambios en la topografía y cargas del talud. Ocasionados por la extracción de suelos y rocas para la construcción; aumento del peso de la ladera debido a los procesos de urbanización o rellenos ineficientes y por los efectos de la actividad subterránea, como la minería.
- Cambios en las condiciones de humedad. Debido a la alteración de los drenajes naturales por la construcción de zanjas y canales; alteración de los drenajes subterráneos y la presencia de infiltración y aumento de aguas superficiales por la deficiente instalación de acueductos y alcantarillados.
- Vibraciones. En la construcción de carreteras e infraestructura; explosiones, transportes y movimiento de maquinaria pesada, que inducen vibración en la ladera, desestabilizándola.
- Cambios en la cobertura vegetal. Se manifiesta en los procesos de deforestación; prácticas agrícolas y ganaderas inadecuadas y en modificaciones en el uso del suelo que resultan perjudiciales para la ladera (Medina, 1991; Suárez, 1998).

### **3.7 MOVIMIENTOS DE MASA DISPARADOS POR LLUVIAS.**

Los movimientos de masa cobran importancia a partir de su papel en la historia de fenómenos naturales de consecuencias desastrosas; han provocado numerosas

pérdidas materiales y de vidas humanas. En Colombia la base de datos de DESINVENTAR, para la década de 1990 reporta 1524 movimientos de masa, los cuales han afectado 9986 viviendas, destruído 4711 y han causado la muerte a 1000 personas.

Diversos factores de tipo hidrometeorológico afectan la estabilidad de las laderas. Cuando la precipitación cae sobre una ladera un porcentaje de ella es interceptado por la vegetación, otro se filtra en el suelo o se almacena en las depresiones para luego infiltrarse; el proceso de infiltración continúa aún después que cesa la lluvia y en algún momento pueden crearse condiciones críticas, ya que la humedad del suelo y la posición del nivel freático han aumentado, aumentando la presión de poros, disminuyendo los esfuerzos efectivos y, por consiguiente, la resistencia al esfuerzo cortante. Entonces se pueden alcanzar los umbrales de inestabilidad que disparan el movimiento de una parte o toda la ladera (González y Millán, 1998).

### **3.7.1 Parámetros hidrometeorológicos.**

- Precipitación: la precipitación se define como el volumen o altura de agua que se cae en la superficie terrestre proveniente de la atmósfera en un periodo de tiempo. Incluye todos los hidrometeoros tales como lluvia, nieve, granizo y aguanieve. La precipitación tiene influencia directa en la infiltración y en el régimen de agua subterránea y, a su vez, afecta la estabilidad. La medición de la precipitación consiste en la determinación de la cantidad de agua precipitada en un tiempo dado, sobre una superficie dada. Se determina el espesor en milímetros de la lámina de agua que queda en el sitio en ausencia de infiltración, esorrentía y condensación (Jiménez, 1986; Wisler y Brater, 1969).

El estudio de las precipitaciones para analizar su efecto sobre las laderas se realiza desde varios punto de vista:

- ✓ Lluvias promedio y lluvias máximas anuales. Con base en datos pluviométricos observados en una red de estaciones se calcula el espesor de la lámina de agua promedio y anual que cae sobre un sitio, para lo cual se requieren datos de periodos largos de observación. Se espera que en las áreas de mayor precipitación, se presenten más movimientos de masa.
- ✓ régimen de lluvias. Cada región posee un sistema de lluvias que se repite aproximadamente cada año y permite identificar los periodos de alta y baja precipitación. Se obtiene del análisis de los promedios mensuales de precipitación durante varios años de observación.
- ✓ Lluvias acumuladas. Registro de lluvias durante varios días o con pocos días de diferencia, por lo que ocurre acumulación de agua, disminuyen la tasa de infiltración y aumenta la escorrentía. Las lluvias acumuladas se calculan en función de la intensidad y duración de la precipitación.

Larsen y Simon (1993), desarrollaron una relación empírica, para la lluvia acumulada en ambientes tropicales, definida por la expresión:  $R = 91.46D^{0.18}$ , donde  $R$  es la lluvia acumulada en mm; y  $D$ , es la duración de la lluvia en horas.

- ✓ intensidad de la lluvia. Definida como la relación entre la altura de la lluvia observada,  $h$  y la duración de la lluvia,  $t$ :  $I = \frac{h}{t}$ . La intensidad es uno de los parámetros más usados para el análisis de estabilidad de laderas. Se han establecido relaciones entre la intensidad y duración y los movimientos de masa en diversos lugares del mundo.

Caine (1980), en Larsen and Simon (1993), desarrolló una relación umbral, usando los datos de 73 tormentas en todo el mundo, definida por la expresión:  $I = 14.82D^{-0.39}$ . Larsen and Simon (1993), usando datos de 256 tormentas para el

trópico húmedo, desarrollaron una relación umbral, para ambientes tropicales, según la expresión:  $I = 91.46D^{0.82}$  (Jiménez, 1986; Suárez, 1998; Larsen and Simon, 1998).

- Humedad. Agua retenida en el suelo mediante la atracción molecular. El contenido de humedad hace variar la permeabilidad y la capacidad de infiltración de una ladera. Está controlada por tipo de suelo, clima, factores del talud y cobertura vegetal (Suárez, 1998; Wisler y Brater, 1969).
- Infiltración. Proceso mediante el cual el agua penetra los estratos del suelo hasta llegar al nivel hidrostático. Una parte de esta agua contribuye a aumentar la humedad del suelo y el resto a recargar acuíferos; está controlada por diversos factores como, tipo, intensidad, ritmo y duración de la precipitación, vegetación, pendiente, estructura y permeabilidad de las rocas y suelos (Suárez, 1998).
- Nivel freático. Corresponde a la línea de presión de poros igual a cero, equivalente a que la presión neta en el sitio es igual a la presión atmosférica. Sigue una línea aproximadamente paralela a la superficie del terreno. El agua subsuperficial se divide en presión de poros positiva, para presiones mayores que la presión atmosférica y negativa para presiones menores que la presión atmosférica. La línea divisoria corresponde al nivel freático. Desempeña un papel fundamental en la estabilidad de laderas y puede ascender o descender bruscamente durante un periodo de lluvias fuertes (Suárez, 1998).
- Presión de poros. Presión interna del agua de saturación que depende de la localización del nivel freático, y características geológicas del sitio, entre otros factores. Los cambios en la presión de poros dependen de los regímenes de lluvias e infiltración; implican una disminución en la resistencia a los esfuerzos cortantes y, por lo tanto, de la estabilidad de la ladera (Suárez, 1998).

El equilibrio de los factores mencionados anteriormente en la ladera, en un proceso conocido como "Ciclo Hidrológico del Talud", definen en buen grado la estabilidad de una ladera. El componente humedad condiciona la susceptibilidad de la ladera por un lado y, por otro, en eventos fuertes (como lluvias torrenciales o prolongadas),

desencadena movimientos de masa. Se requiere un conocimiento detallado de todas estas variables para poder correlacionar las precipitaciones con la distribución de movimientos de masa. Los datos de redes hidrometeorológicas deben extenderse por largos periodos de tiempo para poder modelar el ciclo hidrológico.

Durante lluvias fuertes o prolongadas un movimiento de masa se puede disparar por saturación de la masa de suelo o por aumento de la presión de poros. En el primer caso, debido a la eliminación de la succión del suelo, cuando se satura el frente húmedo de infiltración. En el segundo, cuando ha transcurrido un tiempo tal que permite que el frente húmedo dentro del suelo llegue hasta el nivel freático, alterándolo, de tal manera que se disminuya la resistencia al corte de la masa de suelo (Suárez, 1998).

### **3.8 MOVIMIENTOS DE MASA DISPARADOS POR SISMOS.**

Una de las principales amenazas de segundo orden o inducidas después de un terremoto es la activación de movimientos de masa en la región epicentral. Keefer (1984) señala que los terremotos han sido reconocidos como una de las mayores causas de movimientos de masa. Han sido documentados desde los años 373 a 372 a.C., y han causado innumerables muertos y billones de dólares en pérdidas económicas durante el S XX, entre los muchos casos documentados se mencionan los siguientes:

En 1949 en Khait (Rusia) un sismo de magnitud 7.6 Ms, localizado entre 20 y 28 km de profundidad (Keefer, 1984), disparó un movimiento de rocas que mató 20 000 personas (Suárez, 1998). En 1970 un sismo de 7.9 Mw, localizado 130 km de la costa de Perú, entre 35 y 43 km de profundidad (Keefer, 1984), disparó una avalancha en los montes Nevados Huascarán en la Cordillera Blanca de los Andes Peruanos, cuyo volumen se estimó entre 50 y 100 millones de m<sup>3</sup>, con una longitud de 16 km, devastó un área de 22,5 km<sup>2</sup>, mató a más de 18 000 personas (Hansen y Franks, 1991), y sepultó los pueblos de Yungai y Ranrahira; originó, además, movimientos de masa en un área de aproximadamente 30 000 km<sup>2</sup> (Suárez, 1998). En 1987 un sismo en El Napo

(Ecuador), de 7.1 Mw, a una profundidad de 5 km (Rodríguez et al., 1999), disparó deslizamientos de lodo y roca que cubrieron un área de 2000 km<sup>2</sup> y destruyeron 70 km de un oleoducto y varias carreteras (Suárez, 1998). Uno de los casos más recientes se documentó después del sismo en San Salvador el 13 de enero del 2001, originado en la zona de subducción a 45 km de la costa Pacífica, con una magnitud de 7.7 Mw, a una profundidad de 90 km; disparó un gran número de deslizamientos a lo largo de la Cordillera del Bálsamo y fenómenos de licuación en el área del Bajo Lempa, afectando la infraestructura de la región (Camacho et al., 2001).

En Colombia varios eventos sísmicos se han destacado por los importantes movimientos de masa que han activado. El sismo del Huila en noviembre de 1827 produjo un deslizamiento que represó el río Suaza durante 55 días (Ramírez, 1975). El sismo de enero de 1906 en Tumaco ocasionó deslizamientos submarinos que rompieron en unos 17 sitios el cable oceánico entre Panamá, Buenaventura y Esmeraldas, grietas y hundimientos en la zona costera entre Punta Manglares y Tumaco, además de licuación de arenas y tsunami (Meyer, 1983). El sismo de diciembre de 1979 en la misma región generó soliflucción, licuación del suelo, deslizamientos en la Cordillera Occidental y asentamientos y grietas en las bajas planicies litorales del suroeste colombiano (Meyer, 1983). El sismo de 1991 en el Delta del Río San Juan indujo licuación en una extensión de 60 km, entre Punta España y Boca Orpua (OSSO, 1991). El sismo de 1992 en el Atrato Medio ocasionó licuación a lo largo de 150 km desde el norte de Puerto Arquía hasta el Noroccidente de Bajirá y movimientos de masa en las estribaciones de la Cordillera Occidental y de la Serranía de Abibe (OSSO, 1993). El sismo de 1994 en Páez (Cauca), produjo innumerables movimientos de masa que generaron avenidas torrenciales en el río Páez y sus tributarios que afectaron un área de 250 km<sup>2</sup> (Rodríguez et al., 1999), así como centenares de víctimas fatales. El sismo de 1995 en Tauramena disparó movimientos de masa en una área de 4550 km<sup>2</sup> (Rodríguez et al., 1999). Finalmente, el sismo de 1999 en el Eje Cafetero disparó deslizamientos en un área de 1402 km<sup>2</sup> a una distancia máxima del epicentro de 30 km. En el Anexo D: Reportes de efectos geológicos inducidos por sismos, se citan otros eventos que ha ocasionado movimientos de masa en Colombia.

### 3.8.1 Parámetros sísmicos.

Diversos autores han estudiado los movimientos de masa inducidos por sismos, intentando establecer relaciones entre los parámetros sísmicos y la distribución de los movimientos de masa disparados, usando para esto bases de datos de terremotos a los cuales se les ha documentado los procesos de inestabilidad generados. Se han realizado análisis en diversas partes del mundo por autores como Keefer (1984), Wilson and Keefer (1989), Brabb and Harrod (1989), Rodríguez et al., (1999), Sitar and Khazai (2001) y Bommer and Rodríguez (2002). Otros autores han estudiado las relaciones en regiones específicas, como Yasuda and Sugitani (1988), en Japón, Ishihara and Nakamura (1987), en Ecuador, Mora y Mora (1992), en Costa Rica, Papadopoulos and Plessa (2000), en Grecia y Prestininzi and Romeo (2000), en Italia, entre otros.

El parámetro sísmico más usado en éstas relaciones es la magnitud. La magnitud representa el tamaño del terremoto y depende de la energía liberada en el proceso de ruptura, es un valor único independiente del sitio de observación y es calculada con base en la amplitud de la onda sísmica (Bolt, 1981; Sauter, 1989). Se han encontrado las siguientes relaciones:

- Magnitud del terremoto más pequeño capaz de producir movimientos de masa.

Keefer (1984), Rodríguez et al., (1999) y Sitar and Khazai (2001), coinciden en que todos los tipos de movimientos de masa pueden ser disparados por causas no sísmicas, y que si la falla de la ladera es inminente antes de un terremoto, un movimiento de masa puede ser iniciado con una vibración débil. Encontraron que las caídas, deslizamientos de rocas y rupturas en suelos son disparados con el menor umbral de magnitud (4.0 MI) y las avalanchas con el mayor umbral de magnitud (6.0 MI) (Keefer, 1984; Rodríguez et al., 1999; Papadopoulos and Plessa, 2000). La menor magnitud reportada fue para un evento superficial de  $M = 2.9$  en 1984 (Feng, 1985, en Rodríguez et al., 1999).

- Magnitud y área afectada por movimientos de masa.

Los diferentes relaciones propuestas (Li, 1979; Keefer, 1984; Wilson and Keefer, 1989; Keefer, 1994; Rodríguez et al., (1999), entre otras, muestran que existe una fuerte correlación entre el área afectada por movimientos de masa y la magnitud del sismo. Las áreas afectadas son irregulares en forma y asimétricas con respecto al epicentro y zona de ruptura, ésto se debe a factores como la influencia de la geología (Li 1979 en Hansen and Franks, 1991), la profundidad focal de sismo, efecto de campo cercano, dirección de la ruptura, efecto topográfico y atenuación de la vibración sísmica (Li, 1979; Keefer, 1984; Rodríguez et al., 1999; Bommer and Rodríguez, 2002), así como las condiciones de susceptibilidad previas al sismo (Bommer and Rodríguez, 2002) y, en general, a la influencia de las condiciones ambientales donde ocurre el sismo. Keefer (1994) aclara que más del 95 % de los movimientos de masa producidos por un terremoto están concentrados en menos de la mitad del área total afectada.

- Magnitud y máxima distancia al epicentro de los movimientos de masa.

Al igual que el área afectada por movimientos de masa, la máxima distancia al epicentro muestra una significativa relación con la magnitud del sismo (Tamura, 1978; Ishara and Nakamura, 1987; Yasuda and Sugitani, 1988; Keefer, 1984, Mora and Mora, 1992; Rodríguez et al., 1999), entre otros. Yasuda and Sugitani (1988, en Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1993), encontraron que la máxima distancia al epicentro es mayor para "deslizamientos superficiales" que para "deslizamientos profundos", bajo la acción de un sismo de igual magnitud. Keefer (1984) y Rodríguez et al., (1999), sugieren que las rupturas y caídas pueden ser disparadas por vibraciones más débiles y que los desprendimientos laterales y flujos por vibraciones más fuertes; los terremotos con profundidades focales mayores o iguales a 30 km generan rupturas y caídas a distancias al epicentro mayores o iguales que los generados por eventos más superficiales de igual magnitud. Diversos autores, comparando relaciones encontradas para ambiente secos y húmedos para sismos de igual magnitud, sugieren que las mayores distancias al epicentro se presentan en

ambientes húmedos (Keefer, 1984; Yasuda and Sugitani, 1988; JMS, 1993; Rodríguez et al., 1999; Sitar and Khazai, 2001; Bommer and Rodríguez, 2002).

- Magnitud y volumen deslizado.

Existe una fuerte correlación entre la magnitud del evento sísmico y el volumen de material desplazado. Keefer and Wilson (1989) y Keefer (1994), propusieron correlaciones entre magnitud y volumen máximo que proveen una estimación de la contribución de los movimientos de masa inducidos por sismos a la erosión en una región y a la evolución del paisaje. Sin embargo, varían de región a región, en función del ambiente geológico y la susceptibilidad previa existente antes del sismo y, por lo tanto, deben usarse con precaución (Keefer and Wilson, 1989; Keefer, 1994).

- Movimientos de masa y mínima intensidad capaz de producirlos.

La intensidad sísmica representa la fuerza del movimiento sísmico, en función del grado de vibración sentida y de los efectos que causa en un área específica. No es una variable única sino que varía de acuerdo con el sitio de observación; generalmente es mayor en el área epicentral y disminuye con la distancia (Bolt, 1981; Sauter, 1989). Algunos autores compararon la intensidad sísmica con los tipos de movimientos de masa comunes en cada valor de intensidad.

Keefer (1984) y Rodríguez et al., (1999), concluyen que la intensidad mínima a la que se generan rupturas y caídas es VI; la intensidad mínima para deslizamientos coherentes, desprendimientos laterales y flujos es VII y la intensidad más baja reportada para cualquier movimiento de masa ha sido IV. Un estudio realizado en Italia, usando los datos del Catálogo Nacional de Pérdidas de Suelo Inducidos por Terremotos Fuertes (CEDIT), con datos del último milenio, concluyó que la más baja intensidad a la cual ocurren movimientos de masa y agrietamientos es V y que la mayor cantidad de reportes se encuentran entre las intensidades VIII y IX. Este estudio concluye que los agrietamientos se producen a las mayores distancias con las menores intensidades y pueden considerarse como el límite inferior al cual se producirían movimientos de masa, porque su evidencia empírica indica que éstos se disparan a distancias menores para

un mismo valor de intensidad (Romeo and Prestininzi, 2000). La Escala Macrosísmica Europea, EMS - 98, establece que los movimientos de detritos (escombros) se encuentran a partir de la intensidad VII; pequeños movimientos de masa a partir de la intensidad V; caídas de rocas desde la intensidad VI, siendo comunes en la intensidad VIII, y, deslizamientos y caídas masivas de rocas desde la intensidad VII (ESC, 1998).

Las relaciones que usan la intensidad sísmica no son confiables, debido a que no existe información suficiente para correlacionarla con los movimientos de masa disparados (Rodríguez et al., 1999), además de las incertidumbres propias de la estimación de la intensidad sísmica, por lo que su uso no es recomendable, si se dispone de mejores fuentes de información.

- Aceleración sísmica.

La aceleración sísmica es una medida instrumental de la intensidad del terremoto, expresada en porcentaje de la gravedad terrestre, registrada en acelerógrafos, cuyos registros muestran la aceleración del terreno en función del tiempo (Bolt, 1981; Sauter, 1989). Todavía no se han propuesto relaciones directas entre la aceleración y los movimientos de masa disparados por sismos, pero Sitar and Khazai (2001), encontraron que son comunes en zonas con aceleración vertical mayor a 0.2 g y aceleración horizontal mayor a 0.15 g. OSSO (1995), encontró que importantes movimientos de masa disparados por sismos en Colombia, ocurrieron en zonas con aceleraciones esperables de 0.25 g, aunque no provee información sobre las aceleraciones reales ocurridas.

Comúnmente se ha utilizado la Intensidad de Arias para correlacionar los movimientos de masa disparados por sismos. La intensidad de Arias está definida como la suma de todos los valores cuadrados de la aceleración de un acelerógrama, incorporando toda la información de amplitud, frecuencia y duración en un único valor, el cual es proporcional a la energía disipada en el sitio de registro. Está definida por la expresión:

$Ia = \pi / 2g \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt$ , donde  $a(t)$  es una componente de la aceleración de un acelerógrama,  $T_d$  es la duración total en segundos,  $t$  es el tiempo del movimiento fuerte en segundos y  $g$  la aceleración de la gravedad (Harp y Wilson, 1995).

Wilson and Keefer (1985) y Wilson and Keefer (1989), concluyeron que los umbrales en términos de intensidad de Arias, son más bajos para caídas y rupturas ( $Ia = 0.15$  m/s) y más altos para desprendimientos laterales y flujos (0.54 m/s). El uso de la Intensidad de Arias está restringida a un análisis previo de las condiciones geográficas de la zona de estudio y de la calidad de la información sísmica disponible (Harp and Wilson, 1995).

Los umbrales discutidos son una guía con base en catálogos regionales, que no tienen en cuenta características específicas y, por lo tanto, es muy probable que, en circunstancias especiales, un evento sísmico genere más ó menos movimientos de masa que los esperados, o que estos mismos se encuentren a distancias no esperadas. Además, están sujetos a incertidumbres debido a la condiciones geológicas locales, la susceptibilidad de la región y los parámetros del sismo. Documentar los movimientos de masa disparados por sismos de manera eficiente suministraría la información necesaria para futuros estudios que perfeccionen las relaciones anteriores. Esto es aún más necesario en ambientes tropicales de montaña, donde la ocurrencia de sismos es frecuente, como es el caso de Colombia.

- Análisis sísmico de laderas.

Predecir con precisión cuales laderas se moverán y el grado de severidad del movimiento que se producirá bajo la influencia de determinada vibración sísmica es difícil. El comportamiento sísmico de una ladera puede evaluarse desde varios caminos y puede ser usado para estudios de amenaza regional o para estudios de movimientos de masa disparados por un evento en particular. Las tres aproximaciones básicas para analizar el comportamiento sísmico de una ladera son:

- ✓ Aproximación estadística, en la cual la amenaza es evaluada a través de una correlación de los movimientos de masa ocurridos en el pasado con varios factores de influencia (Smiles and Keefer, 1999);
- ✓ Análisis pseudo-estático, que busca por medio de un análisis de factor de seguridad, identificar la aceleración crítica y, después, la máxima aceleración del terreno bajo la cual ocurriría el desplazamiento (Harp and Wilson, 1995; Smiles and Keefer, 1999);
- ✓ Métodos de desplazamientos permanentes, los cuales proveen información que considera el desempeño actual de la ladera, a través del cálculo de índices de desplazamiento actual o relativo, con base en caracterizaciones comunmente aceptadas de la severidad de la vibración sísmica (Jibson, 1993; Smiles and Keefer, 1999).
- ✓ Método de Newmark. Es un método de análisis intermedio, entre el análisis pseudo-estático y las técnicas de desplazamientos permanentes que provee una predicción cuantitativa de los desplazamientos inerciales que resultarían de un nivel dado de vibración sísmica (Harp and Wilson, 1995; Smiles and Keefer, 1999).

Debe seleccionarse con cuidado el modelo a usar, con base en la información sísmica disponible y, en general, en el conocimiento de las características geotécnicas locales de la región de estudio.

Para el estudio de los movimientos de masa inducidos por sismos, es necesario tener un conocimiento de las causas no sísmicas, que podrían afectar las laderas en regiones sísmicas. Las laderas son un sistema dinámico y complejo, donde las diferentes variables se encuentran en equilibrio; la vibración sísmica es tan solo una de las variables que pueden afectarlas, desencadenando el movimiento del material.

### **3.9 MODELAMIENTO DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS DE MASA.**

La zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza es una herramienta útil y es usada en casi todos los lugares del mundo, donde existe propensión a los movimientos de masa. Se han elaborado diversas técnicas para desarrollar la zonificación, teniendo en cuenta factores como la escala de trabajo, la relación costo-beneficio, el objeto del estudio, información disponible, tiempo requerido, precisión de los resultados, capacidad de análisis, experiencia de los investigadores, etc.

La zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza requiere un detallado inventario de los procesos de inestabilidad; el estudio de estos procesos en relación con su marco ambiental; el análisis de los factores de susceptibilidad y disparo; la representación espacial de los factores y de los procesos de inestabilidad (Mora y Vahrson, 1993; Soeters and Van Westen, 1996).

Nuevas herramientas como los Sistemas de Información Geográfica y el uso de sensores remotos, agilizan cada vez el tratamiento de la información, permitiendo rápidamente la actualización de la misma. Estudios de susceptibilidad y/o amenaza multitemporal permiten predecir con más confiabilidad las áreas, observando el desarrollo de la inestabilidad en el tiempo y más rapidez en la captura de variables involucradas en los análisis. Las técnicas de zonificación están en desarrollo constante, y cada día surgen nuevos métodos, más precisos y confiables, que pueden ser usados en diversas regiones a un costo razonable.

#### **3.9.1 Definición de términos.**

Los términos usados en este capítulo forman parte de las definiciones propuestas por Varnes (1984), adaptados con base en Soeters and Van Westen (1996):

- Susceptibilidad. Facilidad con que un fenómeno puede ocurrir con base en las condiciones locales del terreno.
- Amenaza. Probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, en un periodo específico de tiempo, en una área determinada.
- Zonificación. División de un territorio en zonas homogéneas según el grado de susceptibilidad y/o amenaza para cada una.
- Riesgo. Pérdidas esperables en vidas humanas y económicas por daños a propiedades e infraestructura o por interrupción de actividades, debidas a la ocurrencia de una amenaza.

### **3.9.2 Escala de trabajo.**

Está determinada por los requerimientos del usuario y la aplicación que se le pretende dar a la investigación; por una relación costo – beneficio razonable que garantice la aplicabilidad práctica; por el tipo específico de problema; por la calidad y cantidad de información; por los recursos financieros; por la disponibilidad de tiempo y por la experiencia de los investigadores, entre otras (Millan, 1998).

Para los estudios de susceptibilidad y/o amenaza se han establecido (Soeters and Van Westen, 1996; Millan, 1998), las siguientes escalas de trabajo:

- ☞ Escala Nacional (>1:1 000 000). Inventario general de las áreas problemáticas para todo un país. El nivel de detalle es muy bajo, porque los análisis son hechos sobre reglas generales.
- ☞ Escala Regional (1:100 000 a 1: 500 000). Para desarrollos regionales. Las áreas son de aproximadamente 1000 km<sup>2</sup> o más. El nivel de detalle es bajo, el mapa sólo indica áreas en las cuales los movimientos de masa podrían afectar desarrollos regionales y se supone que la susceptibilidad y/o amenaza es uniforme en toda la

unidad de zonificación.

- ☞ Escala Intermedia (1:25 000 a 1:50 000). Para la determinación de zonas de susceptibilidad y/o amenaza donde existen infraestructuras, caminos, y procesos de urbanización. El área cubre unos pocos cientos de kilómetros cuadrados. Se tiene un nivel de detalle medio, de tal manera que se puede identificar niveles de susceptibilidad y/o amenaza entre segmentos de ladera de acuerdo con sus características ambientales.
- ☞ Escala grande (1:5000 a 1: 15 000). El tamaño del área es de pocas decenas de kilómetros cuadrados. El nivel de detalle es alto y los resultados se presentan como clases de susceptibilidad y/o amenaza, que indican la propensión o la probabilidad del fenómeno en cada unidad.

La determinación de la escala es fundamental en cualquier estudio de susceptibilidad y/o amenaza y es una de las primeras preguntas que deben contestarse al iniciar una zonificación, teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente.

### **3.9.3 Datos de entrada.**

Los fenómenos de inestabilidad de laderas están relacionados con una gran variedad de factores del medio físico e interacciones con el hombre. Por lo tanto, la evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa requiere el conocimiento de estos factores, lo que conlleva a que estos estudios sean proyectos interdisciplinarios. La selección de los datos de entrada es de gran importancia y depende, entre otras cosas, de la escala de trabajo, que a su vez define la cantidad de datos y la técnica de análisis por utilizar.

Los datos de entrada pueden ser divididos en cinco grupos básicos: geomorfología, topografía, geología, uso del suelo e hidrología. Cada grupo está subdividido en subtemas, que pueden ser representados cartográficamente. Por supuesto, los datos

requeridos para un análisis de susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa, pueden variar de acuerdo con las características de las diferentes condiciones medio ambientales. La Tabla 2, muestra una lista de las diferentes variables, métodos de recolección de la información y escalas de trabajo recomendadas (Soeters and Van Westen, 1996)

**Tabla 2.** Datos de entrada para un análisis de susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa.

Datos de Entrada	Tabla de datos Relacionales	Técnica Aplicada <sup>2</sup>	Escala de Trabajo <sup>1</sup>		
			Regional	Media	Grande
Geomorfología					
1. Unidades de terreno	Unidades de terreno	ISS + Reconocimiento	3	3	3
2. Unidades Geomorfológicas	Descripción geomorfológica	FAF + TC	2	3	3
3. Movimientos de masa (recientes)	Tipo, grado de actividad, profundidad, dimensiones, etc.	FAF + TC	1	3	3
4. Movimientos de masa (antiguos)	Tipo, grado de actividad, profundidad, dimensiones, etc.	FAF + TC + archivos históricos	1	3	3
Topografía					
5. Modelo digital de terreno. (MDT).	Diferencias de altura	SIG del mapa topográfico	2	3	3
6. Pendientes	Intervalos de ángulos	SIG del MDT	2	3	3
7. Dirección de laderas	Intervalos de dirección de laderas	SIG del MDT	2	3	3
8. Longitud de las laderas	Intervalos de longitud de laderas	SIG del MDT	2	3	3
9. Concavidades y	Concavidad /	SIG del MDT	1	1	1

convexidades	Convexidad				
Geología					
10. Litología	Litología, resistencia del material, esparcimiento, discontinuidad	Mapa existente + FAF + TC + pruebas de laboratorio	2	3	3
11. Materiales superficiales	Tipo de material, profundidad, clasificación, distribución granulométrica, coeficientes.	Modelación del mapa litológico + mapa geomorfológico + mapa de pendientes + descripciones de campo + pruebas de laboratorio	1	2	3
12. Geología Estructural	Tipo de falla, longitud, buzamiento, orientación, etc.	ISS + FAF + TC	3	3	3
13. Aceleración Sísmica	Máxima aceleración sísmica	Datos sísmicos + datos de ingeniería geológica	3	3	3
Usos del Suelo					
14. Infraestructura (reciente)	Tipos de vías, líneas vitales, urbanización, etc.	FAF + Mapa topográfico + TC + ISS	3	3	3
15. Infraestructura (antigua)	Tipos de vías, líneas vitales, urbanización, etc.	FAF + Mapa Topográfico	3	3	3
16. Usos del suelo (reciente)	Tipo de usos del suelo, densidad de vegetación, etc.	FAF + ISS + TC	2	3	3
17. Usos del suelo ( antiguo)	Tipos de usos del suelo	FAF + ISS	2	3	3

Hidrología					
18. Drenajes	Tipo, orden, longitud.	FAF + Mapas topográficos	3	3	3
19. Area de drenaje	Orden, tamaño	FAF + Mapas topográficos	2	3	3
20. Precipitación	Registros históricos de precipitación	Estaciones meteorológicas	2	3	3
21. Temperatura	Registros históricos de temperatura	Estaciones meteorológicas	2	3	3
22. Evapotranspiración	Registros históricos de evapotranspiración	Estaciones meteorológicas	2	3	3
23. Nivel Freático	Registros históricos de nivel freático	Medidas de campo + modelos hidrogeológicos	1	1	2

(Adaptado de Soeters and Van Westen, 1996).

**Notas:** 1. Las últimas tres columnas indican la posibilidad de obtención de datos para las tres escalas de trabajo: 3: buena, 2: moderada; 1: pobre.

Abreviaturas usadas: FAF: Fotointerpretación Aerofotográfica; TC: Trabajo de Campo; ISS : Interpretación de Sensores Remotos; SIG: Sistemas de Información Geográfica; MDT: Modelo Digital de Terreno.

### 3.9.4 Técnicas de análisis para el modelamiento de la susceptibilidad y/o amenaza.

Un mapa ideal de susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa, debería proveer información sobre la probabilidad de ocurrencia espacial y temporal, tipo, magnitud, velocidad, distancia de recorrido, y límite de regresión de los movimientos de masa en cierta área de interés (Suárez, 1998).

Las diferentes técnicas actualmente en uso proveen una evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza con base en el estudio de las condiciones naturales de

una área y en el análisis de los posibles factores involucrados en los procesos de inestabilidad.

Van Westen (1993) citado por Soeters and Van Westen (1996), revisó diferentes aproximaciones metodológicas, como se reseña a continuación.

- Inventario de movimientos de masa.

Es el método más directo para la zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza, con base en la ocurrencia de movimientos de masa en un área. Se puede realizar por fotointerpretación de fotos aéreas, trabajo de campo o base de datos históricos del área de estudio. El producto final debe ser la distribución espacial de los movimientos, representados por áreas afectadas o puntos.

Proveen información por un periodo corto de tiempo y no dan ninguna idea de los cambios temporales en la distribución de movimientos de masa.

Se pueden clasificar en análisis de distribución de movimientos de masa; análisis de densidad usando mapas de isodensidades y análisis de actividad, si se dispone fuentes de información multitemporales.

Estos inventarios son la base de cualquier estudio de zonificación de susceptibilidad y/o amenaza, aunque su aplicación a escala regional es limitada (Soeters and Van Westen, 1996; Millán, 1998).

- Aproximación heurística.

Con base en la opinión de un experto. Combina un inventario de movimientos de masa con su marco geomorfológico como el principal factor de entrada en la evaluación. La calidad de la zonificación depende del conocimiento que se tenga de la zona de estudio

y de la experiencia de los investigadores. Se puede aplicar a cualquier escala, pero es más útil a escalas nacional y regional. Se clasifican en dos tipos de técnicas:

- ☞ Análisis geomorfológico: conocido como método directo. La susceptibilidad y/o amenaza es determinada directamente en el campo por las observaciones del experto, con base en su experiencia personal y uso de razonamiento por analogías. Tiene un alto nivel de subjetividad, baja repetibilidad y el error depende del conocimiento que se tenga de la zona de estudio. Tiende a ser usados en escalas grandes y se vuelven impracticables en estudios de zonificación a escalas menores, por la complejidad de la toma de las decisiones. Se les conoce también como técnicas de evaluación empírica (Hartlen y Viberg, 1988) o Metodologías de Cartografía Directa (Cuervo, 1999).
- ☞ Combinación cualitativa de mapas: usa el conocimiento del experto para asignar pesos a una serie de mapas-parámetro. Las condiciones del terreno son representadas por la suma de los pesos y la evaluación del grado de zonificación se realiza por clases. Esta técnica ha sido muy popular, pero la desventaja es la determinación exacta del peso para cada mapa parámetro, que requiere un conocimiento detallado de los factores en la zona de estudio (Soeters and Van Westen, 1996; Millán, 1998). Se los conoce también como métodos de cálculo de peso de los factores (Gee, 1992) o metodologías de cartografía indirecta (Cuervo, 1999).

Un avance de estas técnicas es el de las evaluaciones semicuantitativas, que incluyen análisis aritméticos e interpretaciones cualitativas de los diferentes parámetros (Millán, 1998), conocidas también como modelos de Caja Gris (Grey Box) (Carrara, 1983).

Tienen la ventaja de poder ser aplicadas en regiones con insuficiente información, pero no es recomendable aplicar metodologías de este tipo con los valores preestablecidos de otros estudios, sino obtenidos del conocimiento del área específica de estudio (Vargas, 1999). Algunos ejemplos de estas técnicas han sido las desarrolladas por Ramírez y González (1989), en Colombia, Mora y Vahrson (1992), en Costa Rica y

OSSO (1995b, c), también en Colombia.

- Análisis estadísticos.

La combinación de factores que generan los movimientos de masa en el pasado se hace estadísticamente y se generan predicciones cuantitativas. El inventario de movimientos de masa es la base del estudio. Su aplicabilidad se encuentra en estudios de escala intermedia a grande y tiene la ventaja de su alta reproducibilidad y objetividad, lo que permite verificar los resultados. También se conocen como modelos de Caja Negra (Black Box) (Carrara, 1983) o técnicas de evaluación relativa (Hartlen y Viberg, 1988). Existen dos tipos de técnicas para realizar análisis estadísticos:

- ☞ Análisis estadístico bivariado: depende de la distribución de movimientos de masa; la asignación de pesos se hace a partir de correlaciones con la densidad de movimientos de masa. Con base en la suposición de que la importancia de los principales factores (variables - parámetro) sobre la estabilidad de una zona pueda ser cuantificada por el cálculo de la densidad de movimientos de masa. La base del método es el cálculo de densidad de movimientos de masa para cada variable - parámetro. Entre las técnicas usadas para el cálculo de los pesos están: método de susceptibilidad a movimientos de masa, método de valor de información, y método de evidencia de peso.
- ☞ Análisis estadístico multivariado: se fundamenta en la presencia o no de factores de inestabilidad en cada unidad morfométrica. La matriz resultante es analizada por regresión múltiple o análisis discriminantes. NO se basa en la experiencia del experto y se pueden esperar buenos resultados en zonas homogéneas o con poco movimientos de masa, debido principalmente a la gran y detallada información requerida y a la necesidad de complejos cálculos estadísticos. Los análisis pueden hacerse por regresión múltiple y análisis discriminante, La implementación de los Sistemas de Información Geográfico ha facilitado el uso de esta técnica (Soeters and Van Westen, 1996; Millán, 1998; Vargas, 1999).

- Aproximación determinística.

Son métodos indirectos, que emplean modelos físicos de estabilidad de laderas para evaluar la susceptibilidad y/o la amenaza. Son aplicables sólo cuando las condiciones geológicas y geomorfológicas son homogéneas sobre el área de estudio y los tipos de movimientos de masa son simples. La ventaja de esta técnica es que está basada en análisis cuantitativos. El principal problema es su alto grado de simplificación. Generalmente requiere el uso de modelos hidrológicos. No obstante la cantidad de información detallada que requieren, su uso se ha incrementado, debido a la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica, que permiten la manipulación de gran cantidad de datos y rapidez en los cálculos, facilitando su aplicación a escalas regionales (Soeters and Van Westen, 1996; Millán, 1998). Fue aplicada por Van Westen and Terlien (1996), en Manizales (Colombia). También se conocen como modelos de Caja Blanca (White Box) (Carrara, 1983).

- Análisis probabilísticos o de frecuencias de movimientos de masa.

Consisten en determinar la probabilidad o recurrencia de los movimientos en un lugar y en un periodo de tiempo dado. El cálculo se realiza con la ayuda de la modelación de los factores presentes en la formación de los movimientos de masa ocurridos en el pasado con características similares (Millán, 1998). También se conocen como técnicas de evaluación absoluta (Hartlen y Viberg, 1988).

- Metodología de taludes naturales.

Se enmarca dentro del campo natural de la macrogeotecnia y constituye un conjunto metodológico que permite la determinación y cálculo de parámetros geomecánicos y de estabilidad, a partir de información detallada. Permite el cálculo directo del factor de seguridad y su correspondiente probabilidad de falla. Se aplica a diferentes escalas, siempre y cuando la información requerida esté disponible (Millán, 1998). También se

conocen como técnicas por monitoreo (Hartlen y Viberg, 1988) o métodos de evaluación de inestabilidad de taludes (Gee, 1992).

Existe diversidad de métodos para el cálculo del factor de seguridad, como el método de tajadas, de talud infinito, del bloque deslizante y el de elementos finitos (Cuervo, 1999).

### **3.9.5 Selección de la técnica.**

No todas las técnicas son aplicables a todas las escalas de trabajo. Algunas requieren información detallada pero son aplicables sólo a pequeñas áreas, debido al costo de recolección y análisis de la información. La técnica debe elegirse según la escala de trabajo y una relación costo – beneficio aceptable. La Tabla 3 presenta una comparación entre las técnicas según la escala de trabajo. De esta tabla se concluye que:

- Uno de los tipos de análisis más accesible y más utilizado, es la aproximación heurística a escalas grandes.
- Para escalas regionales se recomienda el uso de aproximaciones cualitativas, a partir de estudios de densidad de movimientos de masa.
- Para escalas intermedias se recomienda el uso de análisis estadísticos, si se cuenta con información detallada. De lo contrario, se recomienda el uso de la combinación cualitativa de mapas.
- Para escalas de detalle se recomienda el uso de aproximaciones determinísticas, si se trata de un ambiente homogéneo (Soeters and Van Westen, 1996; Millan, 1998).

**Tabla 3.** Técnicas de análisis en relación con la escala de trabajo.

Tipo de Análisis	Técnica	Características	Datos Requeridos (a)	Escala de Trabajo		
				Regional (1:100.000)	Intermedia (1:25.000)	Grande (1:10.000)
INVENTARIO DE MOVIMIENTO DE MASA	Análisis de distribución de movimiento de masa	Análisis de clasificación y distribución de movimientos de masa	3	SI (b)	SI	SI
	Análisis de actividad de movimientos de masa.	Análisis de cambio temporal en el patrón de los movimientos de masa	4,5,14,15,16,17	NO	SI	SI
	Análisis de densidad de los movimientos de masa	Cálculo de densidad de movimientos de masa en unidad de terreno o como mapa	1,2,3,	SI (b)	NO	NO
ANÁLISIS HEURÍSTICO	Análisis geomorfológico	Opinión del experto en campo	2,3,4	SI	SI (c)	SI (c)
	Combinación cualitativa de mapas	Calificación de los mapas parámetro según la experiencia	2,3,4,4,5,6,7,8,9,10,12,14,16,18,	SI (d)	SI ©	NO
ANÁLISIS ESTADÍSTICO	Análisis estadístico bivariado	Cálculo de la influencia de los factores contribuyentes	2,3,5,6,7,8,9,10,12,14,16,18	NO	SI	NO
	Análisis estadístico multivariado	Estimación de la formula de predicción de la matriz de datos	2,3,5,6,7,8,9,10,12,14,16,18	NO	SI	NO

ANÁLISIS DETERMINÍSTICO	Evaluación del factor de seguridad	Aplicación de modelos hidrológicos y de estabilidad de taludes.	6,11,12,13 16,21, 22,23	NO	NO	SI (e)
----------------------------	--	---	-------------------------------	----	----	--------

Tomado de Soeters and Van Westen (1993)

**NOTA:**

a. Se refiere a los parámetros de entrada en la Tabla 2. b. Únicamente con datos confiables en la distribución de movimientos de masa. c. Pero soportado con otras técnicas cuantitativas d. Únicamente si existen datos confiables en la distribución espacial de movimientos de masa. e. Bajo condiciones de terreno homogéneas.

En general, la selección de la técnica de análisis sólo puede realizarse de acuerdo con el ambiente geomorfológico de la zona, las evidencias de procesos morfodinámicos, el nivel de detalle de la información disponible de los factores involucrados, la precisión deseada, la relación costo - beneficio y la escala de trabajo.

**3.9.6 Precisión y objetividad.**

La precisión de los resultados es la pregunta más importante en cada estudio de susceptibilidad y/o amenaza. El término indica si el resultado (mapa, tabla, matriz, o cualquiera sea su representación) de la zonificación hace una distinción correcta entre las áreas libres o no de movimientos de masa. Depende de las siguientes variables, todas ellas relacionadas:

- Precisión del modelo.
- Precisión de los datos.
- Experiencia del investigador.

- Tamaño del área de estudio.

La precisión de un mapa de susceptibilidad y/o amenaza sólo puede ser evaluada por observaciones directas de movimientos de masa en el tiempo pero, como siempre, se requiere la evaluación de los resultados. Un método muy usado para hacerlo consiste en comparar el mapa de susceptibilidad y/o amenaza con un mapa que contenga el patrón de movimientos de masa en la zona (inventario de movimientos de masa): se calcula el número de movimientos de masa encontrados en las zonas predichas como estables en valor de porcentaje y éste se supone como el error del análisis, para áreas libres o no afectadas por movimientos de masa (Soeters and Van Westen, 1996).

Relacionada con la precisión esta la objetividad del análisis. El término objetividad se usa para indicar si los pasos usados en la determinación del grado de susceptibilidad y/o amenaza, son verificables y reproducibles. La objetividad no siempre implica precisión. El grado de objetividad depende de las técnicas usadas en la recolección y análisis de los datos. Las características propias de la evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa implican cierto grado de subjetividad, el cual no tiene que significar imprecisiones (Soeters and Van Westen, 1996).

### **3.10 USO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO EN EL MODELAMIENTO DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y/O AMENAZA.**

Un SIG está definido como una herramienta para recolectar, ordenar, recuperar, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real, con un propósito específico. Generalmente un SIG, está compuesto de los siguientes componentes:

- Entrada de datos y verificación.
- Almacenamiento de datos y tratamiento de base de datos.
- Transformación de datos y análisis.

- Salida de datos.

Existen diferentes sistemas los cuales se diferencian principalmente por el tipo de estructura de datos, la técnica de compresión de los datos, dimensión, hardware, e interfaces con el usuario (Soeters and Van Westen, 1996).

Las ventajas del uso de los SIG para la evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza, son principalmente la capacidad de almacenar ordenadamente gran cantidad de datos georreferenciados, la rapidez de procesamiento y actualización de los mismos, así como la facilidad para la combinación y representación gráfica de ellos, incluyendo el procesamiento de múltiples fases del modelo que de otra manera tomarían demasiado tiempo.

El mayor peligro en la utilización de los SIG se encuentra en usuarios que pueden tender a reemplazar el razonamiento, la calidad de los datos, el análisis, y hasta los modelos conceptuales mismos, por la herramienta

La primera aplicación del uso de SIG para la zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza, fue reportada por Newman (1978). Actualmente los SIG, son usados para casi todos los estudios de susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa en el mundo y se siguen desarrollando metodologías para la aplicación de las técnicas de análisis, la mayoría de las aplicaciones para análisis cualitativos.

Cada metodología y técnica de modelamiento puede aportar valiosos resultados al conocimiento del problema, si se establecen con claridad tanto la escala de trabajo, como una objetiva recolección y manejo de los datos, sumado a una adecuada presentación de los resultados.

## **4. DESCRIPCIÓN FISIAGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.**

### **4.1 TOPOGRAFÍA.**

La zona de estudio se localiza entre el límite de la llanura aluvial del río Cauca al Occidente y la vertiente oriental de la Cordillera Central al Este. Al NW comprende una franja de colinas estrechas y alargadas de dirección general NS, expresión de rocas sedimentarias del Terciario ocasionalmente plegadas. Entre esta unidad y el inicio de la Cordillera Central propiamente dicha, conformada por rocas del Cretáceo y más antiguas, se extiende una llanura de rellenos fluviovolcánicos de la Formación Armenia, que en la zona tiene un ancho promedio en sentido E-W de 16 km. Al Sur y al E de esta planicie la región es montañosa y abrupta, con alto grado de disección y valles estrechos entre los que sobresalen los de los ríos Barragán, Pijao, Lejos y Rioverde (ver mapas 4, 7 y 8 del Anexo A). Las alturas están entre las cotas 950 y 3900 msnm, con pendientes naturales del terreno entre 0 y 67 grados.

### **4.2 DRENAJES.**

Los ríos Quindío, Barragán y Pijao, junto con sus tributarios Santo Domingo, Río Verde, Río Azul y Río Lejos, en territorio del Quindío, conforman el río La Vieja; Orisol y Chili, drenan hacia el Magdalena en territorio del Tolima y el río Polo o Saldaña, Bugalagrande, San Marcos y Totoro, en territorio del Valle del Cauca, drenan

directamente a la planicie aluvial del río Cauca y de allí a éste (ver mapa 4 en el Anexo A).

### **4.3 DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA.**

El territorio objeto de estudio en el Quindío se encuentra distribuido entre los pisos térmicos cálido, templado, frío y páramo, y presenta una precipitación media anual entre 1725 mm en Génova y 2251 mm en Montenegro (IGAC 1996a).

En el Tolima los territorios municipales se encuentran entre los pisos térmicos templado, frío y páramo con una precipitación media anual entre 1100 mm (Roncesvalle), y 1281 mm en Cajamarca (IGAC, 1996a).

Los del Valle del Cauca tienen una temperatura media anual entre 20° C y 24° C, sus territorios, parcialmente cubiertos por este proyecto, se encuentra entre los pisos térmicos cálido, templado, frío y páramo, y presentan una precipitación media anual entre 1166 mm en Bugalagrande y 2514 mm en Sevilla (IGAC, 1996a).

Con base en la zonificación climática del área de estudio (que será explicada en detalle en el Capítulo 6), se encuentran zonas Subhúmedas, Húmedas y Muy Húmedas, que comprenden los pisos térmicos Tierra Caliente, Tierra Moderadamente Caliente, Tierra Templada, Tierra Moderadamente Fría, Tierra Fría y Páramo.

Combinando las zonas de humedad con los pisos térmicos se obtienen las zonas climáticas diferenciadas en Tierra Caliente Sub Húmeda, Tierra Moderadamente Caliente Sub Húmeda, Tierra Moderadamente Caliente Húmeda, Tierra Templada Húmeda, Tierra Templada Muy Húmeda, Tierra Moderadamente Fría Húmeda, Tierra Moderadamente Fría Muy Húmeda, Tierra Fría Muy Húmeda y Páramo, como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Zonificación climática.

Humedad.	Piso	Zona Climática	Altura Msnm	Temp °C	PP anual Mm	Área km <sup>2</sup>	% del Area Total	Municipios
Sub Húmedo (SH)	TC	TCSH	< 1000	> 24	[1000 2000]	38.4	2	Montenegro, La Tebaida, La Victoria y Sevilla
	TMC	TMCSH	[1000 1400]	[20 24]	[1000 1500]	5	0.3	La Victoria
Húmedo (H)	TMC	TMCH			[1500 2500]	751.6	38.3	Todos los municipios excepto Cajamarca y Roncesvalle
	TT	TTH	[1400 2000]	[16 20]	[1200 2000]	103.6	5.3	Génova, Pijao, La Victoria, Sevilla y Caicedonia
	TMF	TMFH	[2000 2800]	[12 16]	[1000 2000]	3.5	0.20	Génova y Caicedonia
Muy Húmedo	TT	TTMH	[2000 2800]	[12 16]	[2000 4000]	370	18.9	Génova, Pijao, Buenavista, Calarcá, Córdoba, Armenia, Bugalagrande, Sevilla, Tuluá y Caicedonia.
	TMF	TMFMH	[2000 2800]	[12 16]	[2000 4000]	271.2	13.8	Todos los municipios excepto Armenia, Montenegro, La Tebaida, La Victoria y Bugalagrande
	TF	TFMH	[2800 3400]	[8 12]	> 2000	204.3	10.4	Génova, Pijao, Calarcá, Córdoba, Cajamarca, Roncesvalle
Páramo	P	P	> 3400	< 8		212.4	10.8	Génova, Pijao, Calarcá, Córdoba, Cajamarca, Roncesvalle

#### 4.4 TECTÓNICA REGIONAL.

El ambiente tectónico del suroccidente Colombiano está regido por la compleja y dinámica interacción de tres placas tectónicas mayores las cuales, por su desplazamiento en los periodos geológicos, han deformado la corteza continental que conforma el territorio y son causa primaria de los sistemas de fallas que lo atraviesan y de la actividad sísmica actual.

Se encuentra ubicado en límites de la placa Nazca y Caribe (oceánicas) que colisionan con la placa Suramericana (continental). Debido a esta colisión se origina un proceso conocido como subduccion que consiste en el hundimiento de la placa oceánica (más densa) bajo la continental, para penetrar de nuevo en el manto terrestre, acumulando y liberando gran cantidad de energía. En el suroccidente colombiano la placa Nazca subduce en un plano, la zona de Wadati-Benioff, hasta profundidades entre 120-160 km con un ángulo de buzamiento de 30 grados en el segmento Cauca, entre las latitudes 3°N - 5°N. (Monsalve, 1998).

En 1988 se dio inicio al proyecto "Central And South American GPS Project" - CASA, (Kellog et al., 1989), cuyo objetivo era medir por medio del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés), las tasas y vectores de desplazamiento de las placas. Se ha calculado que la placa Nazca se desplaza en sentido W-E con una velocidad de cerca de 50 mm/año (Mora, 1995 en Guzman et al., 1998), mientras que la placa Caribe se desplaza en dirección SE a una tasa de 8 mm/año (Mora, 1995).

Enmarcado en las placas Suramérica, Nazca y Caribe se encuentra el Bloque Norandino, limitado al oriente por el sistema de fallas frontal de la cordillera Oriental y al occidente por la fosa de subducción de la placa de Nazca, al noroccidente con la placa Caribe y el Bloque Panamá y al norte con la Falla de Oca (Guzmán et al., 1998). Se desplaza en dirección NE a una tasa aproximada de 6 mm/año. También se sabe que el Bloque Panamá, a su vez, colisiona con el Bloque Andino en sentido SE entre 7 y 23 mm/año. Observaciones de las relaciones entre las Placas Caribe y Bloque Panamá

con el Bloque Norandino han permitido elaborar hipótesis sobre la probable rotación de este último, derivada de la colisión de Panamá (Mora, 1995). El Bloque Norandino se encuentra atravesado por diferentes sistemas de fallamiento y sobre él se encuentra la zona de estudio.

Estos procesos tectónicos de escala grande han dado origen a varias fuentes sísmicas:

#### **4.4.1 Fuentes asociadas con la zona de subducción.**

Se distinguen dos tipos:

- Fosa oceánica.

Es la fuente sísmica más importante del país. Corresponde a la zona donde se inicia el proceso de subducción y la placa oceánica se dobla para hundirse en el manto, originando eventos de profundidad no mayor a 40 km y sismos con magnitudes mayores de 8.0 (OSSO, 1996a). Se ubica a unos 150 a 200 km paralela a la Costa Pacífica entre Ecuador y Colombia. Con esta fuente se asocian terremotos como el del 31 de enero de 1906 y 12 de diciembre de 1979, que alcanzaron magnitudes de momento ( $M_w$ ) de 8.6 y 7.9 respectivamente.

- Zona de Wadati – Benioff.

Corresponde a la continuación de la zona de subducción, en la interface directa entre la placa oceánica y la placa continental a profundidades desde 40 hasta más de 160 km y magnitudes máximas entre 6.0 y 7.0 (OSSO, 1996a). La actividad se concentra bajo las cordilleras Occidental y Central, en los territorios del Valle del Cauca, Eje Cafetero y sur del Chocó. Se han asociado a ésta fuente eventos como el del 23 de noviembre de 1979 (El Águila, Valle) y 8 de febrero de 1995 (Calima - Darién), con magnitudes 6.4.

#### **4.4.2 Fuentes intraplaca.**

Corresponde a la actividad en la corteza continental en las fallas activas que atraviesan la región, producto de los esfuerzos regionales. Se caracterizan por su poca profundidad. A estas fuentes corresponden los sismos del 31 de marzo de 1983 (Popayán), 6 de junio de 1994 (Páez) y 25 de enero de 1999 (Quindío).

#### **4.5 UNIDADES LITOLÓGICAS.**

En este numeral se describen las unidades litológicas, con base en la revisión de la literatura y cartografía geológica. En el área se encuentran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, originadas durante diferentes periodos geológicos, afectadas por tramos activos de fallas geológicas. Las unidades se describen de acuerdo con Mccourt et al., (1984) e INGEOMINAS (1991, 1999) y se muestran en el Mapa 8 del Anexo A.

##### **4.5.1 Paleozoico.**

- Complejo Cajamarca.

Complejo polimetamórfico localizado al este de la Falla de San Jerónimo, en el cual se pueden detectar varios eventos metamórficos, en parte superpuestos. Conformado por:

*Pev* (Esquistos verdes). Esquistos actinolíticos y cloríticos a veces calcáreos de color verde predominante; localmente con intercalaciones concordantes de esquistos sericíticos. Son de grano fino a medio, masivos en afloramiento, pero con buena esquistosidad (McCourt et al., 1984)

*Pes* (Esquistos negros). Esquistos cuarzo-sericíticos grafitosos, pizarras y filitas, localmente con intercalaciones de esquistos cloríticos (INGEOMINAS, 1991b). Son de

grano fino a medio, tiene abundantes replegamientos, venas y lentes de cuarzo de segregación (McCourt et al., 1984).

*Pq.* Cuarcitas y cuarcitas biotíticas (INGEOMINAS, 1991a). Son variedades mineralógicas y texturales de los esquitos y filitas negras, que tienen cantidades menores de sericita y grafito, con aumento en el porcentaje de cuarzo y biotita (McCourt et al., 1984).

*Pzc.* Esquistos cuarzo-sericíticos, esquistos actinolíticos y cloríticos sin diferenciar. (INGEOMINAS, 1991a).

- Complejo Rosario (Pzr).

Secuencia de anfibolitas macizas, localmente granatíferas, asociadas parcialmente con rocas ultrabásicas tectonizadas (McCourt et al., 1984).

- Grupo Bugalagrande (Pzb).

Secuencia metamórfica pelítica - metavolcánica de composición básica, probablemente de origen oceánico. Está compuesta de esquistos grafiticos con intercalaciones locales de cuarcitas. Muestra evidencia de metamorfismo regional con varios eventos posteriores de metamorfismo dinamotérmico (McCourt et al., 1984).

#### **4.5.2 Mesozóico (Cretáceo).**

- Complejo Quebradagrande.

Conformada por:

*Kqs.* Unidad sedimentaria. Pizarras arcillosas y silíceas, grauvacas, limolitas, liditas y localmente bancos de calizas e intercalaciones de rocas volcánicas. En gran parte

muestra efectos de metamorfismo dinámico (INGEOMINAS, 1991a). Consta de shales negros, areniscas, grawacas y bancos delgados de chert negro. El mineral dominante es el cuarzo (McCourt et al., 1984).

*Kqv.* Litodema volcánico. Derrames lávicos submarinos parcialmente espelitizados y rocas piroclásticas hacia los niveles superiores, localmente con intercalaciones sedimentarias (INGEOMINAS, 1991a). Se pueden identificar diabasas, basaltos, andesitas y tobas. La textura dominante es cataclástica, con relictos de textura ofítica y subofítica (McCourt et al., 1984).

*Kq.* Zona de predominio de rocas *Kqv* y *Kqs*, donde se presentan rocas de *Pev*, emplazadas tectónicamente (INGEOMINAS, 1991a).

- Rocas Ultramáficas (*Ku*).

Serpentinitas localmente con estructura esquistosa por efectos dinámicos, contactos generalmente tectónicos (INGEOMINAS, 1991a). Cuerpos ultramáficos, serpentinizados y tectonizados localmente con fragmentos de eclogitas y anfibolitas. Rocas eclogíticas que emplazan a lo largo de una zona de fallamiento del Sistema Romeral (McCourt et al., 1984).

- Complejo Ígneo de Córdoba (*Kdi*).

Principalmente dioritas con variaciones composicionales a granodiorita (INGEOMINAS, 1991a). Intrusivo básico a intermedio, hornbléndico de composición variable entre diorita y cuarzodiorita, de grano fino a grueso (McCourt et al., 1984). Intruye las rocas del Complejo Arquía y Quebradagrande. Presenta estructuras debidas a metamorfismo dinámico (INGEOMINAS, 2000c).

- Formación Amaime (Jka).

Se localiza a lo largo del flanco occidental de la Cordillera Central en contacto fallado con las rocas metamórficas paleozoicas. Consiste en una secuencia de lavas basálticas almohadilladas de origen oceánico, típicamente tectonizadas (McCourt et al., 1984). Se extiende a través del Valle del Cauca como un cinturón de rumbo NE - SW de 140 km de largo y 5 - 15 km de ancho (INGEOMINAS, 1999c).

- Cuarzo-dioritas (Kcd).

Plutones intermedios a veces porfiríticos localizados a lo largo de las zonas de falla del sistema Romeral intruyendo rocas metamórficas paleozoicas (McCourt et al., 1984).

- Batolito de Ibagué (Jcdt-t).

Cuarzo - diorita/tonalita biotítica - hornbléndica con variaciones texturales y composicionales a granodiorita y zonas restringidas de composición granítica - pegmatítica (McCourt et al., 1984).

- Pórfidos (Ta, Tp).

Diques y stocks de composición intermedia, dacítico - andesíticos, que intruyen las rocas paleozoicas y mesozoicas. Su edad exacta es desconocida (McCourt et al., 1984).

#### **4.5.3 Terciario.**

- Formación Cauca Superior. Miembro Cinta de Piedra (Tocp).

Rocas sedimentarias continentales, areniscas verdosas con intercalaciones de arcillolitas y conglomerados del Mioceno Inferior (INGEOMINAS, 1991a). Esta unidad

está compuesta por areniscas friables de color gris verdoso con tamaño de grano variable, textura clástica y cantos subredondeados, con algunas intercalaciones de conglomerados polimíticos y arcillolitas verdosas (McCourt et al., 1984). Aflora en el valle del río La Vieja, en el extremo occidental del departamento del Quindío. Este miembro ha sido considerado del Oligoceno Superior (INGEOMINAS, 1999c).

- Formación La Paila (TMp).

Rocas sedimentarias continentales. Areniscas, conglomerados y unidades de tobas dacíticas del Mioceno (INGEOMINAS, 1991a). La composición de los conglomerados, sugiere que la formación pertenece a un ambiente fluvial con aportes de la Cordillera Central (McCourt et al., 1984). Aflora en el extremo occidental del departamento del Quindío en el valle del río La Vieja, suprayaciendo en discordancia al miembro Cinta de Piedra. Se le considera del Mioceno Inferior (INGEOMINAS, 1999c).

- Formación La Pobreza (TmPo).

Secuencia sedimentaria continental de conglomerados y areniscas. (McCourt et al., 1984). Se sugiere una edad de Mioceno Superior o Plioceno (INGEOMINAS, 1999d).

- Formación Zarzal (TPz).

Secuencia sedimentaria conformada por diatomitas, arcillas y arenas tobáceas (McCourt et al., 1984). En la parte inferior de esta formación se encuentra una intercalación de areniscas y arcillas diatomáceas con lentes de conglomerados finos y areniscas; en la parte media se encuentran conglomerados mal seleccionados, junto con cantos redondeados; la parte superior está formada por diatomitas intercaladas con tobas y areniscas. Se le considera del Plioceno -sin confirmar- (INGEOMINAS, 1999d).

- Formación Armenia (TQa).

Secuencia de depósitos meteorizados, principalmente de cenizas volcánicas y flujos de

lodo, que afloran al este de Armenia, fosilizando rocas mas antiguas. Edad Plio - Pleistoceno (McCourt et al., 1984).

#### **4.5.4 Cuaternario.**

- Depósitos Glaciares (Qg).

Depósitos detríticos formados por acción glacial reciente. Constituidos por fragmentos y bloques de lava en una matriz arenoarcillosa (INGEOMINAS, 1991a). En la parte alta de la cordillera, a más de 3000 m, hay extensos depósitos glaciales sin diferenciar, pero principalmente morrenas (McCourt et al., 1984).

- Aluviones Recientes (Qal).

Depósitos no consolidados heterogéneos de material aluvial, que se encuentran en las partes inferiores de los cursos de los ríos. Compuestos de fragmentos de roca mal seleccionados y arenas, limos y arcillas sin estratificación (McCourt et al., 1984).

- Depósitos Piroclásticos (Qp).

Capas de cenizas volcánicas principalmente tefras, lapilli y ocasionalmente bombas. Su ocurrencia es local con espesor variable (McCourt et al., 1984).

#### **4.6 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.**

El Departamento del Quindío está atravesado por varias fallas geológicas, que tienen su origen en sistemas de fallamiento regional como el sistema Cauca - Romeral. Generalmente definen los contactos entre las diferentes unidades litológicas y, además, tienen contribuyen a la inestabilidad de los materiales y en la amenaza sísmica, debido a que no sólo alteran los materiales deformándolos, sino que además son fuente de la actividad sísmica. Aunque en tiempos históricos no se tiene evidencia de su

actividad, sismos como el del 25 de enero de 1999 son un ejemplo del potencial destructor de estas fallas.

Estudios recientes, con base en observaciones neotectónicas de campo y fotointerpretación, indican actividad cuaternaria para algunas de las fallas. Debido a la falta de información sobre sismos históricos originados en esta fuente, se han estimado por otros métodos las máximas magnitudes esperables, encontrándose valores altos.

Las estructuras más frecuentes son fallas de tipo inverso, de rumbo Norte - Sur, que afectan rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Otro grupo, menos frecuente, está conformado por fallas de rumbo general Este - Oeste, con planos de fallas casi verticales e importante componente de rumbo (INGEOMINAS, 1999b).

Guzmán et al., (1998), identifican 3 tipos de lineamientos en el Eje Cafetero:

- Fallas N-S a NNE-SSW. Mayor continuidad y expresión fisiográfica. Zonas de cizalla y debilidad cortical, con segmento potencialmente móviles. Presentan los mayores desplazamientos de tipo neotectónico.
- Fallas NW - SE a WNW. - ESE. Cruzan de la Cordillera Central a la Occidental. En algunos sectores cortan estructuras N-S, con desplazamientos tipo normal, y componente dextro-lateral, con evidencias de compresión NW-SE, la cual no es muy notoria.
- Fallas NE – SW. En el piedomonte occidental de la Cordillera Central, las estructuras muestran evidencias de compresión NW-SE.

En el Anexo A, Mapa 9 y 10, se ilustran las fallas que cruzan el área de este estudio, cuya descripción sintética se da a continuación.

#### **4.6.1 Falla Cali – Patía.**

Rumbo N 20° - 30° E / S 20° - 30° W, con longitud de 200 km. Presenta evidencias de varios eventos sísmicos de movimientos sinestrales. Buchelli et al., (1986, en INGEOMINAS, 2000c), interpreta 8 zonas de riesgo sísmico asociadas a esta falla, incluyendo zonas de poca actividad (silencio sísmico).

#### **4.6.2 Falla Quebradanueva.**

Falla de cabalgamiento inverso con componente sinistral y vergencia hacia el occidente (Guzmán et al., 1998), con rumbo N20°E - S20°W (INGEOMINAS, 2000c). Se le considera de actividad intermedia (0.3 - 0.5 mm/año), con una Magnitud Máxima Probable de 6.5 Mw (Guzmán et al., 1998). Presenta rasgos morfotectónicos como desplazamientos de cauces, cauces alineados e interfluvios desplazados horizontalmente, escarpes de falla, basculamiento e inversiones del drenaje en el mismo sentido del basculamiento. La falla afecta la Formación Armenia, con evidencias de compresión NW - SE (Guzmán et al., 1998).

#### **4.6.3 Falla Cauca – Almaguer.**

Es un fallamiento de dirección NNE-SSW con buzamiento al E, que presenta bifurcaciones en su trazo. No presenta rasgos morfotectónicos abundantes, se destacan el patrón de drenaje del río Consota, la distribución de depósitos holocénicos, de mayor amplitud hacia el W, silletas y valles lineares (Guzmán et al., 1998). Nivia (1997, en INGEOMINAS, 2000c) considera esta falla como un límite tectónico regional entre dos provincias cretácicas principales, una oceánica y otra continental, concluyendo que corresponde a la margen occidental del continente suramericano durante el Cretáceo.

#### **4.6.4 Falla Armenia.**

Es de tipo inverso con buzamiento hacia el occidente. Se desprende de la falla Cauca - Almaguer al Sur de Armenia. En esta ciudad se bifurca en un ramal Oeste que empalma con la falla Filandia en la Formación Armenia y un ramal Este que sigue hacia el noreste. Paralelos a la falla se presentan algunos alineamientos y otros en dirección NE - SW (Guzmán et al., 1998). INGEOMINAS (2000c) reporta truncamiento al norte, causado por la Falla Salento.

En la ciudad de Armenia presenta un escarpe de falla con cara al libre al Este y una altura de 20 - 30 metros. La superficie del bloque de techo presenta basculamiento hacia el W, lo que determina la inversión del drenaje conforme a la superficie. También controla un tramo de 10 km de longitud del Río Quindío y alineamientos de las Quebradas Hojas Anchas y San Nicolás. Se observan corrientes deflectadas, silletas, interfluvios flexionados, obturación, desplazamiento de drenajes, depresiones cerradas y basculamiento. La falla afecta los depósitos de cenizas con evidencias de estrías, inclinaciones y rupturas de origen tectónico que indican actividad reciente (Guzmán et al., 1998; INGEOMINAS, 2000c).

Se le considera de actividad Intermedia a Alta, con Máxima Magnitud Probable (MMP) de 6.7 (CARDER, 1999). Su tasa de actividad ha sido calculada en 0.4 mm/año según Vergara and Moreno (1996, en INGEOMINAS, 2000c) y en 0.1 mm/año, según Paris (1997, en INGEOMINAS, 2000q).

#### **4.6.5 Falla Silvia – Pijao.**

Es una de las más importantes fallas del Sistema Romeral. Su rumbo predominante es N-S a NNE - SSW; corre al lado oriental del Valle del Río Cauca. Constituye el límite entre el Complejo Arquía y el Complejo Quebradagrande (Guzmán et al., 1998). Se compone de una falla principal conocida como Pijao y de ramales subparalelos, como

las fallas Buenavista, Córdoba y Bellavista. Las fallas de Buenavista, Pijao y Córdoba se unen entre Quebradanegra y la quebrada La Sonadora, continuando como una sola hacia el Norte, controlando el cauce del río Quindío (INGEOMINAS, 2000c).

Presenta alineamiento de corrientes, pasos de montaña en forma de silleta, facetas triangulares desgastadas, quiebres de pendiente, lomos de obturación e interfluvios desplazados en sentido lateral izquierdo (INGEOMINAS, 2000c). Guzmán et al., (1998), reportan la existencia de geoformas de origen neotectónico, como lomos de flexión, lomos de obturación, desplazamiento de cauces, trincheras de falla, desplazamientos planimétricos de interfluvios, basculamientos predominantemente al E, valles lineares, zonas de cizalla, escarpes de falla y control de drenajes.

Se le considera de actividad Intermedia a Alta, con MMP de 6.7 (CARDER, 1999). McCourt et al., (1984), consideran que esta falla es inversa de alto ángulo con componente de rumbo dextral (Mccourt et al., 1984, en INGEOMINAS, 2000c).

La Falla Silvia se alinea con el Valle del Río Lejos, pasando por Pijao y Córdoba con rumbo general N 10° - 15° E. La Falla Córdoba es el límite entre el Complejo Ígneo de Córdoba y el Complejo Quebradagrande (rumbo general N 10° - 20° E). La falla Bellavista presenta indicios de actividad cuaternaria como escarpes de falla y drenajes deflectados que afectan depósitos recientes. Parece estar conformada por dos segmentos, el primero con rumbo N 15° E, 1 km al oriente de Córdoba, cambia de dirección a N 30° E, para recuperar el rumbo original (INGEOMINAS, 2000c).

#### **4.6.6 Fallas con tendencia E - W y WNW-ESE.**

Sobrepuestas sobre las fallas Norte - Sur, se encuentran fallas con sentido Este - Oeste, como la falla de Salento, Ibagué, Quebradanegra y Río Verde. Presentan evidencia neotectónica, como los alineamientos de las quebradas Hojas Anchas y La Pajuila

(INGEOMINAS, 2000c).

- Falla Salento. Con dirección E-W, que controla el valle del Río Quindío, al E de Salento (Guzmán et al., 1998). Corta la Cordillera Central y varias fallas que recorren el Eje Cafetero (INGEOMINAS, 2000c). Presentan rasgos morfotectónicos en cercanías de Salento, como facetas triangulares y lomos de flexión en sentido dextral (Guzmán et al., 1998).
- Falla Río Verde. Con dirección N 80°0 - 85° E (INGEOMINAS, 2000c). Controla el cauce del Río Verde, los primeros tramos del río La Vieja y la confluencia de los ríos Quindío, Barragán y Río Verde (CARDER, 1999b). Interrumpe casi perpendicularmente las trazas de las fallas Quebradanueva, Cauca – Almaguer, Armenia, Córdoba, Nevado y Salado, terminando su recorrido contra la falla de Campanario – Manizales (INGEOMINAS, 2000c).
- Falla Quebrada Negra. Detectada por fotogeología, con rumbo N 45° W, probablemente de movimiento normal por distensión SW - NE. Presenta rasgos morfotectónicos como facetas triangulares y deflexión de corrientes del Abanico del Quindío (INGEOMINAS, 2000c).

#### **4.6.7 Falla Ibagué.**

Fallamiento transcurrente de componente dextral con rumbo ENE-WSW y una longitud aproximada de 50 km (CARDER, 1999b). Presenta desplazamientos de abanicos y flujos de escombros en el Río Chípalo, escarpes de falla, lomos de ballena y lagunas de falla (Guzmán et al., 1998). La tasa de actividad es de Intermedia a Alta según CARDER (1999a).

#### **4.6.8 Falla Navarco.**

Fallamiento con rumbo N 35° E y buzamiento vertical (CARDER, 1999b). Se localiza en el frente occidental de la Cordillera Central, bordeando la Formación Armenia, afectando rocas del Complejo Quebradagrande (INGEOMINAS, 2000c). James (1986) afirma que origina desplazamientos leves sobre la superficie de la Formación Armenia (James, 1986, en CARDER, 1999a).

#### **4.6.9 Falla Montenegro.**

Fallamiento sinistral con componente inversa (Guzmán et al., 1998), con dirección N - S, y probable buzamiento al NW (INGEOMINAS, 2000c). Presenta como evidencia morfotectónica contundente un escarpe de falla con cara libre al E de 30 a 50 m de altura y longitud aproximada de 30 km que desplaza materiales de la Formación Armenia (Formación Armenia), según CARDER (1999b). También presenta valles en copa de vino e inversiones de drenaje sobre el bloque occidental, levantado, capturas de drenajes y basculamientos (Guzmán et al., 1998).

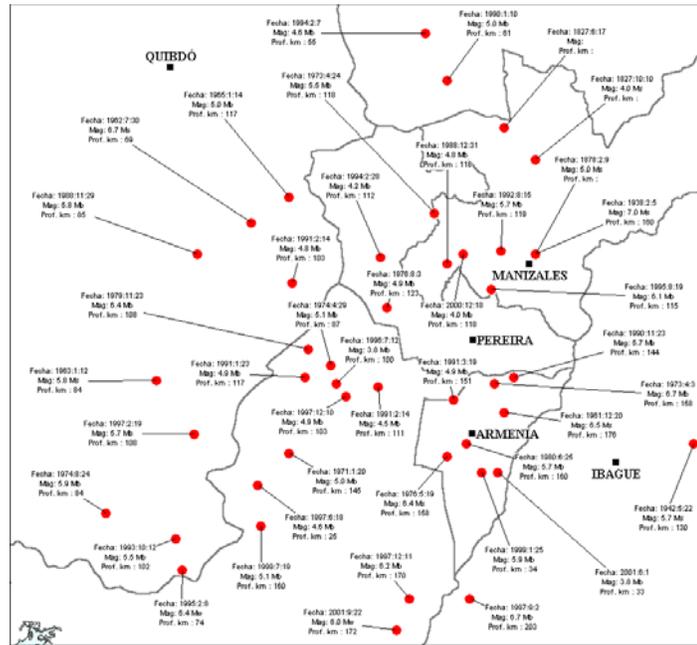
Se ha estimado una tasa de actividad Intermedia a Baja. Su tasa de desplazamiento ha sido evaluada en 0.1 mm/año (Woodward - Clyde Consultants, 1983, en INGEOMINAS, 2000c), y de 5 mm/año (Paris, 1997, en INGEOMINAS, 2000c).

### **4.7 MACROSÍSMICA.**

El Eje Cafetero es parte de las regiones de mayor amenaza sísmica en Colombia (AIS, 1996b). Ha sido afectado en su corta historia (alrededor de 150 años) por diversos sismos, principalmente generados en la zona Wadati - Benioff, con magnitudes superiores a 6.0. Los eventos de la misma fuente con magnitudes menores a 5.0, han ocasionado efectos de menor intensidad. Eventos superficiales originados en la zona de subducción del Pacífico frente al litoral, con magnitudes entre 5.6 y 8.9, han

generado intensidades MM entre III y IV. Eventos provenientes del Noreste del país han sido sentidos en algunas poblaciones, sin ocasionar daños. También se encontraron efectos menores ( $I < V$ ), asociados a eventos originados en la fallas del Borde Llanero.

Hasta el momento no se ha encontrado documentación que permita inferir sismicidad cortical (superficial) con efectos en la zona de estudio. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el poblamiento del Eje Cafetero sólo empezó a mediados del Siglo XIX y que las ciudades del Quindío se fundaron a finales de ese siglo. En otras palabras, sólo se dispone de 100 años de historia, frente a fenómenos que pueden tener tasas de recurrencia mucho mayores. A continuación se listan los principales sismos con efectos reportados, según catálogos disponibles, fuentes hemerográficas y archivos revisados en este estudio, cuya síntesis se ilustra en la Figura 5.



**Figura 5.** Sismicidad histórica con efectos en el Eje Cafetero

- 1878:02:09

Localizado en cercanías de Manizales (Caldas), se documentaron efectos en Manizales (VII), Salento (VI) y Cartago (V). Fue asociado a la región de Wadati - Benioff (Arango y Velásquez, 1993).

- 1938:02:05.

Localizado en cercanías de Manizales (Caldas), produjo daños en todo el Eje Cafetero desde el Valle del Cauca hasta el sur de Antioquia. Asociado a la zona de Wadati - Benioff, a 160 km de profundidad con magnitud de 7.0 Ms. Se documentaron intensidades MM de VIII en Santa Rosa de Cabal, Manizales, Aguadas, Salento y Cartago; VII en Pereria y Cali; VI en Armenia e Ibagué (Arango y Velásquez, 1993; CERESIS, 1985; Meyer, 1983; Ramírez, 1975; Archivo Histórico OSSO).

- 1961:12:20.

Localizado en Circasia (Quindío), a una profundidad de 176 km, con magnitud 6.5 Ms. Fue asociado a la zona de Wadati - Benioff. Produjo intensidades MM de VIII en Armenia, Montenegro, Calarcá y Pereira; VII en Manizales, Anserma, Aguadas, Riosucio, Quimbaya y Santa Rosa de Cabal; VI en La Virginia e Ibagué. (Meyer, 1983; CERESIS, 1985; Arango y Velásquez, 1993; EL PAIS, diciembre 21 de 1962).

- 1962:07:30.

Localizado en Tadó (Chocó), se originó en la zona de Wadati - Benioff a una profundidad de 69 km con magnitud 6.7 Ms. Se calcularon intensidades MM de VIII en Manizales, Pácora, Pereira y Apía; VII en Sevilla, Ansermanuevo, Pensilvania y Honda (CERESIS, 1985; Meyer, 1983; Ramírez, 1975; Arango y Velásquez, 1993; EL PAIS, 31 de julio, 1962;).

- 1967:02:09.

Localizado en Tello (Huila), se originó en el fallamiento del Borde Llanero, a una profundidad de 60 km, con 6.3 Mb de magnitud. Se le asignó una intensidad MM de VII en Roncesvalles, VII en Cali y VI en Pereira, Armenia e Ibagué. Se encontraron reportes de deslizamientos en algunas vías (Meyer, 1983; CERESIS, 1985; EL PAIS, 10 de febrero, 1967).

- 1973:04:03.

Localizado en Circasia (Quindío), a una profundidad de 158 km con magnitud 6.7 Mb. Se originó en la zona de Wadati - Benioff. Fue sentido en gran parte del territorio nacional y produjo intensidades MM de VIII en Armenia y Salento; VII en Pereira y Manizales y V en Cali. También se reportaron deslizamientos en vías de Risaralda y Caldas (Arango y Velásquez, 1993; CERESIS, 1985; Meyer, 1983).

- 1973:04:24.

Localizado en el Océano Pacífico, frente al departamento Chocó, a una profundidad de 50 km, con magnitud 6.6 Ms. Asociado a los procesos de subducción superficiales frente al Litoral Pacífico, produjo intensidades MM de VII en Pereria y VI en Armenia (CERESIS, 1985; Arango y Velásquez, 1993).

- 1974:08:24.

Localizado en Calima - Darién (Valle), a una profundidad de 84 km con magnitud 5.9 Mb, se originó en la zona de Wadatti - Benioff. Produjo intensidades MM de VII en Cali; VI en Armenia y Pereira; V en Manizales (CERESIS, 1985; EL OCCIDENTE, 25 de agosto, 1974).

- 1976:05:19.

Localizado en La Tebaida (Quindío), a una profundidad de 158 km con magnitud 6.4 Ms. Fue asociado a Wadati - Benioff y se le asignaron intensidades MM de VII en Armenia, Pereira, Marsella y La Virginia; VI en Cali y V en Manizales (Meyer, 1983, CERESIS, 1985).

- 1979:11:23.

Localizado en El Águila (Valle), se originó en la zona de Wadati - Benioff, a una profundidad de 108 km, con magnitud 6.4 Mb. Fue sentido en la mayor parte del territorio nacional. En Manizales, Anserma, Pereira, La Virginia y Santa Rosa de Cabal la intensidad (MM) osciló entre IX y VIII. En Armenia y norte del Valle las intensidades oscilaron entre VIII y VII (Arango y Velásquez, 1993; Meyer, 1983; CERESIS, 1985; Ramírez y Goberna, 1980; CARDER, 1999a).

- 1980:06:25.

Localizado en Armenia (Quindío), se originó en la zona de Wadati - Benioff, a una profundidad de 160 km, con magnitud 5.7 Mb. Produjo intensidades MM de VI en Pereira y Armenia y V en Manizales (CERESIS, 1985).

- 1995:02:08.

Localizado en Calima - Darién (Valle), a una profundidad de 74 km, con magnitud 6.4 Mw. Se originó en la zona de Wadati - Benioff. Los mayores daños ocurrieron en Pereira, a 140 km del epicentro, además de efectos destructivos en otras poblaciones del Eje Cafetero y en norte y centro del Valle, entre ellas Manizales, Palestina, Armenia, Calarcá, Trujillo, Caicedonia, Buga, Argelia (OSSO, 1995; EL TIEMPO, 9, 10 y 11 de febrero, 1995; EL PAIS, 9, 10 y 14 de febrero, 1995; EL OCCIDENTE, 11 de febrero, 1995).

- 1997:09:02.

Localizado en Argelia (Valle), a una profundidad de 103 km, con magnitud 4.9 M. Se originó en la zona de Wadati - Benioff y produjo daños en algunas edificaciones de Armenia, Manizales, Sevilla y El Cairo (OSSO, 1997; EL OCCIDENTE, 3 de septiembre de 1997; EL PAIS, 3 de septiembre de 1997).

- 1999:01:25.

Ha sido el evento más destructor en el Eje Cafetero y, quizás, el de mayores pérdidas en la historia de Colombia. Con magnitud 5,9 Mb, a menos de 20 km de profundidad, es el primer evento intraplaca que pone de manifiesto la amenaza que significan los numerosos tramos activos de fallas que atraviesan la región. En el Capítulo 5 trata este evento de manera más detenida.

#### **4.8 AMENAZA SÍSMICA.**

El tipo de fuentes sísmicas regionales, las magnitudes máximas probables para cada una y sus tasas promedio de recurrencia han llevado a considerar todo el Occidente de Colombia, y dentro de él a la zona de estudio, como la región de mayor amenaza. El "Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia", AIS (1996), ubica la zona como de Amenaza Alta, con valores de Aceleración Pico Efectiva (Aa), de 0,25 g. Por otro lado, la "Evaluación de la Amenaza Sísmica del Eje Cafetero", Monsalve et al., (2000), analizó la amenaza sísmica para los 26 municipios afectados por el sismo de 25 de enero de 1999, mostrando valores de aceleración pico efectiva (Aa), en roca, entre 0,23 y 0,36 g; para el departamento del Quindío el valor de Aa equivale a 0,28 g, según esta evaluación.

En la Figura 6 se ilustran los valores de Aa según la evaluación de Monsalve et al., (2000), complementada con epicentros de la red sismológica del SurOccidente del OSSO entre octubre de 1987 y diciembre de 2001.

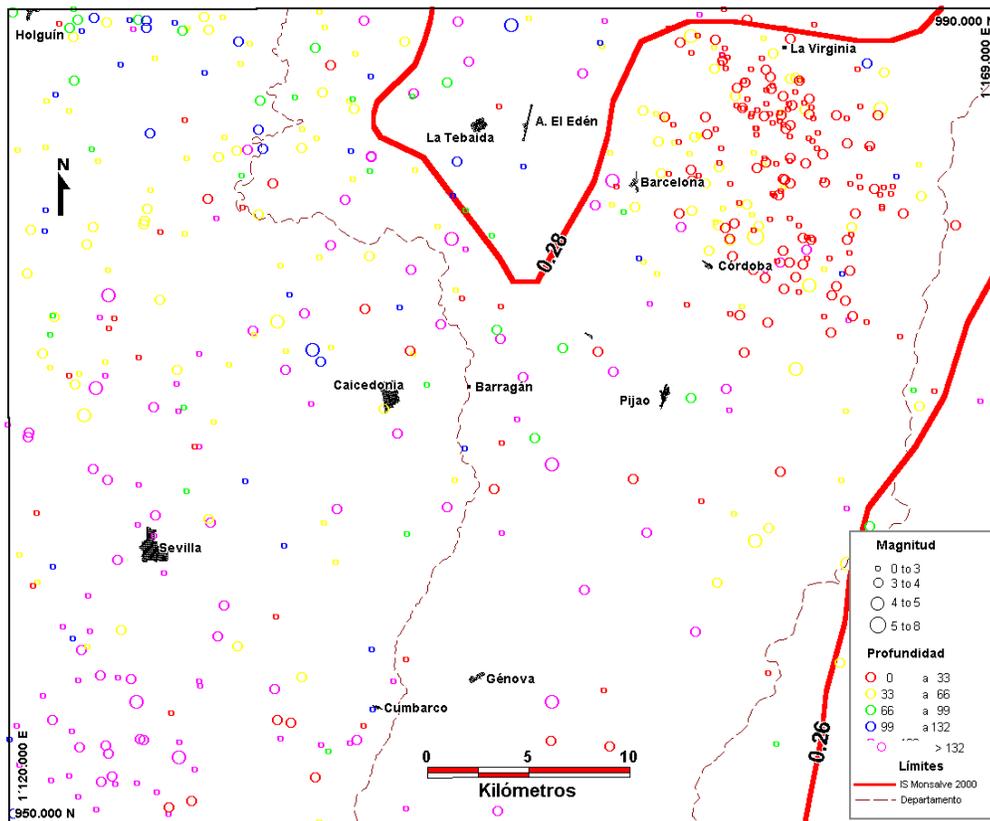


Figura 6. Sismicidad regional OSSO 1987 - 2001.

## **5. MOVIMIENTOS DE MASA EN EL EJE CAFETERO EN 1999.**

En el presente capítulo se tratan cuatro temas relevantes para los propósitos de este trabajo. En primer lugar, las características del terremoto del 25 de enero y sus efectos, en segundo las lluvias precedentes y posteriores al sismo, por sus implicaciones en la estabilidad de laderas, en tercer lugar los movimientos pre y postsísmicos y, en cuarto lugar, los movimientos de masa ocurridos 9 meses después del evento, en diciembre de 1999.

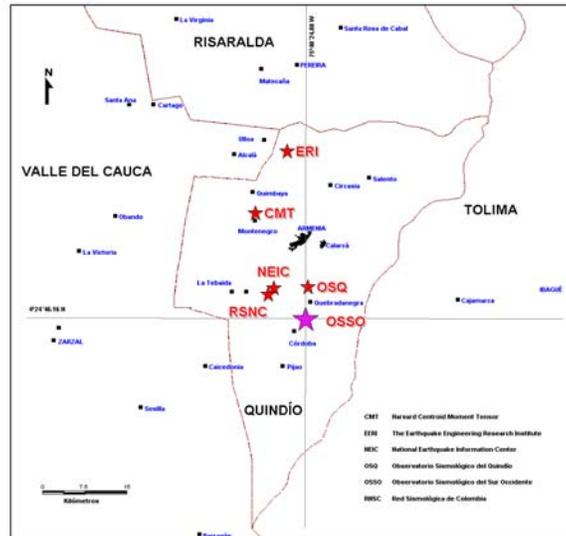
### **5.1 SISMO DEL EJE CAFETERO DEL 25 DE ENERO DE 1999.**

El evento principal ocurrió el 25 de enero de 1999 a las 18:19 UT (1:19 pm, hora local) y fue registrado por la Red Sismológica del Sur Occidente, la Red Sismológica Nacional de Colombia, el Observatorio Vulcanológico de Pasto y el Observatorio Vulcanológico de Manizales. Igualmente fue registrado por varias redes internacionales.

Varios de estos observatorios calcularon el epicentro, con diferencias debidas principalmente a la configuración de cada red sismológica y a los modelos de velocidad utilizados para el cálculo hipocentral. En la Tabla 5 se muestran algunos resultados (Figura 7).

**Tabla 5.** Parámetros epicentrales del evento principal.

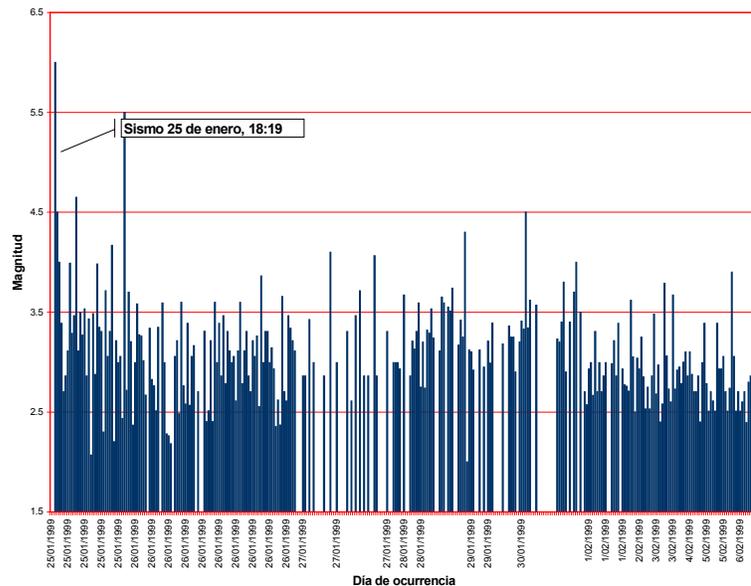
Latitud N	Longitud W	Prof. Km.	Magnitud	Localización	Fuente
4.41	75.67	34	5.9 Mb	2 km al NE de Córdoba	OSSO
4.45	75.73	10	6.2 Mb	6 km al SE de La Tebaida	RNSC
4.58	75.75	27.7	6.1 Mb?	4 km al SE de Quimbaya	CMT
4.68	75.7	49.0	6.1 Mw	9 km al NW de Circasia	ERI
4.46	75.72	17	5.8 Mb	7 km al NE de La Tebaida	NEIC
4.465	75.669	18.6	--	8 km al SE de Armenia	RSREC



**Figura 7.** Epicentros sismo 25 de enero de 1999.

### 5.1.1 Análisis de réplicas.

El sismo generó miles de réplicas, que paulatinamente fueron disminuyendo en tamaño y número. El proceso aún continuaba a finales del 2001. En la Figura 8 se ilustra la distribución de réplicas hasta principios de mayo de 1999.



**Figura 8.** Distribución temporal de réplicas 25/01/1999 - 05/02/1999 (OSSO).

INGEOMINAS reportó 300 réplicas registradas por la red nacional entre la fecha del evento y el 21 de junio de 1999 y concluyó que "el episodio de réplicas se extendió por un área de 120 km<sup>2</sup>, de aproximadamente 14 km de largo en la dirección N-S por 4 km de ancho en la dirección E-W, con una orientación del área de réplicas N 10° – 15° E. Las profundidades varían entre 0.1 y 25 km, concentrándose entre 10 y 20 km sobre las trazas de las fallas Córdoba y Navarco y, en menor grado, sobre las trazas de las fallas Silvia – Pijao, Romeral y Armenia (INGEOMINAS, 2000c). La Red Sismológica del Eje Cafetero registró 8906 eventos con magnitudes mayores a 1.29 en la escala de Richter entre enero de 1999 y marzo 28 del 2001, destacándose que entre enero 25 y abril de 1999 ocurrieron 2338 eventos (OSQ, 2001).

La réplica principal ocurrió el día 25 de enero, a las 22:40 UT (5:40 p.m. LT) y fue localizada aproximadamente 5 km al suroeste de Córdoba (Lat N 4.391, Lon W 75.636), a una profundidad de 10 km (Com Personal, OSQ 5 de febrero, 2001), con magnitud 5.5 Mb (NEIC, 1999), localizada por varios observatorios según datos de la Tabla 6.

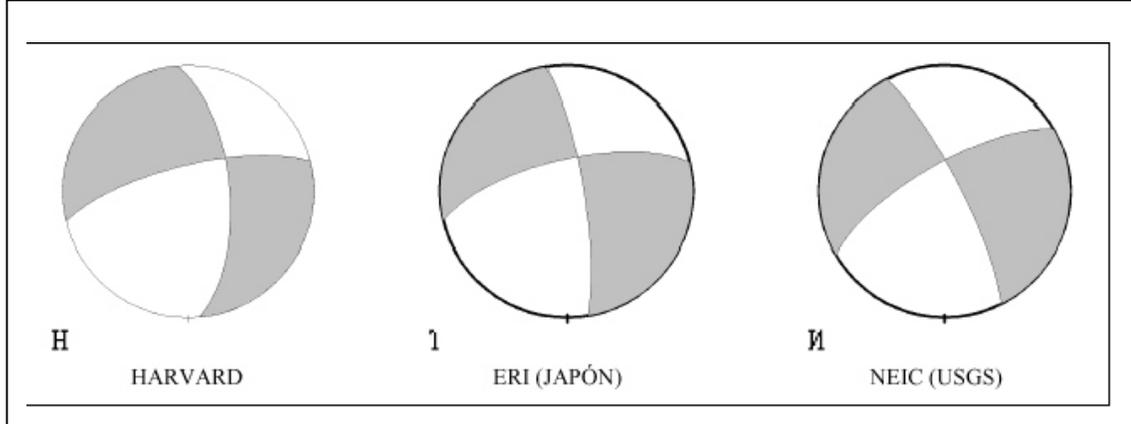
**Tabla 6.** Parámetros epicentrales réplica principal.

Latitud N	Longitud W	Prof. Km	Magnitud	Localización	Fuente
4.39	75.72	± 10	5.8	3 km al Sur Occidente de Córdoba	RNSC
4.31	75.74	33.8	5.5 Mb	4 km al Sur Occidente de Pijao	CMT
4.37	75.68	10	5.5 Mb; 4.7 Ms	2 km al Sur Este de Córdoba	NEIC

### 5.1.2 Mecanismos focales.

Para el sismo principal diversas agencias internacionales calcularon el mecanismo focal como se ilustra en la Figura 9. Las soluciones permiten dos interpretaciones. La primera, una falla de dirección general NNW con movimiento lateral derecho y la segunda una estructura ENE con componente lateral izquierdo INGEOMINAS (2000), obtuvo una solución de rumbo N40°E, con buzamiento 85°SE y deslizamiento -20.

Cálculos posteriores del mecanismo focal y de las réplicas del sismo, usando datos de la red local instalada por INGEOMINAS junto con CRQ para el monitoreo del sismo, indican que la fuente corresponde a un plano de falla con rumbo NE, buzamiento al NW y movimiento sinistral con componente inversa, concluyendo que el sismo está asociado a un proceso complejo relacionado con las fallas de Córdoba y Navarco, detenido en una barrera creada por lineamientos SE-NW. La sismicidad asociada a otras fallas no tiene características de réplicas, sino que parece ser generada por el desequilibrio del régimen de esfuerzos local ocasionado por el sismo principal. Finalmente, INGEOMINAS (2000), recomendó realizar un estudio más detenido a las estructuras orientadas SE-NW en el área.



**Figura 9.** Mecanismos focales de para el evento principal del 25 de enero de 1999.

INGEOMINAS (2000c).

### 5.1.3 Aceleraciones.

El sismo del Eje Cafetero fue registrado por 36 estaciones de la red de acelerógrafos del INGEOMINAS, 22 se ubican en roca, 13 en suelo y 1 en roca y suelo. Dos de éstas estaciones se encuentran en el Departamento del Quindío: CARME en Armenia y CFLAN en Filandia, emplazadas en suelo. La estación más cercana al epicentro es CARME, localizada a 13 km del epicentro. La estación en roca más cercana es CBOCA, en Pereira, a 42 km del epicentro. En la Tabla 7 se muestran las aceleraciones máximas registradas.

Las máximas aceleraciones horizontales se registraron en la estación CFLAN en la componentes E- W, y en CARME, en la componente vertical y en la N - S. Para la réplica principal las máximas aceleraciones se registraron en la estación CARME: Z 116,2 cm/s<sup>2</sup>, EW 102,90 cm/s<sup>2</sup> y NS 142,1 cm/s<sup>2</sup> (INGEOMINAS, 2000c).

CARDER (1999a), con una red de acelerógrafos en operación desde 1997, estimó la aceleración máxima del evento principal en 95,90 cm/s<sup>2</sup> sobre roca, siendo la mayor registrada en Risaralda. La duración del evento fue entre 14 y 20 segundos; las velocidades máximas oscilaron entre 13,6 y 36 cm/s, en suelo y 3,2 y 4,1 cm/s en

roca; los desplazamientos máximos entre 1,85 y 4,3 cm en suelo y 0,6 y 1,6 cm en roca y los periodos fundamentales entre 0,6 y 0,8 s.

**Tabla 7.** Aceleraciones máximas del evento principal.

Estación	Departamento	Lat. N	Lon. W	Aceleración Máxima (cm/s <sup>2</sup> )		
				E – W	VERT.	N - S
CARME	Quindío	4.55	75.66	518.40	448.20	580.10
CFLAN	Quindío	4.69	75.62	554.90	182.20	477.80
CBOCA	Risaralda	4.78	75.84	82.74	27.49	49.00
CPER2	Risaralda	4.84	75.75	207.80	95.84	141.50
CMAN1	Caldas	5.02	75.42	85.91	57.20	102.50
CTOCH	Valle	3.65	76.09	3.58	2.80	2.72
CVHER	Tolima	5.04	75.12	6.47	12.02	5.41
CFILA	Caldas	5.30	75.57	8.85	5.26	9.64

INGEOMINAS (2000c).

#### 5.1.4 Macrosísmica del 25 de enero de 1999.

El sismo del Eje Cafetero ocasionó efectos en 35 municipios de los departamentos del Quindío, Risaralda, Caldas, Valle y Tolima, donde habitaban aproximadamente un millón y medio de personas (DANE, 1999).

Se contabilizaron 35 972 viviendas destruidas o inhabitables y 43 476 afectadas parcialmente, 55 establecimientos educativos destruidos y 72 averiados. Se contabilizaron 9378 propiedades<sup>2</sup> destruidas (DANE, 1999).

Las pérdidas directas e indirectas, incluyendo efectos sobre fincas cafeteras fueron de US\$1800 millones que representa el 1.5 % del PIB del país (Geohazards, 1999). Sin

---

<sup>2</sup> Se refiere a locales, comercios, fábricas, vehículos y otros bienes.

embargo, la Comisión Económica para América Latina - CEPAL, calculó pérdidas por US\$ 2200 millones, equivalentes al 2.2 % del PIB de Colombia en 1998 (CEPAL, 1999)

En muchas de las poblaciones en la región epicentral se vieron afectadas ó destruidas las edificaciones esenciales, incluyendo centros de salud, sedes de policía, bomberos, escuelas, alcaldías, iglesias, centros comunales, lo mismo que infraestructura básica de servicios públicos: telecomunicaciones, acueducto, alcantarillado y energía. Además, numerosos movimientos de masa obstruyeron las vías de acceso a los municipios e interrumpieron innumerables vías veredales lo cual, sumado al colapso de las instituciones administrativas, complicó la respuesta a la emergencia.

La mayoría de los daños ocasionados por el sismo se asociaron a edificaciones construídas antes del Código Colombiano de Sismorresistencia y a la edad y calidad de las construcciones (ITC, 2000; INGEOMINAS, 2000c; CARDER, 1999a; DANE, 1999) .

No se encontraron estadísticas unificadas de daños y pérdidas pues cada fuente maneja sus propias cifras, pero se puede concluir que, dada la dimensión de los efectos, el este sismo fue uno de los eventos más destructores del ultimo siglo en Colombia. Las lecciones aprendidas de este desastre son insumo importante para aplicarlas a los planes de desarrollo de las ciudades del país, de tal manera que en futuros eventos una adecuada política de gestión de riesgos contribuya a disminuir los niveles de afectación y pérdidas.

Para los fines de este estudio se acopió información macrosísmica con énfasis en los efectos geológicos, principlamente movimientos de masa, que se encuentran tabulados y clasificados, hasta donde fue posible, en el Anexo E. Adicionalmente, los datos obtenidos se tratan en el numeral 5.3.

## **5.2 ANÁLISIS DE LLUVIAS PRE Y POSTSISMO.**

Entre enero de 1998 y diciembre de 1999 las condiciones climáticas de El Niño<sup>3</sup>, que generan déficit de lluvias en Colombia, durante un evento El Niño, pasaron sin transición a un evento La Niña, con superavit de lluvias en la región andina (IDEAM, 2000). A continuación se presenta un resumen de la secuencia ENOS 1998 - 1999 a nivel global, la evaluación de este comportamiento en la región andina de Colombia y la posible correlación del evento global con la precipitación del Eje Cafetero entre diciembre de 1998 y diciembre de 1999. Se evalúa la cantidad de agua precipitada y su posible relación con los movimientos de masa ocurridos en la región entre el 25 de enero y el 27 de febrero de 1999, y el 25 de diciembre del mismo año.

### **5.2.1 Secuencia ENOS 1998 – 1999.**

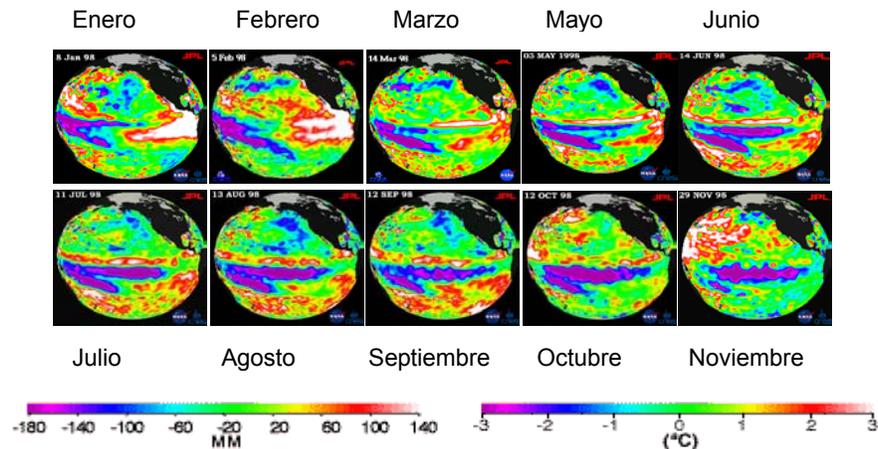
El fenómeno El Niño se manifiesta como un aumento del Nivel Medio del Mar (NMM) y de la Temperatura superficial de Mar (TSM) en el Pacífico Ecuatorial. Entre julio de 1997 y marzo de 1998 un evento El Niño catalogado como fuerte (NOAA, 2001), incrementó el NMM y la TSM en el Pacífico Occidental, hacia las costas de Suramérica, generando fuertes lluvias en las regiones desérticas y secas del Norte del Perú y sur del Ecuador. En Colombia el fenómeno se expresa, entre otros, como déficit de lluvias en la región Andina. El fenómeno contrario, La Niña, genera exceso de lluvias en Colombia (IDEAM, 2000).

- **1998.**

---

<sup>3</sup> El Niño Oscilación del Sur - ENOS (ENSO en inglés),

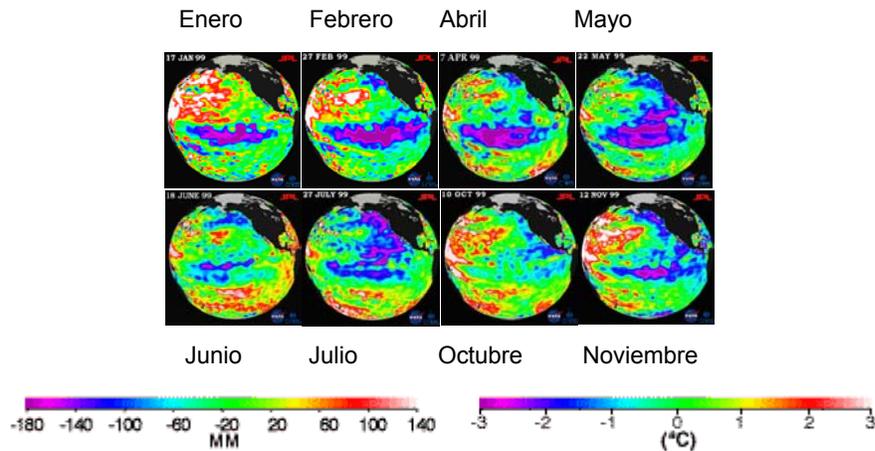
En las figuras siguientes se ilustra el comportamiento del NMM y de la TSM entre 1998 y 1999. Entre julio de 1997 y mayo de 1998 ocurrió un evento El Niño que, casi sin transición, en los primeros meses de 1998 pasó a condiciones La Niña. En mayo las condiciones del océano habían vuelto a la normalidad cerca de Suramérica, pero el Pacífico Oriental estuvo más frío que el promedio. En la Figura 10 las áreas blancas corresponden a los mayores valores del NMM y la TSM, todavía presentes frente a Suramérica en enero y febrero de 1998.



**Figura 10.** Secuencia ENOS 1998 (NOAA, 2001).

- **1999.**

Entre 1998 y 1999 los patrones de TSM y NMM estuvieron oscilando a lo largo del Pacífico. Para nuestro caso es relevante que durante febrero y noviembre de 1999 los patrones típicos de La Niña (áreas de color azul en la Figura 11), tuvieron la mayor extensión e intensidad cerca a las costas de Suramérica.



**Figura 11.** Secuencia ENOS 1999 (NOAA, 2001).

### 5.2.2 Precipitaciones en 1999 en la región Andina de Colombia.

Según el IDEAM<sup>4</sup>, en el informe climático de 1999 para la región, en el primero y los dos últimos bimestres de 1999 ocurrieron lluvias por encima de lo normal, asociadas con el fenómeno La Niña y se registraron excedentes de humedad en el sistema vegetación – suelo.

En enero, a causa del sismo del 25, se declaró el estado de emergencia, fecha en la cual los acumulados de humedad habían alcanzado niveles muy altos, en algunos casos sobrepasado el acumulado medio anual de este trimestre; en septiembre los volúmenes excedieron a los promedios históricos y en diciembre hubo gran frecuencia de movimientos de masa asociados a lluvias y a formaciones superficiales altamente porosas: suelos residuales arenosos, cenizas volcánicas, rocas altamente meteorizadas de diferente composición y origen (IDEAM, 1999).

---

<sup>4</sup> IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia.

### 5.2.3 Precipitaciones diciembre de 1998 a diciembre de 1999 en el Eje Cafetero.

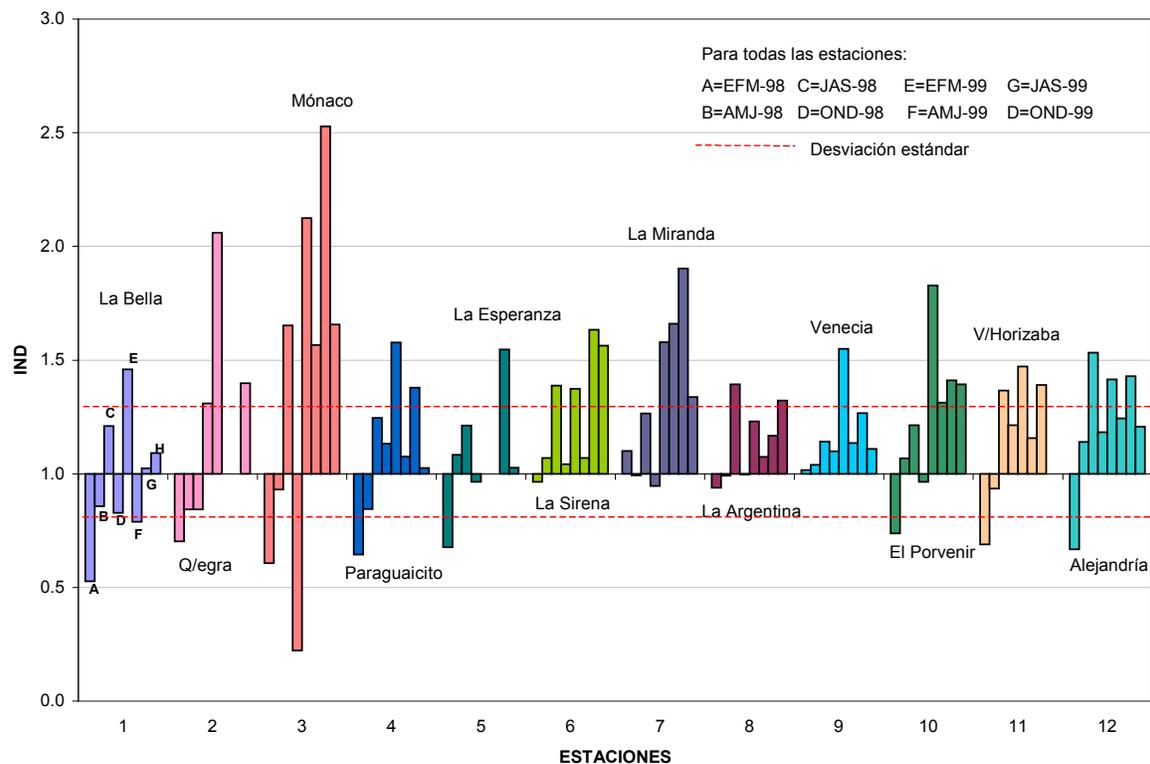
Para contribuir a la comprensión de los fenómenos de remoción en masa en la zona de interés, se buscó información hidrometeorológica. El Centro de Investigaciones CENICAFE<sup>5</sup> contribuyó con el suministro de series de precipitación, mensuales y diarias, de las cuales se seleccionaron 12 estaciones con el criterio de mayor cubrimiento temporal y continuidad de la información. Información sobre estas series y su tratamiento analítico y estadístico se encuentra en el Anexo C.

Para cada serie se calculó el valor promedio de la precipitación trimestral en 18 años (1980 – 1999). Así mismo, se evaluó la precipitación trimestral entre enero de 1998 (un año antes del sismo) y diciembre de 1999, mediante un indicador (*IND*) de correlación que compara la variación de la precipitación trimestral de este último periodo con el promedio trimestral multianual. Esto se expresa con la relación  $IND = \frac{P}{\bar{P}}$ , en donde *P* es la precipitación de cada trimestre (periodo 1998 - 1999) y  $\bar{P}$  es la precipitación promedio multianual del mismo trimestre. De esta manera,  $IND < 1$  significa que  $P < \bar{P}$ ;  $IND > 1$  significa que  $P > \bar{P}$  e  $IND \approx 1$  indica que  $P \approx \bar{P}$ .

En la Figura 12 se observa, a primera vista, que durante los trimestres de 1998 las precipitaciones estuvieron alrededor del promedio multianual, con variaciones que superan la desviación estandar en algunos trimestres y estaciones, mientras que durante 1999 ningún trimestre en ninguna estación tuvo déficit, fue un año con lluvias por encima del promedio, en muchos casos aún por encima de la desviación estandar. En otras palabras, se muestra lo que parece ser una correlación positiva con la condición global La Niña. El 75% de los datos reflejan lluvias por encima del promedio en por lo menos 5 de los 6 trimestres considerados como La Niña por la NOAA (2001).

---

<sup>5</sup> CENICAFE: Centro Nacional de Investigación del Café (Colombia).



**Figura 12.** Índice de precipitación para 12 estaciones entre 1998 y 1999.

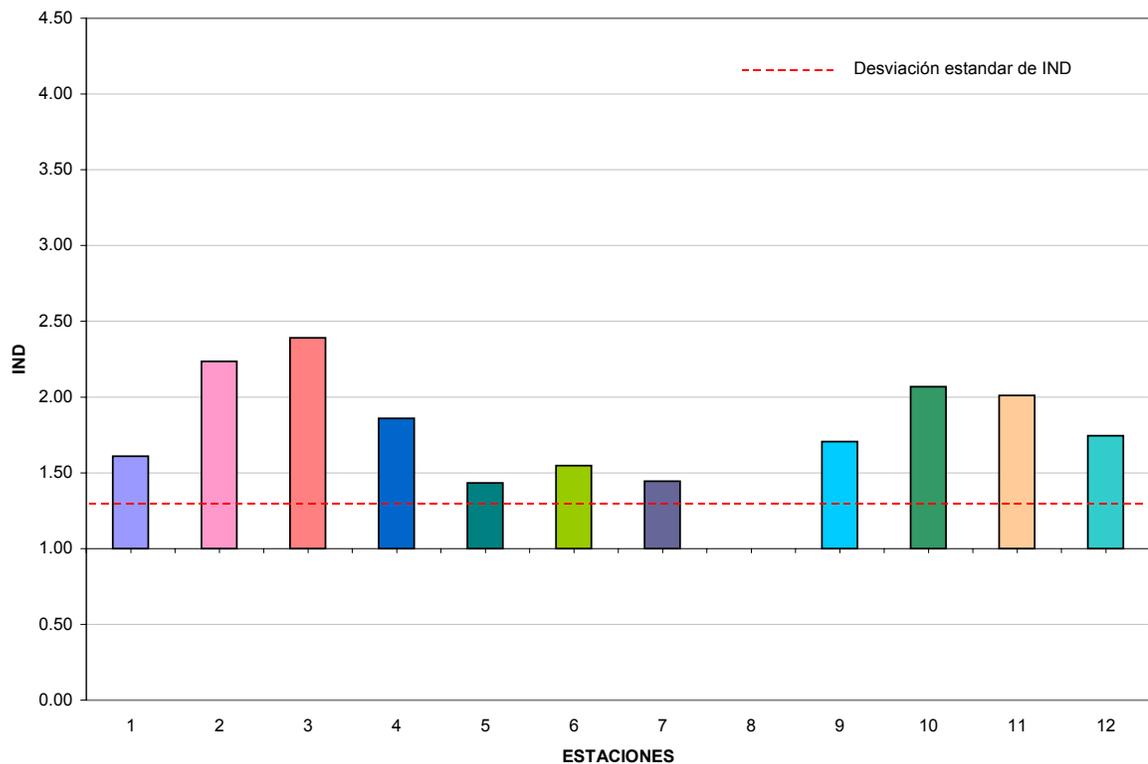
### 5.2.4 Precipitaciones y movimientos de masa en 1999.

De una manera más detallada se evaluaron las lluvias entre diciembre de 1998, antes del sismo y febrero de 1999, lo mismo que las de diciembre de este año. En primer lugar se calculó la precipitación acumulada por estación del trimestre diciembre de 1998 a febrero de 1999 (Figura 13), y para el periodo diciembre primero a enero 25 (Figura 14).

Los datos de este periodo indican que en el mes y 25 días precedentes al terremoto las precipitaciones se encontraban alrededor del promedio histórico, sin superar en ningún caso la desviación estandar (Figura 14).

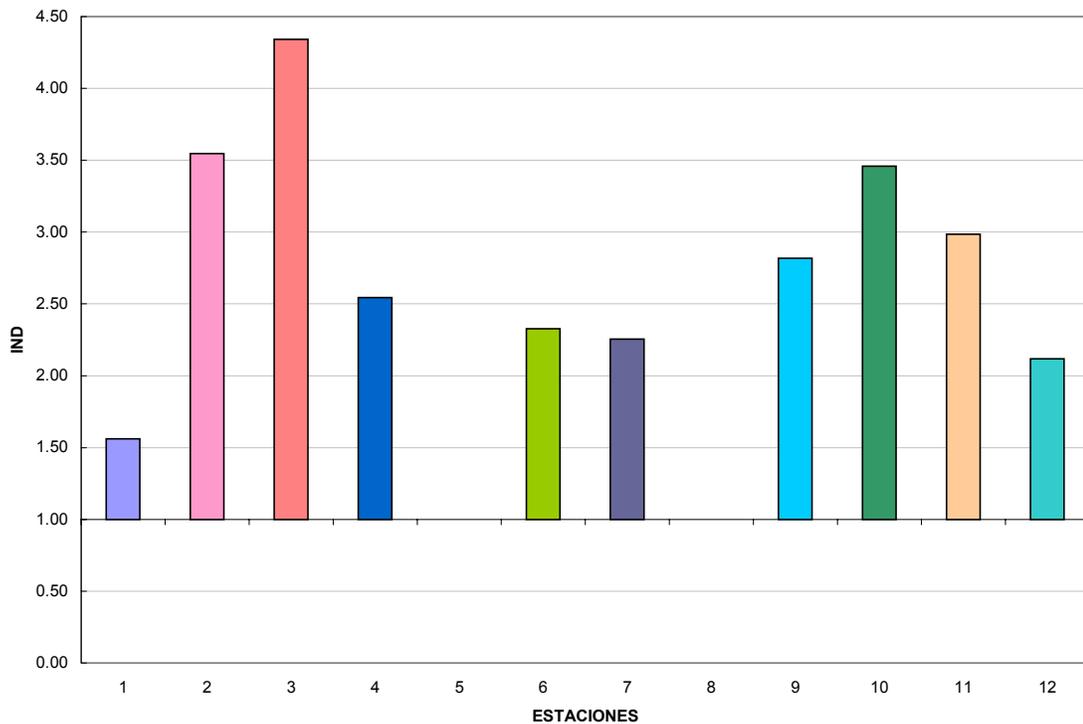
En segundo lugar, debido a la ocurrencia de múltiples movimientos de masa durante febrero y diciembre de 1999, para cada estación se calculó el promedio histórico, comparándolo con la precipitación de los dos meses en cuestión (Figura 15). En este caso el índice se llamó  $IND_m$  (Índice del mes),  $P$  es la precipitación del mes y  $\bar{P}$  es la precipitación promedio del mismo mes. Finalmente, se calcularon las curvas de masa del trimestre diciembre de 1998 a febrero de 1999 y del mes de diciembre de 1999 (Figuras 16 y 17).

En la Figura 13 se observa que en la región hubo exceso de precipitación en el trimestre DEF (98 – 99). En las once estaciones con datos se superó la desviación estandar del promedio multianual y en cuatro de ellas las lluvias duplicaron el promedio.



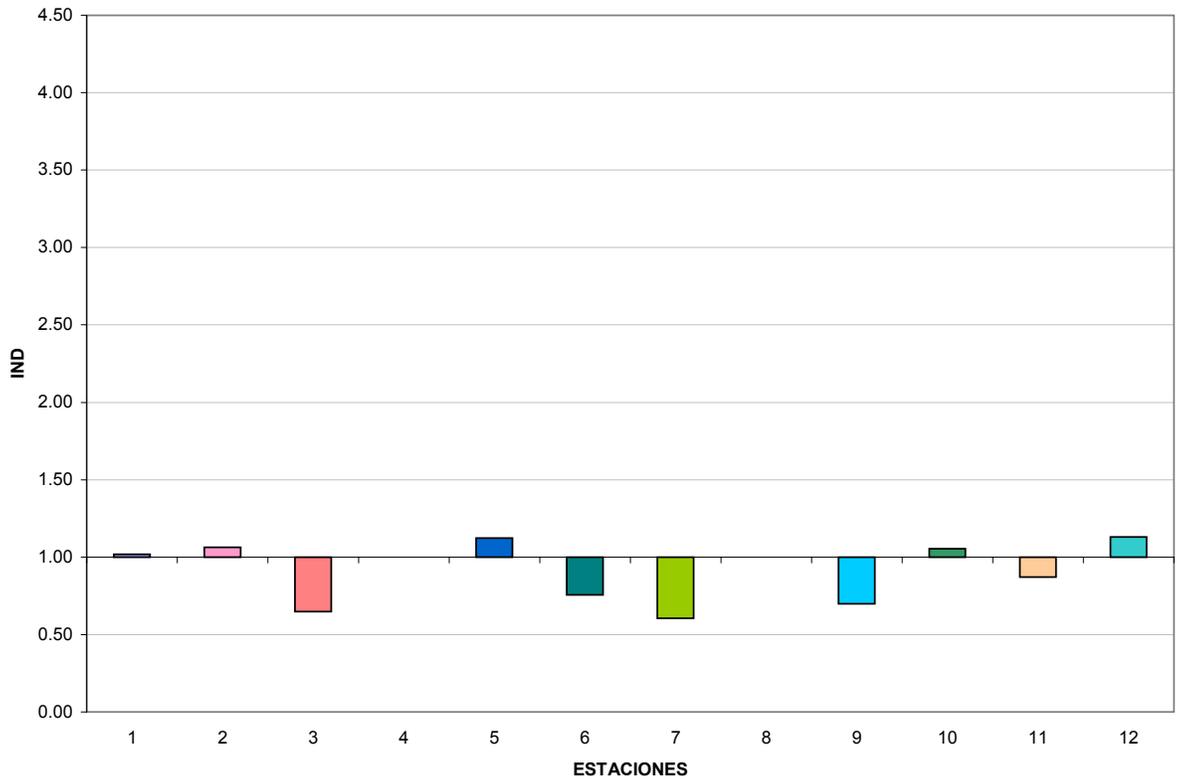
**Figura 13.** Precipitación acumulada del trimestre diciembre de 1998 a febrero de 1999 con respecto al promedio multianual (18 años) del mismo trimestre.

En la Figura 14 se observa que a la altura del 25 de enero de 1999, día del evento sísmico, la precipitación se encontraba muy cerca del promedio. El 50 % de las estaciones con datos reflejaban precipitaciones por encima de este promedio, y eran superiores solo entre un 10 y un 20 % máximo. El 50 % restante mostraba precipitaciones por debajo del promedio, entre un 20 y un 40 %.



**Figura 14.** Precipitación acumulada diciembre de 1998 al 25 de enero de 1999, con respecto a la precipitación promedio multianual (18 años), del mismo periodo.

En la Figura 15 se observa que en el mes de febrero hubo un exceso de precipitación que en el 90 % de las estaciones con información por lo menos duplicó el volumen normal, casi lo cuadruplicó en algunos casos y en un caso casi lo quintuplicó. Al parecer las lluvias críticas del trimestre DEF ocurrieron entre la última semana de enero y el mes de febrero de 1999. Estos exagerados volúmenes de precipitación en febrero guardan correlación positiva con el evento global La Niña que, como se observa en la Figura 12, parece haber influenciado el clima de la región.



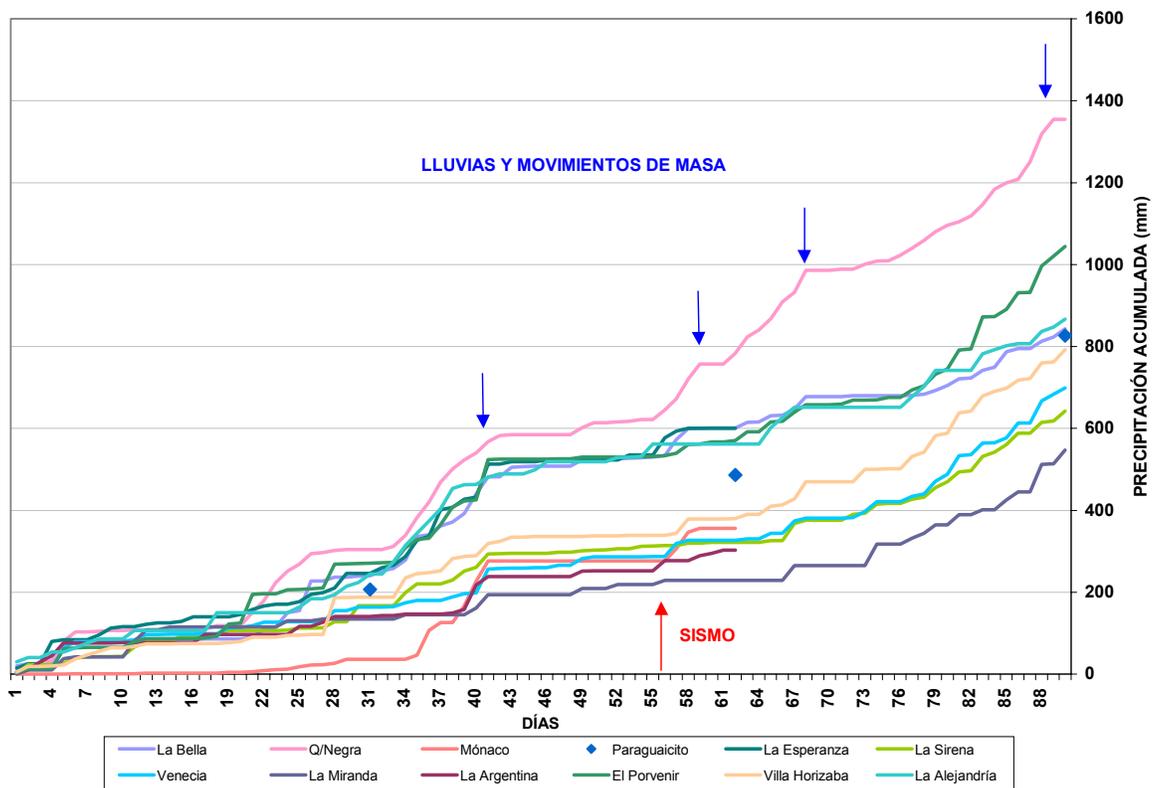
**Figura 15.** Variación de la precipitación de febrero de 1999 con respecto a la precipitación promedio (18 años) para este mes en el Eje Cafetero.

Las curvas de masa (Figura 16) reflejan el comportamiento regional, siempre creciente, de la precipitación en el trimestre DEF 98-99. Los puntos de cambio de pendiente de las curvas indican incremento en el volumen de la precipitación, en coincidencia con observaciones y reportes de numerosos movimientos de masa. En particular, el 27 de febrero ocurrió gran cantidad de flujos de lodo en el área epicentral (OSSO para SwissAid, 1999).

Las lluvias de enero ocurrieron principalmente entre el 4 y 10 (días 35 a 41 en la Figura 16), lo que sumado a los meses precedentes con exceso de precipitación ya presentados (Figura 13), permite suponer con buen grado de confianza que para el 25

de enero, día del terremoto, los terrenos de la región disponían de un alto contenido de humedad.

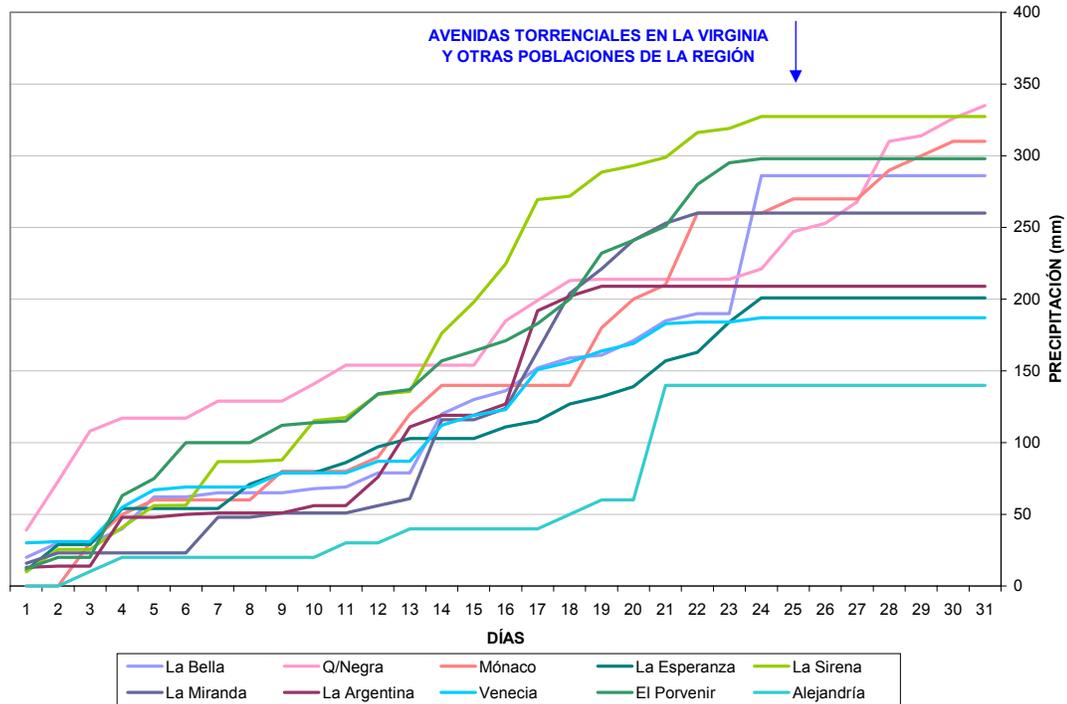
Desde finales de enero hasta mediados de febrero las lluvias se incrementaron y a ellas estuvieron asociados múltiples movimientos de masa, la mayoría como producto de remoción de movimientos cosísmicos. Sin embargo, para estos primeros días se dispuso de poca información confiable, porque todos los esfuerzos regionales se centraban en la atención posterremoto. A finales de febrero las lluvias aumentaron, con un pico el 27, fecha en la cual se reportaron múltiples movimientos de masa, incluidos numerosos flujos de lodo provenientes de masas de roca, saprolitos y cenizas volcánicas previamente saturados de agua (OSSO para SwissAid, 1999).



**Figura 16.** Curvas de masas trimestre DEF (1998 – 1999).

Los datos de lluvias de diciembre de 1999 muestran una tendencia al incremento, que hacia el 20 es común en casi todas las estaciones (Figura 17). Hacia el 24 y 25 de

diciembre ocurrieron intensas precipitaciones, localmente acompañadas con granizada, que generaron movimientos de masa y avenidas torrenciales que afectaron varios municipios de los departamentos del Quindío e incluso del Valle del Cauca.



**Figura 17.** Curva de masas diciembre de 1999, Eje Cafetero, zona de estudio.

### 5.3 MOVIMIENTOS DE MASA ENERO Y FEBRERO DE 1999.

El sismo del 25 de enero de 1999, que afectó a todo el departamento del Quindío, tuvo entre sus principales consecuencias disparar gran cantidad de movimientos de masa que obstruyeron las vías y afectaron cultivos y viviendas en las zonas rurales; produjo además agrietamientos y hundimientos distribuidos en la región epicentral.

Los movimientos de masa cósmicos se localizaron principalmente en los cortes de las vías y, en menor grado, en laderas naturales en las regiones más cercanas al epicentro. Los sitios críticos fueron, las vías Pijao - Río Verde, Río Verde - Córdoba, Río Verde - Calarcá, La Bella - Quebradanegra, La Tebaida - Montenegro y Armenia - La Línea.

Y corresponden principalmente a suelo residual y suelos volcánicos. (INGEOMINAS, 1999i). Se estimó, a partir de observaciones de campo en la región epicentral, un área máxima afectada por movimientos de masa de 1402 km<sup>2</sup>, hasta una distancia máxima, aproximada, de 30 km del epicentro (ver el mapa 14 en el anexo A).

Los agrietamientos cosísmicos se encontraron en la vías Pijao - Río Verde, Barragán - Calarcá, Río Verde - Córdoba, La Bella - Quebradanegra y Armenia - La Línea. (INGEOMINAS, 1999i).

Estos agrietamientos unidos al fuerte invierno post - sismo en la región, desencadenaron un mayor número de movimientos de masa. Forero (2000) afirma que el sismo aceleró la formación o apertura de grietas de tracción en la corona de los taludes de manera que si bien no se produjo la falla inmediata, si ocurrieron movimientos de masa posteriores, asociados a las intensas lluvias que cayeron luego del terremoto. FORERO (2000) e INGEOMINAS (1999i), concluyen que el sismo principal produjo la falla incipiente de laderas en numerosos sitios, especialmente cerca a la zona epicentral y en inmediaciones de la posible línea de ruptura sísmica, que fueron convertidos en movimientos de masa con las fuertes lluvias ocurridas en las horas de la tarde y noche de los días 25, 26 y 27 de enero.

Las lluvias de febrero dispararon un gran número movimientos de masa asociados a los agrietamientos cosísmicos, además de avenidas torrenciales, que afectaron carreteras y cultivos.

El Observatorio Sismológico del Suroccidente, envió dos comisiones a la región epicentral, evaluar los efectos en la región. (Ver Anexo E). Una comisión se desplazó a la Provincia Campesina de Enterríos, compuesta por 8 veredas de los municipios de Córdoba y Calarcá. La otra, conformada por 3 grupos de estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle, recorrieron la región epicentral identificando los efectos en viviendas, movimientos de masa y agrietamientos. Se identificaron 4 tipos de efectos

geológicos: movimientos de masa, agrietamientos, hundimientos y nacimientos de agua:

### **5.3.1 Movimientos de masa.**

Se inventariaron 194 movimientos de masa, de los cuales 53 son cosísmicos y 81 postsísmicos; 57 de ellos se produjeron el 27 de febrero de 1999. No se tiene fecha de ocurrencia para 49 eventos postsísmicos, ni para 11 previos (ver mapa 12 en el anexo A). La mayoría de los movimientos de masa inventariados desplazaron cenizas volcánicas y saprolitos y afectaron viviendas, vías veredales y cultivos.

El 27 de febrero se produjeron en la región varios flujos y avenidas torrenciales, como consecuencia de las fuertes lluvias; los terrenos más afectados estaban compuestos en su mayoría de suelo orgánico, cenizas, depósitos aluviales y fluviovolcánicos. Algunos de ellos se generaron a partir de agrietamientos cosísmicos de las laderas que afectaron las vías y algunas fincas (ver mapa 13 en el anexo A).

### **5.3.2 Agrietamientos.**

Se inventariaron 110 agrietamientos cosísmicos, la mayoría en cenizas volcánicas. Los agrietamientos son importantes, pues podrían desencadenar movimientos de masa bajo la influencia de algún factor desestabilizador de la ladera. En la región epicentral los agrietamientos se observaron cerca de la cima de filos alargados y paralelos a los mismos, con longitudes de hasta decenas de metros.

### **5.3.3 Hundimientos.**

Se inventariaron 24 hundimientos cosísmicos, algunos asociados a nacimientos de agua y/o colapso de paredes de antiguos entierros indígenas.

#### **5.3.4 Nacimientos de agua.**

Se documentaron 15 efectos en la Provincia Campesina de Entrerrios, notándose que el más frecuente fue la generación de nuevos afloramientos de agua (11), lo que indica cambios en el régimen de aguas subterráneas de la región. Hubo tres casos de desaparición de nacimientos de agua y uno caso de disminución del caudal (OSSO para SwissAid, 1999).

#### **5.4 MOVIMIENTOS DE MASA EN DICIEMBRE DE 1999.**

Como ya se mencionó en el numeral 5.2.4, el 24 y 25 de diciembre de 1999 ocurrieron movimientos de masa que afectaron varios municipios de la región. Los movimientos no fueron exclusivos de la zona de estudio, sino que se extendieron regionalmente, asociados a lluvias en gran parte de la región Andina. Hubo avenidas torrenciales en la cuenca del río Palo en el Cauca (IDEAM, 1999); desbordamientos y avenidas torrenciales en los ríos Bolo, Amaime, Nima, Desbaratado, Guadalajara y Guabas (Valle del Cauca). En general, se reportaron avenidas torrenciales, inundaciones y movimientos de masa, en los departamentos de Nariño, Cundinamarca, Cauca, Valle del Cauca, Huila, Tolima y en el Eje Cafetero (EL TIEMPO, diciembre, 1999).

En el Quindío los días 24, 25 y 26 de diciembre ocurrieron avenidas torrenciales que afectaron al corregimiento de La Virginia, municipio de Calarcá, y represaron el Río Santo Domingo. La intensidad de esos eventos se asoció con la inestabilidad de las laderas inducida por el sismo de enero de 1999 y las fuertes lluvias de diciembre (INGEOMINAS, 1999, trabajo de campo marzo 2000).

El corregimiento La Virginia, se localiza 4 km al suroriente de la cabecera municipal. Al oriente del corregimiento se ubica la cuchilla Alto El Taburete donde nacen las quebradas El Salado, El Taburete, El Espartillal, El Cofre y El Brasil, las cuales atraviesan el poblado.

Según la información recogida de periódicos (La Cronica, La Tarde y El Tiempo diciembre, 1999), los flujos destruyeron 10 viviendas, 4 puentes, el acueducto de La Virginia y el nuevo centro de salud; 60 viviendas y el colegio Jesús María Morales fueron averiados; 68 veredas quedaron incomunicadas; la producción agrícola fue afectada en un 40 % y 400 familias resultaron damnificadas.

Observaciones y reportes de pobladores (trabajo de campo, marzo del 2000), indican que luego del sismo del 25 de enero se produjeron grietas en la laderas y cerca a los cauces de las quebradas a partir de las cuales, y por efecto de las lluvias, ocurrieron deslizamientos que, a su vez, indujeron las avenidas torrenciales del 24 y 25 de diciembre. Los pobladores informaron que el 24 de diciembre, aproximadamente entre las 3:00 p.m. y las 4:00 p.m., hubo una granizada que alcanzó una altura de 5 cm en la población. El granizo permaneció en las laderas y se notaba todavía el 25 de diciembre. En la madrugada del 25 de diciembre ocurrió la primera avenida, y a las once de la noche del mismo día bajó una segunda avenida mucho más fuerte, que causó muchas de las averías. "La avenida bajo en 5 "pulsos", la tierra cimbraba y se oía un ruido muy fuerte, la avenida cubrió uno de los puentes del corregimiento" afirmó un residente.

INGEOMINAS (2000p), describió el fenómeno como caída de bloques de rocas cizalladas, falla de taludes de suelo residual, saprolito y algo de cenizas volcánicas, inicio de movimientos y creación de presas naturales, ruptura de presas e iniciación del ahondamiento del cauce de 15 a 20 metros, y del descenso rápido del material. Durante el fenómeno se cree que "ocurrió una transición entre deslizamientos, caída de rocas y bloque, avalancha y al final flujos intermitentes".

Según periódicos (La Cronica, La Tarde y El Tiempo, diciembre, 1999) se presentaron efectos por las lluvias del mes de diciembre en Pijao, afectado por el represamiento del río Verde; en Buenavista por el represamiento de la Quebrada Sardineras y en la Vereda Planadas, en Calarcá, por el represamiento del río Santo Domingo.

## 6. MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASA EN EL EJE CAFETERO.

En este Capítulo se describe brevemente la metodología adoptada y se presentan las variables físico – naturales utilizadas para el modelamiento de la susceptibilidad. Cada variable (pendientes, humedad y geología) se trata individualmente mediante clasificaciones, para generar mapas que expresan su aporte a la susceptibilidad; a estos mapas se les denomina submodelos.

De manera independiente se generó un inventario georreferenciado de movimientos de masa, el cual se utilizó como modelo de referencia para evaluar, de manera semicuantitativa, la validez de cada submodelo.

Se generaron tres modelos de susceptibilidad así:

- **So (Modelo OSSO, 1995).** Aplicación, a la escala de este trabajo, del modelo propuesto por el OSSO (1995a, b), con las variables pendientes, humedad (derivada de isohietas) y geología.
- **Som (Modelo OSSO Modificado).** Es desarrollado en este trabajo con variaciones en la clasificación de rangos de pendiente y geología y con la generación de un submodelo de humedad a partir de zonas climáticas, las cuales a su vez se obtienen de la combinación de isohietas y pisos térmicos.

- **Sp** (Modelo Propuesto). A diferencia de Som, en el submodelo geológico se incluyen criterios estructurales lineales (fallas) y puntuales (foliación y estratificación). Las estructuras puntuales se regionalizaron según su tendencia en los tipos de unidades litológicas en donde dichas estructuras están cartografiadas, y se trataron en combinación con un submodelo de aspecto (orientación de la inclinación de las laderas).

Cada uno de los modelos fue evaluado, en términos de su capacidad de representar la susceptibilidad a los movimientos de masa, por comparación con la cartografía de referencia (inventario de movimientos de masa).

## **6.1 CONSIDERACIONES GENERALES.**

De acuerdo con la revisión de literatura sobre modelamiento de susceptibilidad a movimientos de masa (Capítulo 3), se adoptó la metodología *heurística* cuya elección estuvo fundamentada en la cantidad y calidad de información disponible y en el conocimiento tanto del fenómeno analizado como de la zona de estudio. Para el análisis de la susceptibilidad a movimientos de masa desde una perspectiva heurística, un territorio se zonifica con base en las apreciaciones y aportes de investigadores con experiencia y conocimiento del tema.

Específicamente se usó la técnica de combinación cualitativa de mapas para lo cual se generaron mapas parámetro, o de variables. Cada mapa parámetro fue dividido en rangos (áreas con similar susceptibilidad) a cada uno de los cuales se le asignó un peso indicativo de su grado de importancia. Los pesos menores corresponden a zonas de menor susceptibilidad, y viceversa.

La selección de escala de representación cartográfica y modelamiento de susceptibilidad estuvo regida por la escala de las fuentes de datos y por la calidad y cantidad de los mismos. La información básica y temática se obtuvo a diferentes escalas: planchas topográficas a escala 1:25 000, geología a escala 1:100 000 e isohietas a partir de series pluviométricas de 12 estaciones, complementadas con

isohietas a escala aproximada 1:300 000 (CVC, 1997). Para el modelamiento se consideró adecuada la escala 1:100 000.

## 6.2 DEFINICIÓN DE VARIABLES.

La ocurrencia de movimientos de masa está regida por la interacción de diversos factores propios de las laderas y de su entorno, como son las condiciones geomorfológicas, geológico estructurales, climatológicas y biológicas.

Con base en el carácter regional de este estudio, se eligieron las variables de susceptibilidad propuestas por Restrepo y Velásquez (1997). Ellos consideraron que a esta escala las pendientes (factor geomorfológico), el sustrato geológico (factor geológico – estructural) y la precipitación anual (factor climático), son suficientes para explicar la susceptibilidad a los movimientos de masa. En modelamientos de procesos a escalas locales se han usado otras variables como análisis de aguas subterráneas (Van Westen and Terlien, 1995), morfología del talud (González y Millán, 1998; Shuk, 1968, 1990), densidad y orden de drenaje superficial (Oliviera y Aguirre, 1991; González y Millán, 1998). Sin embargo, incluir estas variables en un modelo implica grados de detalle que hacen muy compleja una zonificación a escala regional.

**Pendientes.** Diversos autores han considerado esta variable como el factor fundamental en el análisis de susceptibilidad a movimientos de masa (p. ej. Restrepo y Velásquez, 1997; Mora y Vahrson, 1994; Van Westen and Terlien, 1995). Por otro lado, algunos autores incluyen también la rugosidad de las laderas como expresión de su grado de erosión y susceptibilidad a los movimientos de masa (p. ej. Mora y Vahrson, 1993, 1994).

**Humedad.** Considerada como el contenido de agua, implica que mayor humedad aumenta el peso de una ladera, disminuye la cohesión de los materiales y, por lo tanto, su resistencia al corte, lo cual influye en la susceptibilidad a los movimientos de masa.

**Geología.** Dependiendo de sus características texturales y mineralógicas cada unidad litológica es más o menos susceptible; sin embargo, también el fallamiento, estratificación y foliación afectan la estabilidad dependiendo del grado de fracturamiento que inducen sobre los materiales.

### **6.3 DEFINICIÓN DEL MODELO.**

Para representar la interacción de las diferentes variables seleccionadas (pendientes, humedad y geología), se usó la ecuación propuesta por Mora y Vahrson (1993), usada por el OSSO (1995 a, b), según el siguiente algoritmo:

$$**S = submodelo de pendientes x submodelo de humedad x submodelo de geología.**$$

En donde **S** es la susceptibilidad. Los submodelos de cada variable son los obtenidos a partir de clasificar los valores iniciales de las mismas. El modelo que se obtiene a partir de este algoritmo es reclasificado en rangos de importancia, asignándole a cada rango una valoración desde nula o muy baja hasta muy alta susceptibilidad, para obtener el modelo final.

Cada clasificación se hace con base en criterios expertos, en este caso con el apoyo de otras experiencias documentadas y en el análisis cualitativo de la distribución de los valores de las variables en el espacio.

### **6.4 LIMITACIONES DEL MODELAMIENTO.**

Cada uno de los puntos anteriores implica incertidumbres y limitaciones que se reflejan en el modelo final de susceptibilidad y que deben ser tenidas en cuenta al interpretar los resultados. Estas limitaciones son:

- Una aproximación heurística implica que la valoración de cada variable debe ser

ajustada a las condiciones específicas de cada región.

- En algunos de los submodelos de las variables no están representadas todas las clases de susceptibilidad. Esto se debe, principalmente, al grado de detalle de los datos de entrada; en trabajos posteriores la valoración de las variables puede ser ajustada o mejorada ojalá con el requisito de información más detallada.
- La escala de trabajo escogida (1:100 000), implica un bajo nivel de detalle. En los submodelos, las áreas de cada clase o rango representan tendencias regionales, en las cuales se generalizó y jerarquizó la influencia de cada variable a la ocurrencia de movimientos de masa. A esta escala el modelo final no da cuenta del tipo de movimiento de masa, sus dimensiones o daños esperados.

Otras limitaciones se describen adelante, en el contexto del análisis de cada variable.

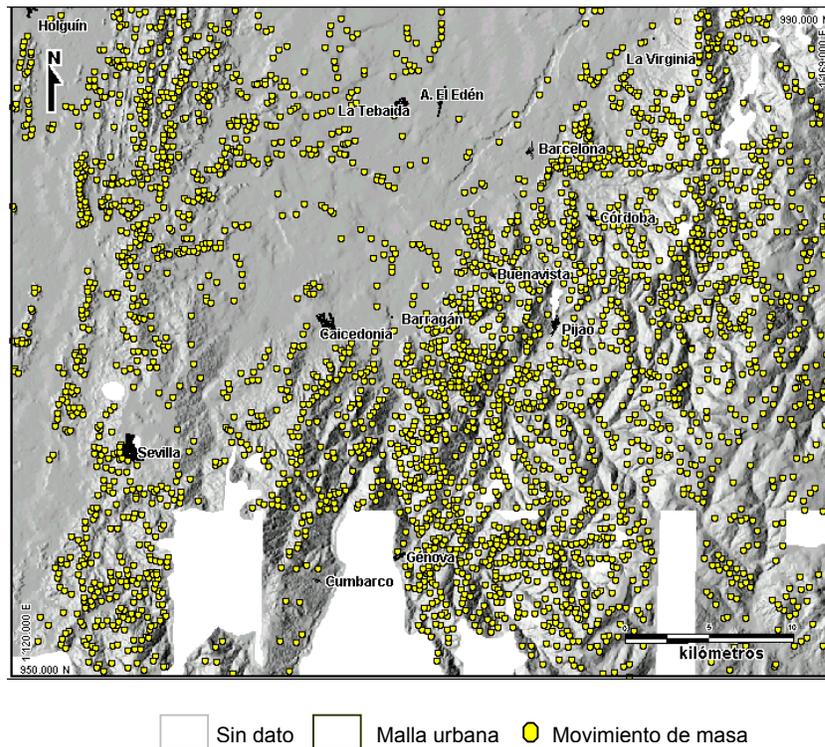
## **6.5 EVALUACIÓN DEL MODELAMIENTO.**

Se digitalizaron las curvas de nivel, drenajes y puntos de restitución aerofotogramétrica (vectores) de planchas en papel a escala 1:25 000, a partir de las cuales se generó un modelo de elevación digital, a partir del cual se generó un modelo de sombras (imagen raster), con azimut 280° y altura del sol 45° (3:00 p.m.). Sobre el modelo de sombras se identificaron anomalías en las laderas y valles de los ríos consistentes en geoformas cóncavas, generalmente en forma de incisiones, que se interpretaron como huellas de movimientos de masa.

El modelo de sombras se trabajó en formato digital en pantalla, asociado a un SIG, en áreas de 490 km<sup>2</sup> (un cuarto del área total de la zona de estudio), excluyendo los bordes y las áreas cubiertas de nubes en la cartografía original. El límite inferior de resolución del modelo de sombras está definido por la base cartográfica, lo que a la escala 1: 25 000 significa una resolución de pixel de 50 x 50 m.

Se obtuvieron tres interpretaciones independientes (las autoras y el director),

expresadas en tres poblaciones de movimientos de masa. Cada población se comparó con las demás resultando que, en general, en un 70 % se trataba de los mismos movimientos de masa identificados por cada participante y, que en el 30 % restante las tres poblaciones se complementaban. De esta manera se obtuvo un *inventario de 3044 huellas de movimientos de masa* distribuidas en la región, como se ilustra en la Figura 18.



**Figura 18.** Inventario de movimientos de masa.

El mapa obtenido se constituye en un modelo independiente obtenido por la metodología de inventarios de movimientos o de cartografía directa. Este inventario se comparó, mediante operaciones de cruce de imágenes y conteo de objetos comunes, con los resultados de cada submodelo, obteniendo de esta manera la densidad de ocurrencia por unidad de área con respecto a cada clase de susceptibilidad. Se espera que ocurran más movimientos de masa por unidad de área en zonas calificadas como de mayor susceptibilidad.

Esta comparación está limitada por la calidad (resolución espacial del modelo de sombras) del inventario de las huellas. Sin embargo, tratándose de un modelo regional se consideró que éste es un mapa de referencia (independiente de las variables de modelamiento consideradas), que permite una evaluación semicuantitativa de los submodelos y modelos.

## **6.6 SUBMODELO DE PENDIENTES.**

### **6.6.1 Base conceptual.**

De manera simplificada un movimiento de masa puede ser descrito como el desplazamiento hacia abajo de una masa de material sobre una ladera o talud (plano inclinado desde el punto de vista geométrico).

Choubey and Litoria (1990), desarrollaron un modelo de susceptibilidad en la India, para el cual definieron la rugosidad como una medida de la erosión o desgaste de las vertientes y la pendiente como la inclinación del talud. Mostraron que hay una correlación negativa entre rugosidad y talud: un talud más inclinado se encuentra menos erosionado que uno menos inclinado. Las pendientes de su zona de estudio estuvieron entre los 0 y los 60 grados (0 % a 133 %). Los autores dieron mayores pesos a las mayores pendientes (riscos y escarpes), lo mismo que a las menores (canales de los ríos), por considerarlos más sujetos a procesos erosivos.

Densmore and Hovius (2000), estudiaron cuál podría ser el mecanismo de control de erosión dominante entre sismos y tormentas, a partir de la medición probabilística de la morfología de las colinas de California (USA) y de la distribución del material deslizado. Encontraron que cada evento disparador actúa preferencialmente sobre una porción del talud: las lluvias actúan principalmente sobre las partes más bajas de las laderas y los sismos sobre las crestas (efecto topográfico). Hallaron una alta frecuencia de pendientes naturales superiores a 40 grados (89 %), sin movimientos de masa, en

áreas en las cuales ocurrieron movimientos de masa disparados por ambos mecanismos, lo cual significa que sobre estas pendientes son menos frecuentes los movimientos de masa.

Thomas (1994), reseña diversos estudios en Estados Unidos y en Japón que aportan a la relación entre movimientos de masa y pendientes. En síntesis, para Estados Unidos reporta que taludes menores o iguales a 20 grados (44 %) son aparentemente estables pero no pueden ser considerados 100 % seguros durante eventos extremos; taludes entre 26 y 28 grados (58 % a 62 %) se caracterizan por su gran inestabilidad; entre 38 y 50 grados (84 % a 111 %) son propicios (en Puerto Rico), para eventos de flujos de escombros. En el Japón son comunes en el rango de 35 a 40 grados (78 % a 89 %). En general, en roca madre pueden ocurrir deslizamientos planares en taludes de 40 a 50 grados (89 % a 111 %), mientras que pendientes más escarpadas pueden ser más o menos inestables, dependiendo de la profundidad del saprolito.

No obstante la importancia de estas investigaciones sobre la relación entre movimientos de masa y pendientes, no es apropiado generalizar los resultados para todos los ambientes climáticos.

Mora y Vahrson (1993, 1994) desarrollaron un modelo de amenaza para Costa Rica. Utilizan un concepto simplificado de la rugosidad del relieve que denominan Relieve

Relativo (Rr) o factor del relieve (Sr):  $Rr = \frac{\Delta h}{\text{área}}$ ; donde  $\Delta h$  es la máxima diferencia de

altura en metros por unidad de área. En la reclasificación del factor del relieve consideran que puede ser asignado el peso cero (0) a valores de rugosidad nula, pesos entre uno y cuatro a rugosidades en el rango de 0 a 800 m/km<sup>2</sup> y peso cinco a rugosidades mayores a 800 m/km<sup>2</sup>. En la evaluación de los movimientos de masa disparados por el terremoto de Limón (el 69 % fueron movimientos de masa del horizonte regolítico y el 20 % desprendimientos y deslizamientos (sic) de masas rocosas), en este caso encontraron que las mayores destrucciones por deslizamientos ocurrieron en áreas con rugosidades superiores a los 970 m/km<sup>2</sup>. Concluyen que en

Costa Rica la ocurrencia de movimientos de masa crece de manera exponencial y en relación directa con la rugosidad del relieve.

Sin embargo, Felicísimo (1999), señala que todavía no hay consenso en la definición y uso del concepto de rugosidad, el cual es trabajado principalmente por investigadores dedicados a modelos digitales del terreno.

Olivera y Aguirre (1991), evaluaron la susceptibilidad a la ocurrencia de eventos modeladores del relieve a partir del análisis de frecuencia de movimientos de masa con respecto a las pendientes, erosión hídrica e inundaciones, utilizando 133 casos ocurridos en el departamento de Cundinamarca, Colombia. A los movimientos de masa tipo deslizamientos, carcavamientos y otros que llamaron movimientos de masa no diferenciados, les asignaron los siguientes niveles de susceptibilidad: Alto a pendientes de 5 a 16 grados (del 12 % al 35 %), Medio a pendientes de 1 a 5 y de 16 a 23 grados (del 35 % al 12 % y del 35 % al 50 %) y Bajo a pendientes de 0 a 5 y mayores a 23 grados (del 0 % al 12 % y mayores al 35 %).

Millán y Vesga (1998) y González y Millán (1998), analizaron una muestra de 422 movimientos de masa (caídas, flujos, hundimientos y reptación), recolectada a partir de archivos de prensa (1921 a 1997); reportan que franjas urbanas subnormales instaladas sobre laderas de pendiente moderada actúan como un importante agente erosivo preparador de inestabilidad. Los autores no especifican cuales son las pendientes moderadas.

Van Westen and Terlien (1996), para determinar la probabilidad de falla y el factor de seguridad promedio de taludes para la ciudad de Manizales, usaron un modelo determinístico unidimensional (modelo de talud infinito) y encontraron que la mayoría de movimientos de masa ocurren en pendientes poco mayores a 25 grados (56 %), con superficies de desgarre a profundidades entre 1 y 10 m.

INGEOMINAS y la Corporación Nasa Kiwe (1994), a raíz del sismo de Páez (Cauca) del 6 de junio de 1994, identificaron gran cantidad de movimientos de masa en pendientes mayores a los 25 grados (56 %) y flujos de escombros a lo largo del río Páez y sus principales afluentes, los cuales afectaron numerosas vías y poblaciones. Observaron que la pendiente del talud es la variable de mayor incidencia en la estabilidad, pues el factor de seguridad se reduce al aumentar el ángulo de inclinación del talud. Sin embargo, en este estudio se encontró que los deslizamientos se generaron principalmente en saprolitos de rocas ígneas intrusivas, en rocas metamórficas y en depósitos recientes con alto ángulo. Los depósitos coluviales sobre laderas no muy pronunciadas sufrieron efectos menores.

Otros eventos de movimientos de masa en la zona andina colombiana que aportan para dilucidar la relación movimientos de masa – pendiente del terreno son:

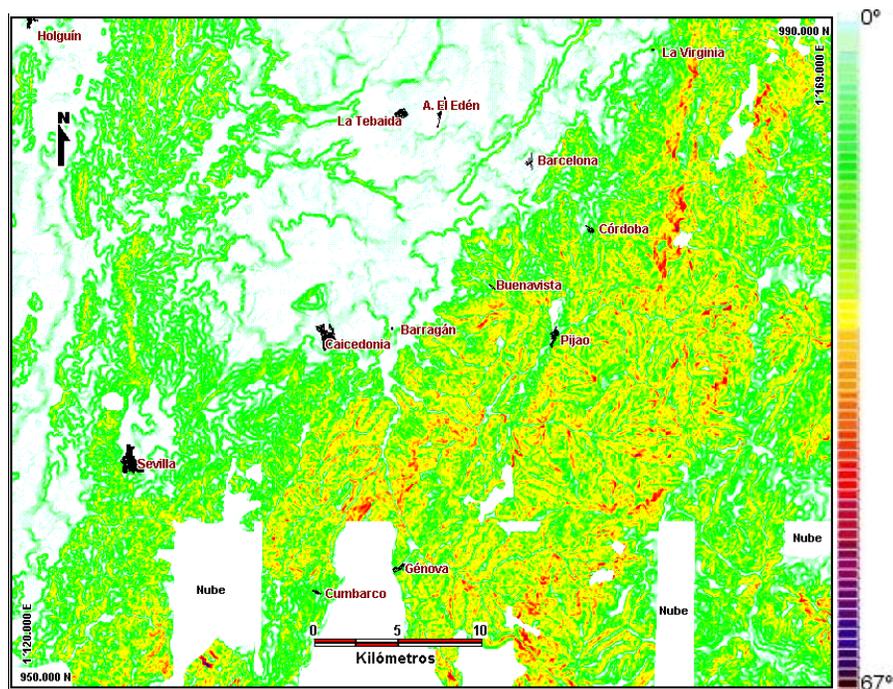
- Junio 12 de 1954. Media Luna (Medellín, Antioquia). Hondonada entre dos quebradas en pendiente de 13 grados (28 %) (Bustamante, 1990).
- Septiembre 24 de 1987. Villatina (Medellín, Antioquia). Desprendimiento de laderas del Cerro de Pan de Azúcar que descendieron por una pendiente de 29 grados (64 %) (Bustamante, 1990).
- Junio de 1991. Río San Francisco (Marsella, Risaralda). Movimientos de masa, la mayoría en pendientes entre los 9 y los 18 grados (entre el 20 % y el 40 %) (Hermelín et al., 1992).

### **6.6.2 Desarrollo del submodelo de pendientes.**

El mapa de pendientes del terreno es una imagen (Figura 19) que se obtiene aplicando algoritmos de álgebra de imágenes (álgebra matricial y geometría vectorial) a una imagen de alturas (modelo de elevación digital). Como herramienta para generar el mapa de pendientes para este trabajo se utilizó la tarea S.L.P. (Slope of Elevation Data)

del software P.C.I. (Anexo C). En la zona de estudio se encontraron pendientes entre 0 y 67 grados.

Este mapa de pendientes fue clasificado según los rangos expuestos en OSSO (1995a, b), y es usado en el modelo So, y en una nueva clasificación de pendientes propuesta en este estudio, con el cual se genera el submodelo aplicado en los modelos Som y Sp.



**Figura 19.** Pendientes del terreno.

En los modelos de susceptibilidad para el Atrato Medio, el Occidente de Colombia y la cuenca del río Nima en el Valle del Cauca (OSSO, 1995a y b; Restrepo y Velásquez, 1997), se considera la siguiente clasificación de pendientes (Tabla 8):

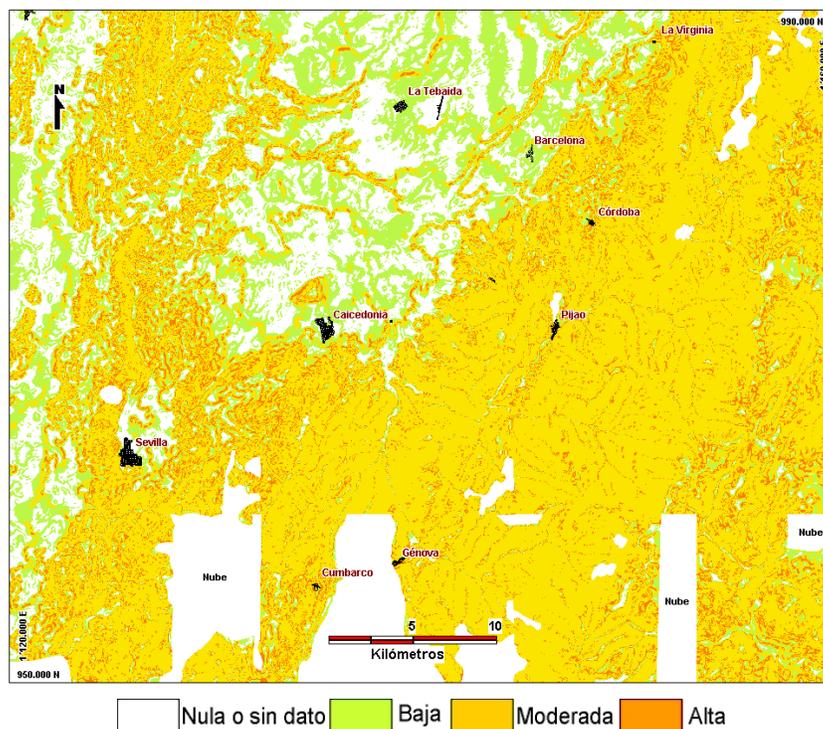
**Tabla 8.** Clasificación de pendientes (So).

Rango de pendientes		Calificación	Clase
(grados)	(%)		
<1	< 3	0	Nula
1 a 5	3 a 12	1	Baja
5 a 11 y > 16	12 a 25 y > 35	3	Moderada

11 a 16	25 a 35	6	Alta
---------	---------	---	------

(Osso, 1995, a, b)

Se denominaron *pendientes medias* al rango entre 11 y 16 grados (25 % al 35 %), a las cuales se asignaron los mayores valores de susceptibilidad, con base en que, en general, sobre ellas se registran las precipitaciones mayores, los procesos de intemperización de los materiales son bastante acelerados y, de manera también acelerada, las vertientes se encuentran en proceso de deforestación (OSSO, 1995a, b).



**Figura 20.** Submodelo de pendientes (So).

Las opciones para la utilización de las pendientes (en términos de rugosidad o de inclinación) derivadas de la revisión de literatura y de casos no son concluyentes. Mientras que sobre el concepto mismo de rugosidad no hay un consenso, los rangos de pendientes utilizados en estudios y reportes de caso en Colombia no son homogéneas. Con seguridad, la inclinación para que una pendiente sea más o menos susceptible a

movimientos de masa, depende, entre otros factores, de las unidades litológicas y del ambiente climático.

No obstante estas apreciaciones, en general los autores coinciden en que pendientes bajas y altas o muy altas son menos susceptibles a los movimientos de masa. Con base en esta consideración para este trabajo se adoptó una clasificación, *a priori* (Tabla 9), con base en los siguientes criterios, generales:

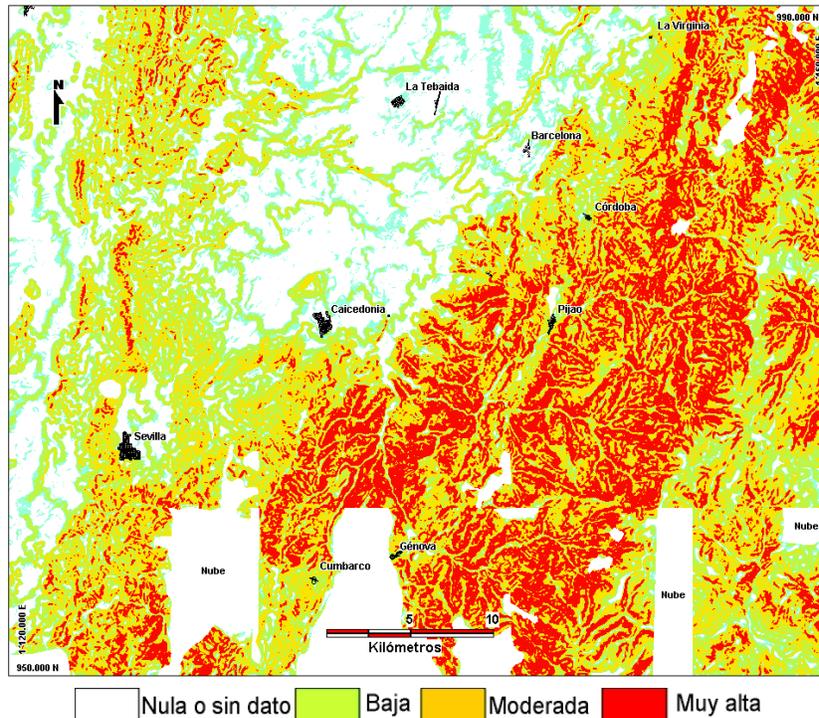
- Las porciones más bajas o menos pendientes son poco susceptibles a movimientos de masa pero son afectadas por los eventos que se originan en porciones más pendientes. El rango de inclinación entre 0 y 3 grados se calificó con el valor cero (susceptibilidad nula) y el rango tres a cinco grados con el valor uno.
- Laderas entre 5 y 15 grados de inclinación conforman relieves suaves poco susceptibles pero afectadas por los eventos que se originan en pendientes más inclinadas. Se asignó a este rango el valor dos.
- Laderas de 15 a 25 grados conforman relieves inclinados muy susceptibles a movimientos de masa en algunas regiones pero poco susceptibles en otras. Ocurre igual en laderas con inclinaciones que sobrepasan los 45 grados. Se les calificó con el valor tres.
- Laderas con inclinaciones entre 25 y 45 grados son muy susceptibles a movimientos de masa en ambientes tropicales. Se calificaron con el valor seis.

**Tabla 9.** Clasificación de pendientes (Som, Sp).

Pendientes (%)	Pendientes (grados)	Calificación	Clase
0 a 3	0 a 7	0	Nula
3 a 5	7 a 11	1	Muy Baja
5 a 15	11 a 33	2	Baja
15 a 25 y > 45	33 a 56 y > 100	3	Moderada
25 a 45	56 a 100	6	Muy alta

El submodelo de pendientes es un mapa parámetro (Figura 21) que se obtuvo al aplicar

la clasificación de la Tabla 9 sobre el mapa de pendientes del terreno. La precisión y las limitaciones del modelo de pendientes dependen de la cartografía base (Anexo B), y de las inherentes a la metodología utilizada para su clasificación. En efecto, en la clasificación propuesta en este trabajo no se incluyó el rango “Alto”, al cual se hubiera catalogado con peso 4 o 5.

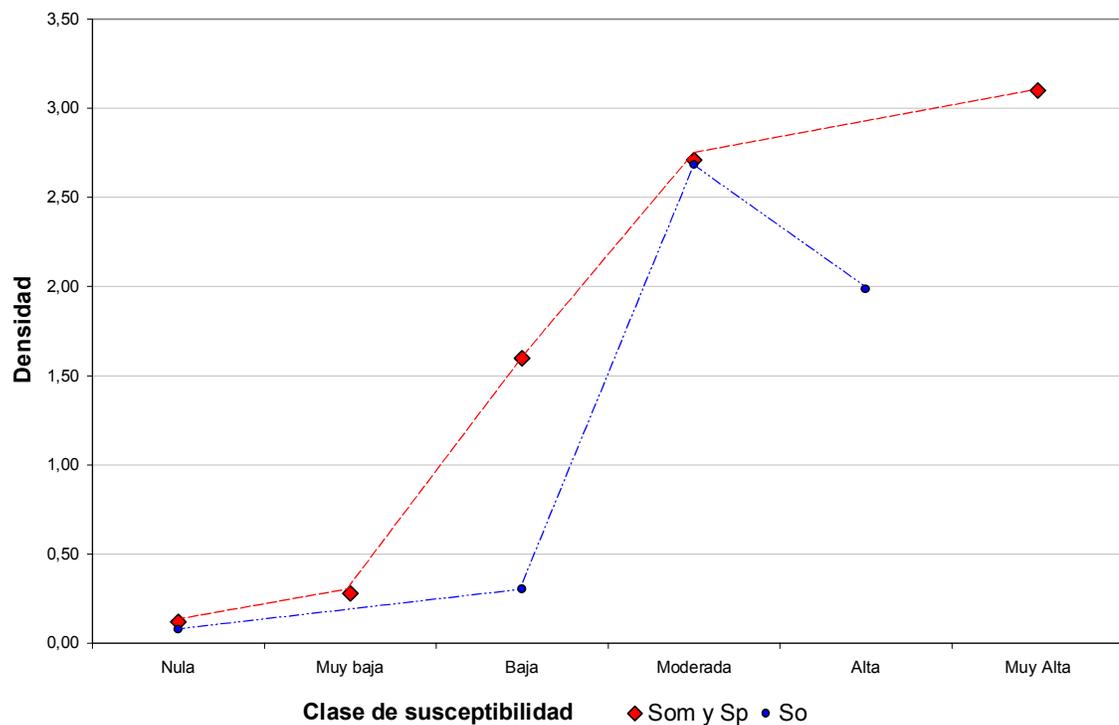


**Figura 21.** Submodelo de pendientes (Sp y Som).

### 6.6.3 Evaluación submodelo de pendientes.

La Figura 22 muestra la densidad de huellas de los submodelos de pendientes para So y para Som y Sp. Se observa que el submodelo para So (Figura 20), expresa una menor densidad en la clase Alta con respecto a la inmediatamente anterior, moderada, lo que puede interpretarse como una deficiencia en la clasificación de las pendientes en los valores de mayor susceptibilidad. El submodelo para Som y Sp (Figura 21), en el cual no se incluyó, como ya se dijo, la categoría Alta, no tiene la incoherencia de So. Sin embargo, la densidad entre la clase Moderada y Muy alta no es

significativamente diferente. Las *curvas* de densidad sugieren que los rangos y los pesos adoptados en la clasificación del submodelo para Som y Sp, expresan de mejor manera la contribución de ésta variable a la susceptibilidad. Las relaciones mostradas sugieren que este tipo de evaluación puede ser utilizado, en ésta y otras regiones de estudio, para retroalimentar el modelamiento, especialmente en la definición y redefinición de clasificaciones.



**Figura 22.** Densidad de movimientos de masa según submodelos de pendientes.

## 6.7 SUBMODELO DE HUMEDAD.

### 6.7.1 Base conceptual.

El agua es uno de los principales agentes de erosión y el vehículo principal de transporte del material erosionado. La erosión puede ser analizada comenzando por el despegue de las partículas de suelo debido al impacto de la lluvia. En suelos

horizontales las partículas se dispersan más o menos uniformemente en todas las direcciones, pero en un terreno con pendientes habrá un transporte neto hacia lugares más bajos de la ladera y con una intensidad suficiente se puede generar un flujo superficial. Flujos superficiales suficientemente fuertes son responsables de socavaciones que pueden convertirse en cárcavas que eventualmente generarían movimientos de masa (Linsley et al., 1977).

Algunas veces la lluvia actúa como factor preparador para la inestabilidad de un terreno y algunas otras como factor disparador de movimientos de masa. En el primer caso, una parte del agua que cae se acumula en el suelo propiciando condiciones de humedad que pueden llegar a un punto de saturación sin que el suelo supere sus condiciones de equilibrio. El segundo caso puede ocurrir cuando se presentan lluvias intensas o lluvias críticas, sobre una ladera en estado previo cercano a la saturación y en condiciones críticas de equilibrio. Para evaluar la susceptibilidad del territorio a movimientos de masa, nos ocupamos del primer caso (factor de inestabilidad).

La humedad del suelo se refiere a la cantidad de agua que queda en él después de una precipitación y de procesos posteriores como evapotranspiración y escurrimiento. Parte del agua lluvia que llega al suelo se infiltra a través de los intersticios más gruesos – agua gravitacional –, luego se dispersa en la zona capilar, a través de poros más pequeños, hacia acuíferos o hacia el canal de un río; una parte de ella es retenida por atracción molecular de partículas de suelo – agua higroscópica – y otra parte se convierte en vapor de agua. La humedad del suelo es la suma de agua gravitacional, agua capilar, agua higroscópica y vapor de agua (Linsley et al., 1977). No existen mediciones climáticas o meteorológicas que indiquen directamente el parámetro humedad; el valor más aproximado que sirve para evaluar la humedad es la relación de evapotranspiración (Espinal, 1977).

Una parte de la precipitación que cae en dirección a la superficie se evapora antes de llegar al suelo, la precipitación captada por la vegetación (intercepción) se evapora eventualmente y la cantidad de agua que llega realmente a la superficie se ve

disminuida con respecto a la observada en una estación. Como la tasa de evaporación durante periodos de lluvia es pequeña, la cantidad de agua precipitada que se evapore estará limitada esencialmente por la cantidad necesaria para que el agua desplace el aire de todos los intersticios que ocupa en el suelo. Por otro lado, en el proceso de fotosíntesis, una parte del agua que viene de la raíz es liberada a través de estomas abiertos de las hojas. El potencial de evapotranspiración se refiere a la pérdida de agua que ocurriría si en ningún momento existiera una deficiencia de agua para el uso de la vegetación.

La medición directa de la evapotranspiración no es fácil, por lo que se han desarrollado diversas técnicas para deducir o estimar el transporte de vapor desde superficies de agua. Para el cálculo de un balance de agua o balance hídrico, también llamado balance energético, se utilizan las ecuaciones de conservación de masa o energía, con variables como la temperatura, el agua subterránea y la cobertura vegetal (Linsley et al., 1977). Básicamente se considera un volumen de entrada (por ejemplo precipitación), un proceso en el cual ocurre una pérdida o transformación y un volumen de salida. Se pueden obtener datos de evapotranspiración determinando la diferencia entre los valores de precipitación, caudal y humedad del suelo en una cuenca cubierta con bosques. El método de Penman se basa en los parámetros de radiación solar, viento y temperatura. Dada la ausencia de investigaciones al respecto en la zona andina colombiana, el cálculo de la evapotranspiración real se estima con base en los registros del evaporímetro de tanque, cuyos datos están bien relacionados con el método de Penman (Castaño et al., 1980).

Van Westen and Terlien (1996), en Manizales, Colombia, utilizaron el valor de aguas subterráneas con diferentes periodos de retorno y diversas correlaciones con aceleración sísmica, para evaluar la variable humedad de suelo dentro de un modelo de susceptibilidad a movimientos de masa. Concluyeron que valores de agua subterránea y de aceleraciones sísmicas son proporcionales y tienen igual influencia en la susceptibilidad a movimientos de masa.

En el modelo de amenaza de Mora y Vahrson (1993, 1994) la humedad del suelo es considerada una variable de susceptibilidad y, cuando no se dispone de este valor, puede ser calculada a partir de la precipitación mensual ó del potencial de evapotranspiración. Ellos construyeron una tabla de valores ponderados a partir de un estimativo de la evapotranspiración potencial promedio mensual para Costa Rica.

### **6.7.2 Desarrollo del submodelo de humedad.**

En 1980 el Programa de Fomento Forestal de la C.V.C.<sup>6</sup> elaboró la caracterización del clima del área comprendida entre las coordenadas 2° - 5° N y 75° 40' y 77° 20'W, que incluye toda la cuenca del Río Cauca desde su nacimiento hasta Cartago (departamentos del Valle, Cauca y Chocó), con excepción de la margen derecha del Río La Vieja y la Llanura del pacífico entre los ríos Naya y San Juan. Este trabajo tuvo entre sus objetivos principales generar una caracterización climática más detallada que la planteada por Espinal (1977), con base en las zonas de vida de Holdridge. Los parámetros básicos considerados fueron, en primer lugar, la temperatura y la precipitación y, en menor grado, la humedad relativa, el brillo solar, la evaporación y el recorrido del viento. En este modelo, el concepto de zona climática es equivalente al concepto de zona de vida de Holdridge. Las zonas climáticas se obtienen de la superposición de un modelo de pisos térmicos y un modelo de precipitaciones (Castaño et al., 1980). Este trabajo se utilizó como modelo para evaluar la humedad del suelo en la región del Eje Cafetero.

- Modelo de pisos térmicos.

Para la clasificación de pisos térmicos que se observa en la Tabla 10, Castaño et al., (1980), se basaron en una relación lineal entre la temperatura promedio y la altura sobre

---

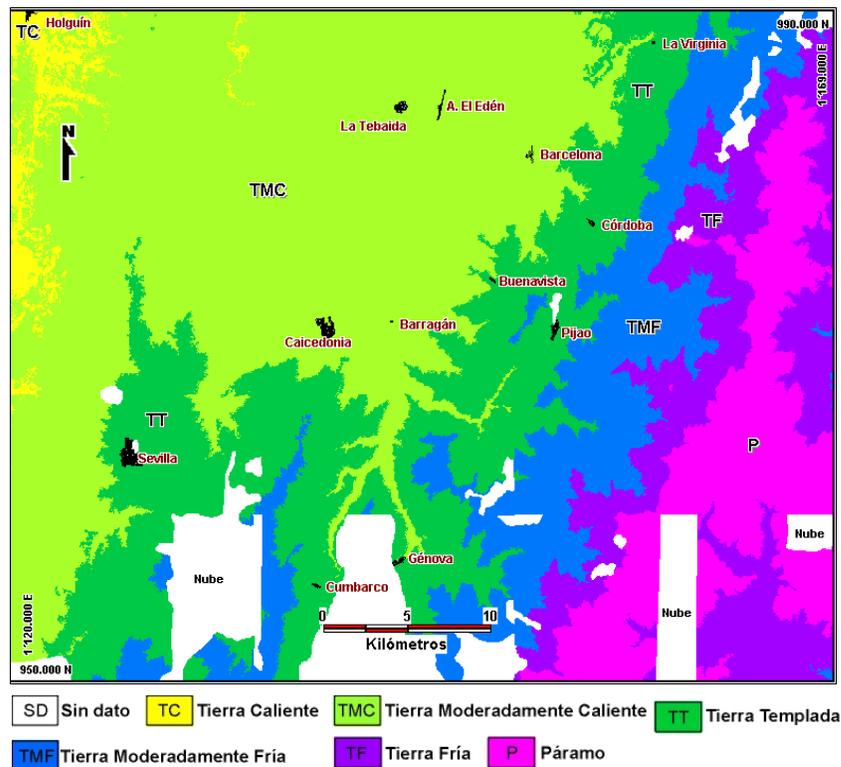
<sup>6</sup> C.V.C.: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca

el nivel del mar, expresada en la ecuación:  $T\text{ }^{\circ}\text{C} = -0.0063 A\text{ (m.s.n.m.)} + 29.045$ , que explica en un 98 % el comportamiento de la temperatura promedio, particularmente para las cuencas que drenan hacia el río Cauca. Hallaron que por cada 100 m que se asciende, la temperatura disminuye  $0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Tabla 10.** Clasificación de los pisos térmicos.

Piso Térmico	Convención	Altura (m)	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
Tierra Caliente	TC	0 - 1000	>24
Tierra Moderadamente Caliente	TMC	1000 – 1400	24 – 20
Tierra Templada	TT	1400 – 2000	20 – 16
Tierra Moderadamente Fría	TMF	2000 – 2800	16 – 12
Tierra Fría	TF	2800 – 3400	12 – 8
Páramo	P	+ 3400	< 8

(Castaño et al., 1980)



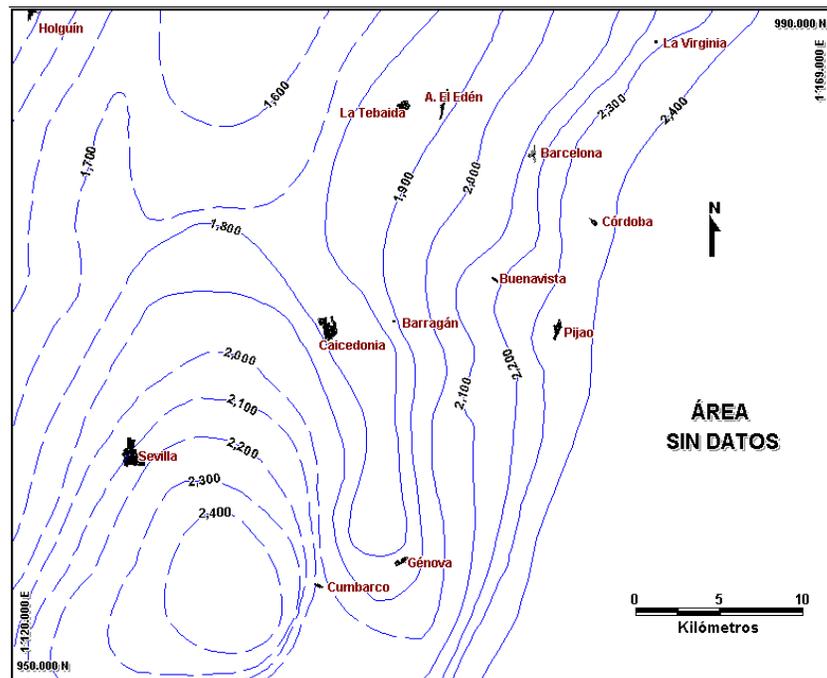
**Figura 23.** Pisos térmicos.

Para la zona de estudio se generaron dos modelos de pisos térmicos, el primero utilizando la ecuación de temperatura, el segundo a partir de la clasificación del modelo de elevación digital (MED), utilizando en ambos casos los rangos altitudinales de la Tabla 10. El modelo de pisos térmicos (Figura 23) que se obtuvo a partir del modelo de elevación digital mostró con mayor detalle y *'suavidad'* las variaciones de la temperatura en relación a las variaciones de la altura, por lo cual fue el adoptado en este trabajo. La precisión y las limitaciones del modelo se relacionan con la precisión y las limitaciones del modelo de elevación digital y por lo tanto a la precisión limitaciones de la cartografía base (Anexo B).

- Modelo de precipitaciones.

El modelo de precipitaciones o modelo de lluvias es un mapa parámetro obtenido de la interpolación de isohietas anuales (Figura 24), que a su vez se trazaron con base en el promedio de precipitación anual multianual de 12 estaciones pluviométricas de la zona de estudio (Anexo C). A causa de las limitaciones de los datos pluviométricos, las isohietas debieron ser complementadas con las isohietas anuales del Valle del Cauca (C.V.C., 1997), contando con la orientación del meteorólogo Diego González de la Universidad Nacional (Bogotá).

La precisión y las limitaciones del modelo de precipitaciones anuales dependen de los datos pluviométricos (distribución de las estaciones pluviométricas, errores sistemáticos de monitoreo, período heterogéneo de registros, etc.).



**Figura 24.** Isohietas anuales.

- Modelo de zonas climáticas.

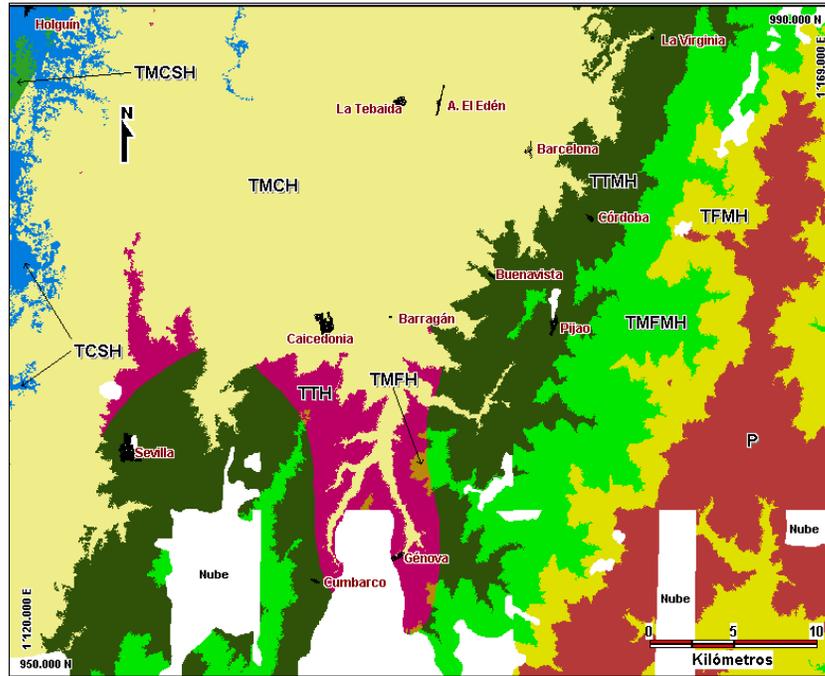
Las zonas climáticas se clasificaron según Castaño et al., (1980). En la Tabla 11, se muestran los pisos térmicos, clase de humedad, precipitación promedio anual y las zona climáticas dadas en la zona de estudio. La Figura 25 es el modelo de zonas climáticas, que resulta de la superposición de los modelos de pisos térmicos y de precipitaciones anuales. La precisión y las limitaciones del modelo de zonas climáticas se derivan de la precisión y limitaciones de los modelos de pisos térmicos y de precipitaciones.

**Tabla 11.** Zonas climáticas.

Piso térmico	Clase de humedad	Zona Climática	Precipitación Promedio Anual (mm)
TC	Subhúmedo	TCSH	1000 – 2000
TMC	Subhúmedo	TMCSH	1000 – 1500
	Húmedo	TMCH	1500 – 2500
TT	Húmedo	TTH	1200 – 2000
	Muy Húmedo	TTMH	2000 – 4000
TMF	Húmedo	TMFH	1000 – 2000
	Muy Húmedo	TMFMH	2000 – 4000

TF	Muy Húmedo	TFMH	> 2400
P	Muy Húmedo	P	-

(Adaptado de Castaño et al., 1980).



**Figura 25.** Zonas climáticas.

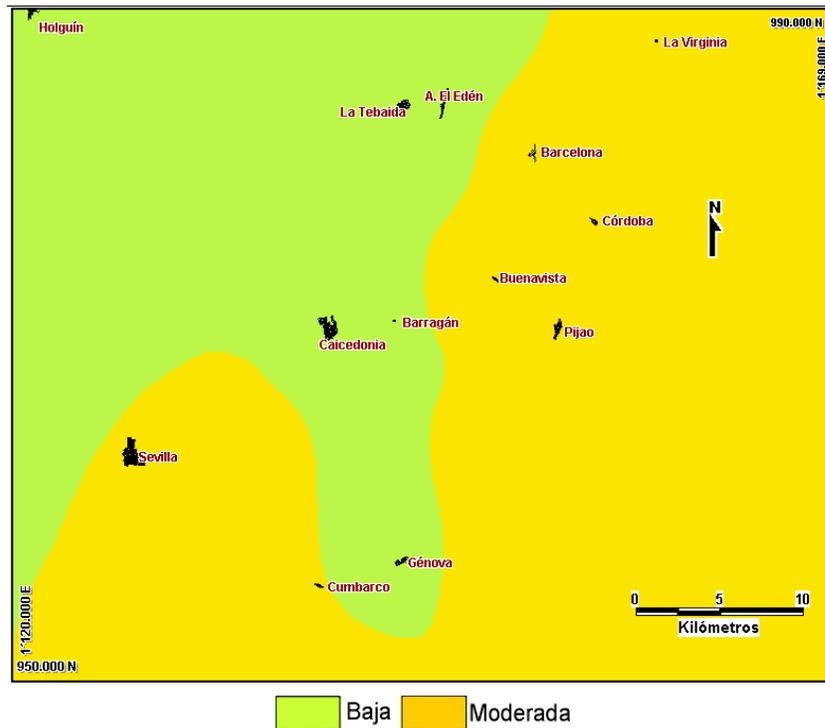
En investigaciones del OSSO (1995 a y b), las precipitaciones anuales de las regiones del Atrato Medio y el sur occidente de Colombia se clasificaron como se observa en la Tabla 12, pero no se estimó el valor de la humedad probable del suelo.

**Tabla 12.** Clasificación de humedad (So).

Valor	Susceptibilidad	Rango de precipitación (mm)
1	Muy Baja	< 1000
2	Baja	1000 a 2000
4	Moderada	2000 a 3000
5	Alta	3000 a 4000

6	Muy Alta	> 4000
---	----------	--------

(OSSO, 1995 a, b)



**Figura 26.** Submodelo de humedad So.

Para estimar el contenido probable de humedad del suelo, se calculó el valor anual probable de evapotranspiración, EVAP (evapotranspiración potencial), con base en el valor mensual probable calculado por Castaño et al., (1980). Si la cantidad de lluvia que cae en una zona es inferior a la EVAP, se espera déficit de contenido de humedad en el suelo, en caso contrario, se espera exceso: un mes o año seco ocurre cuando la precipitación es menor que 2/3 partes de la evapotranspiración potencial. En la Tabla 13 se muestran los valores mensual y anual para la zona de estudio por cada piso térmico; EVAP M es la evapotranspiración potencial que se esperaría en un mes, EVAP A es la que se esperaría en un año, PMS es la precipitación que ocurriría en un mes seco y PAS la que ocurriría en un año seco en la zona de estudio.

**Tabla 13.** Evapotranspiración potencial y valores de precipitación límite.

Piso	EVAP M (mm)	PMS (mm)	EVAP A (mm)	PAS (mm)
TC y TMC	122	80	1464	976
TT	110	70	1320	880
TMF y TF	78	50	936	624

(Adaptado de Castaño et al., 1980).

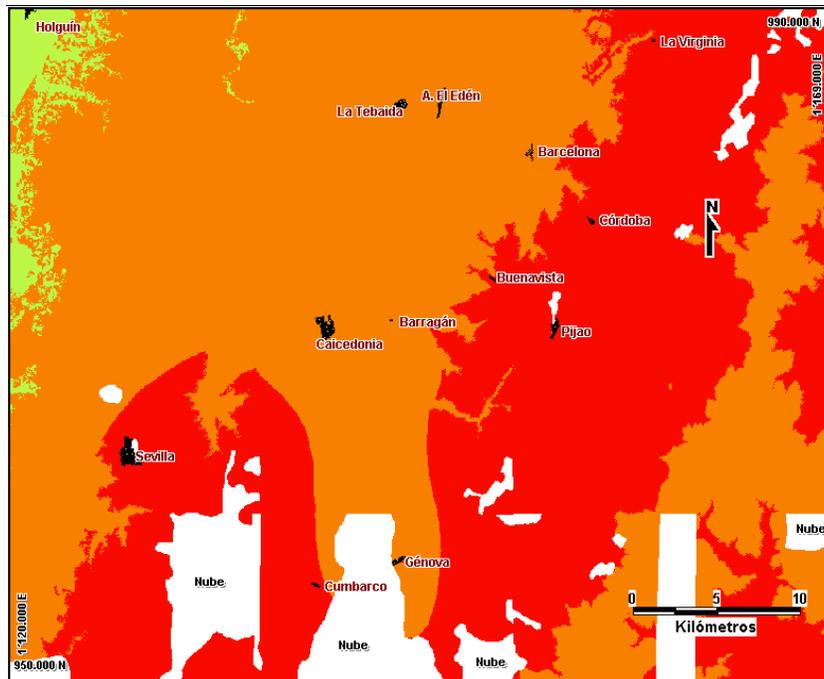
Los promedios mensuales multianuales de precipitación para la zona van de 82 a 158 mm en periodos secos (diciembre a febrero y junio a agosto) y de 158 a 235 mm para periodos lluviosos (marzo a mayo y septiembre a noviembre). Se asume, con base en lo anterior, que precipitaciones mensuales inferiores a 80 mm mensuales implicarían agotamiento del agua en el suelo, precipitaciones entre 80 y 240 mm aumentarían su humedad y precipitaciones superiores a 240 mm generarían saturación. Los promedios anuales multianuales de precipitación para la zona van de 1500 a 2600 mm . Se asume que precipitaciones inferiores a 1000 mm anuales implicarían agotamiento de agua en el suelo, precipitaciones entre 1000 y 2500 mm anuales aumentarían su humedad y precipitaciones superiores a 2500 mm generarían saturación. Con base en estos valores se calificaron la humedad mensual y anual de la zona de estudio, como se observa en la Tabla 14, teniendo en cuenta que a medida que aumenta la saturación del suelo, aumenta la presión de poros y el sistema disminuye su resistencia al corte, por ello los mayores pesos sobre esta variable fueron asignados a las mayores precipitaciones. Se descartaron condiciones iniciales iguales a cero, y por lo tanto peso igual a cero, en razón a que en condiciones de trópico húmedo siempre habrá niveles de humedad en las laderas.

**Tabla 14.** Clasificación de la humedad (Som y Sp).

Mensual		Annual		Calificación	Clase de susceptibilidad
Precipitación mensual (mm)	Descripción	Precipitación anual (mm)	Descripción		
< 80	Mes muy seco	< 1000	Año muy seco	1	Muy Baja
80 – 160	Mes seco	1000 – 1500	Año seco	2	Baja
160 – 240	Mes húmedo	1500 – 2500	Año húmedo	4	Alta

> 240	Mes muy húmedo	> 2500	Año muy húmedo	6	Muy Alta
-------	----------------	--------	----------------	---	----------

El modelo de humedad es un mapa parámetro (Figura 23) que se obtuvo de aplicar la clasificación de la Tabla 14 sobre el modelo de zonas climáticas.



Sin dato
  Baja
  Alta
  Muy alta

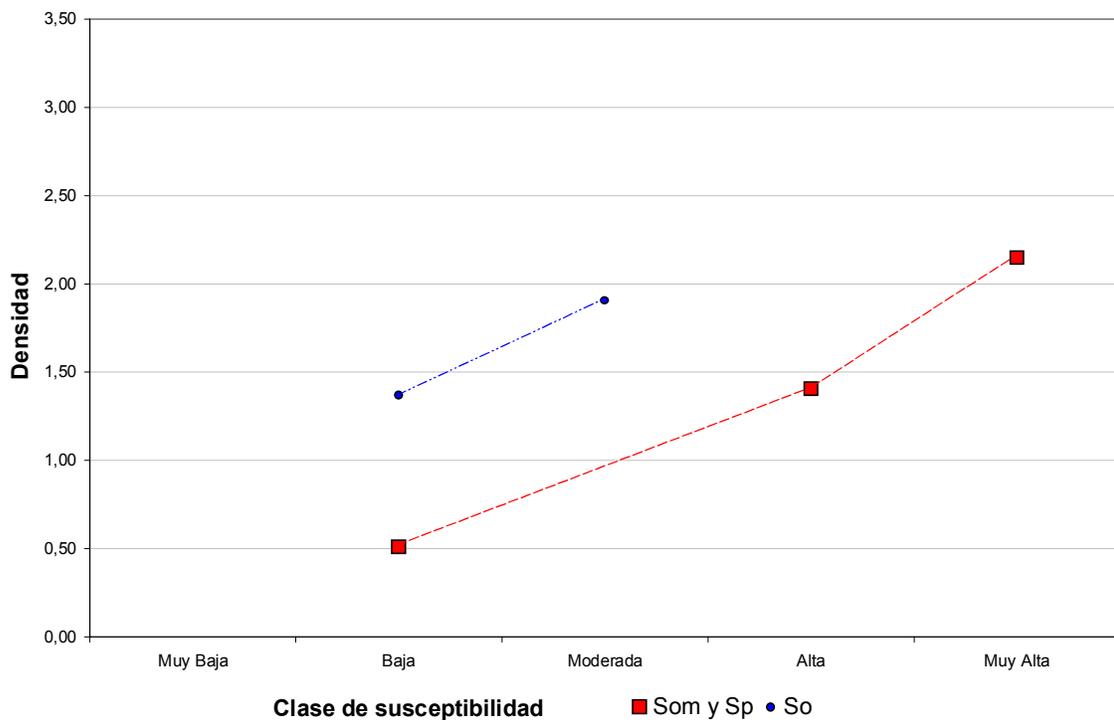
**Figura 27.** Submodelo de humedad Som y Sp.

### 6.7.3 Evaluación del submodelo de humedad.

El submodelo de humedad para So (Figura 26), consideraba una amplia región con precipitaciones entre menos de 1000 mm y más de 5000 mm al año. En la zona de estudio sólo se presentan dos de los rangos adoptados en los trabajos del OSSO (1995 a y b), por lo cual se hace evidente la poca contribución (sólo dos clases, con densidades apenas del orden del 50 % de diferencia entre una y otra), del submodelo de humedad utilizado. El submodelo desarrollado en este estudio (Figura 27), incluye una clase adicional y, además, expresa rangos de humedad claramente diferenciables en el

campo. Al NW de la zona, en cercanías del Valle del Cauca, el déficit de precipitaciones está bien documentado en términos de isoyetas (CVC, 1997) y de zonas de vida o formaciones vegetales (bosque seco tropical), según Espinal y Montenegro (1977), con respecto, por ejemplo, a la zona cafetera, más húmeda. Sin embargo de lo anterior, que se considera un avance, una zonificación más precisa de zonas de humedad está sujeta a diversas variables difíciles de considerar en un trabajo regional.

La Figura 28 muestra el número de huellas de movimientos de masa por unidad de área en cada clase de susceptibilidad para los dos submodelos de humedad, en ambos se observa una tendencia creciente.



**Figura 28.** Densidad de movimientos de masa según submodelos de humedad.

## **6.8 SUBMODELO DE GEOLOGÍA.**

### **6.8.1 Base conceptual.**

La geología constituye uno de los parámetros más importantes al analizar la susceptibilidad de los movimientos de masa, pero también uno de los más complejos. La caracterización geológica de una zona comprende:

- **Litología:** se refiere a la identificación del tipo de material presente en la zona de estudio, sus características físicas y químicas, la composición mineral y la textura. El conjunto de estas características definen el grado de susceptibilidad del material a los movimientos de masa (Medina, 1991).
- **Estructuras:** se refiere al sistema de discontinuidades presentes en la roca que se consideran como planos de debilidad, los cuales son heredados por el material meteorizado. Estas pueden ser:

**Estratificación:** contactos de depositación de materiales que ocurrieron en la formación de las rocas sedimentarias.

**Pliegues:** ocasionados por fuerzas de origen tectónico en rocas sedimentarias y metamórficas (Suárez, 1998). Es un doblamiento o flexión de las rocas; existen dos tipos básicos: anticlinales y sinclinales (Simons, 1990).

**Fallas y diaclasas:** estructuras tectónicas presentes en el material, en las cuales se ha presentado desplazamiento relativo de masas (Simons, 1990). Su influencia en la susceptibilidad está gobernada por su rumbo, buzamiento, espaciamiento, continuidad, grado de actividad, entre otros (Suárez, 1998). También se pueden encontrar fracturas a lo largo de las cuales no ha ocurrido desplazamiento, conocidas como diaclasas (Simons, 1990).

Los modelos de susceptibilidad han incorporado la geología como una variable básica en el análisis, abordándola desde diferentes perspectivas. Mora y Vahrson (1993), proponen que para la evaluación de la litología debe tenerse en cuenta: la resistencia al corte del material, los pesos volumétricos, la disposición espacial con respecto a discontinuidades y su relación con la geometría y orientación de las laderas. En un estudio realizado en Costa Rica, los autores agruparon las unidades litológicas y valoraron subjetivamente, y con base en su experiencia, su influencia en los movimientos de masa en 5 clases de susceptibilidad combinando parámetros litológicos y estructurales (Tabla 15). Estos autores concluyen que para otra región los criterios usados deben revisarse, e incluso redefinir las clases de susceptibilidad, para que puedan expresar el comportamiento de la zona que se desea estudiar.

**Tabla 15.** Susceptibilidad de litología a los movimientos de masa.

Unidad litológica	Grado de susceptibilidad	Peso
Aluvión grueso, permeable, compacto, nivel freático bajo. Calizas duras permeables. Rocas intrusivas poco fisuradas, bajo nivel freático. Basaltos, andesitas, ignimbritas y otras rocas efusivas sanas, permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas, sanas, poco fisuradas, bajo nivel freático. Características físico Mecánicas CFM: materiales sanos con poca o ninguna meteorización, resistencia al corte elevada, fisuras sanas, sin relleno	Baja	1
Rocas sedimentarias no o muy poco alteradas, estratificación maciza, poco fisuradas, nivel freático bajo. Rocas intrusivas, calizas duras, lavas, ignimbritas, rocas metamórficas medianamente alteradas y fisuradas. Aluviones con compactaciones leves, con proporciones considerables de finos, drenaje moderado, nivel freático a profundidades intermedias. CFM: Resistencia al corte media a elevada, fracturas cizallables.	Moderada	2
Rocas sedimentarias, intrusivas, lavas, ignimbritas, tobas poco soldadas, rocas metamórficas mediana a fuertemente alteradas, coluviones, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados, drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos. CFM: Resistencia al corte moderada a media, fracturación importante.	Mediana	3

<p>Aluviones fluvio lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente y con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros.</p> <p>CFM: Resistencia al corte moderada a baja, con la presencia frecuente de arcillas.</p>	Alta	4
<p>Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica, rocas con estado de alteración avanzado, drenaje pobre. Se incluyen las clases mediana y alta, sometidas a gradientes hidromecánicos elevados y niveles freáticos muy someros.</p> <p>CFM: Resistencia al corte muy baja, materiales blandos con muchos finos.</p>	Muy alta	5

Mora y Varhson (1993).

Gupta and Josh (1990), aplicaron en la India una evaluación del riesgo por amenaza de deslizamientos usando SIG, a partir de la correlación del inventario de deslizamientos con diferentes parámetros, tales como litología, uso del suelo, distancia a zonas de cizalla y aspecto de las pendientes. En cuanto a la litología, concluyeron que la mayor frecuencia de deslizamientos ocurrió en las cuarcitas. Esquistos calcáreos y limolitas, metamórficas de bajo grado, calizas y metamórficas de alto grado, mostraron sucesivamente una menor frecuencia a la ocurrencia de deslizamientos. Respecto a la distancia a zonas de cizalla, concluyeron que el mayor número de deslizamientos ocurrió a una distancia máxima de 1 km de los contactos tectónicos, debido posiblemente al intenso fracturamiento de los materiales. A mayores distancias el porcentaje de deslizamientos decreció.

Keefer (1984 y 1994), en estudios sucesivos de bases de datos históricas mundiales de movimientos de masa disparados por sismos, concluye que los terremotos pueden causar movimientos de masa en diferentes tipos de ambientes geológicos y que la influencia de la geología varía para cada tipo de movimiento. Los tipos de ambientes más susceptibles son rocas fuertemente fracturadas, meteorizadas, cizalladas y débilmente cementadas, cenizas volcánicas, suelos residuales no cohesivos y depósitos aluviales y coluviales.

Olivera y Aguirre (1991), estudiando una base de datos de 133 casos de amenazas naturales, clasificadas en deslizamientos (38 %), movimientos de masa no diferenciados (13 %), avenidas (6 %), avalanchas (5 %), carcavamientos (5 %), solifluxión o reptación (11 %), socavamiento (17 %) e inundaciones (5 %) en el departamento de Cundinamarca, concluyen que los movimientos de masa no diferenciados, deslizamientos y avalanchas ocurren típicamente en el grupo Villeta (Kv), conformado por lutitas predominantes con intercalaciones de capas de caliza en la parte inferior y frecuentes niveles de areniscas, limolitas silíceas y chert; y en sedimentos cuaternarios no diferenciados (Q). La frecuencia de los eventos en las anteriores litologías, oscila entre el 67 % y 94 % del total de movimientos de masa en la base de datos. El estudio identificó que las unidades litológicas que presentan amenaza media para deslizamientos son, básicamente, areniscas, lutitas rojas, negras y grises con intercalaciones de areniscas, conglomerados y calizas.

Vargas y Gómez (1999), en la zonificación de la cuenca del río Teusacá, localizada en la parte central de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, calificaron la geología teniendo en cuenta unidades de suelos, depósitos inconsolidados y unidades de roca. Las unidades de suelo fueron caracterizadas de acuerdo con su génesis, composición litológica, textura, estructura, consistencia, compactación, meteorización y espesor. Las unidades de roca de acuerdo con su composición mineralógica, coherencia (dureza, fragilidad, etc.), textura, estructura y grado de meteorización. Encontraron que las unidades más susceptibles son los depósitos coluviales y las areniscas blandas, seguidos por lutitas y depósitos fluvioglaciares.

Estos mismos autores incluyen el parámetro estructural de forma regional, evaluando la densidad de fracturamiento; consideran como más susceptibles las regiones con mayor densidad.

Ambalagan (1992, en Suárez, 1998), evaluó la susceptibilidad de la litología según la erodabilidad de los materiales rocosos y los procesos de meteorización. Para evaluar las estructuras considera su disposición con relación al talud de acuerdo con los

siguientes parámetros:

- El rumbo de las discontinuidades en comparación con el rumbo de la superficie del talud. Rumbos coincidentes favorecen la inestabilidad.
- El buzamiento tanto de las discontinuidades como las líneas de intercepción de varias discontinuidades. Buzamientos a favor de la pendiente conllevan mayor susceptibilidad.
- La localización de las discontinuidades con referencia al pie del talud.

Movimientos de masa ocurridos recientemente en Colombia, que aportan al entendimiento de la relación de estos fenómenos con la litología, clasificados por agente de disparo son:

Movimientos de masa disparados por sismos:

- Bahía Solano (Chocó): Septiembre de 1970. Deslizamientos y agrietamientos en la región epicentral, asociados a materiales lateríticos, arcillas de alta plasticidad. (coloración rojiza), provenientes de la meteorización de basaltos (Ministerio de Agricultura, 1971).
- Caldas: Noviembre 23 de 1979. Deslizamientos y derrumbes cosísmicos en suelos volcánicos y haloisíticos (Ramírez y Goberna, 1980).
- Tumaco: Diciembre 12 de 1979. Agrietamientos y hundimientos cosísmicos, en rellenos con materiales de arena y arcilla (Ramírez y Goberna, 1980).
- Popayán: Marzo de 1983. Deslizamientos y agrietamientos en la región epicentral.

Sucedieron en depósitos volcano-lacustres no consolidados de consistencia blanda y alto contenido de humedad (INGEOMINAS, 1986).

- Atrato Medio: Octubre 18 de 1992. Licuación y deslizamientos. Licuación de suelos arenosos y limo arenosos recientes, poco o nulamente consolidados y saturados. Deslizamientos sobre rocas sedimentarias meteorizadas (OSSO para PNUD, 1995).
- Páez (Cauca): Junio de 1994. Avenida torrencial en la Cuenca del Río Páez, debido a represamientos por deslizamientos cosísmicos. Los suelos mas afectados fueron suelos de gravas medias a gruesas dentro de una matriz arenolimososa, de plasticidad y consistencia media, poco compactas y altamente fracturadas provenientes de rocas ígneas intrusivas, suelos de arenas limosas y limos de plasticidad muy alta y de consistencia media a dura, provenientes de rocas metamórficas, y gravas y arenas dentro de una matriz limosa, de plasticidad media a alta, provenientes de rocas volcánicas (INGEOMINAS y Corporación Nasa Kiwe, 1995).

Movimientos de masa disparados por lluvias:

- Media Luna, Medellín, (Antioquia), julio de 1954. Gran deslizamiento en la vereda Media Luna, debido a infiltración de aguas, en arcillas amarillas y rojizas provenientes de la alteración de rocas serpentinosas -sapolito de dunita o de una roca esquistosa bandeada a media ladera (Bustamante, 1990).
- Santo Domingo Savio, Medellín (Antioquía), septiembre de 1974. Deslizamientos de 3500 m<sup>3</sup>, en la margen izquierda de la quebrada La Sucia, debido a infiltración de aguas, en suelos residuales de serpentinita, material limo arcilloso de color rojizo con fracturas heredadas (Bustamante, 1990).
- Villatina, Medellín, (Antioquia), septiembre de 1987. Deslizamientos en las laderas asociadas a canal de aguas en el Cerro de Pan de Azúcar, 300 000 m<sup>3</sup> de material

en saprolito de dunita (Bustamante, 1990).

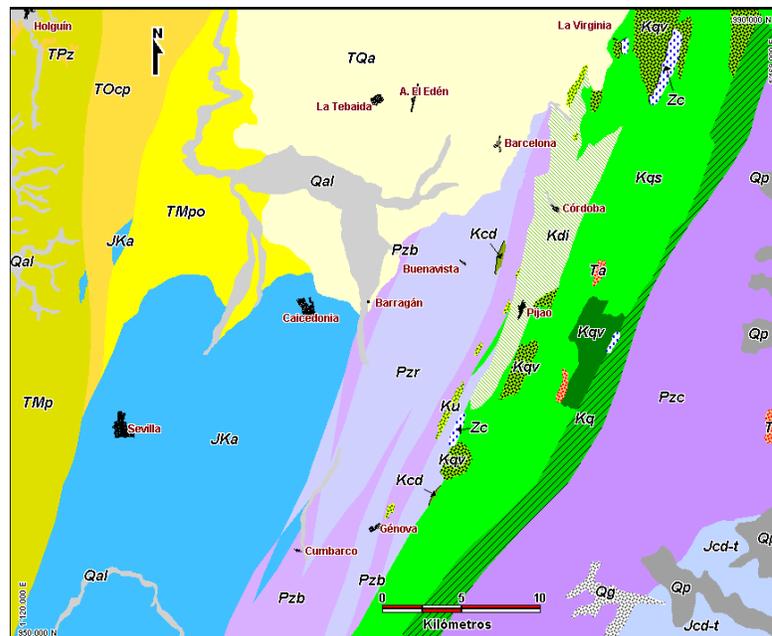
- Vía Cali - Buenaventura (Valle), noviembre de 1989. Lluvias con avenidas torrenciales y deslizamientos en la Cuenca del río Dagua, afectando la Formación Cisneros (Pizarras y filitas, areniscas, metacalizas y cherts que presentan metamorfismo de bajo grado) y rocas intensamente fracturadas de la Formación Volcánica -lavas basálticas, doleritas y en menor cantidad brechas volcánicas e intercalaciones sedimentarias (Marín et al., 1990).
- Cuenca alta del Río San Carlos (Antioquia), septiembre de 1990. Un aguacero torrencial produjo centenares de flujos de lodo poco profundos y movimientos de vertientes causados por socavación de orillas y profundización de cauces; afectaron el horizonte orgánico y la zona bioturbada (presencia de raíces), que suprayace al saprolito con un espesor de 1 a 2 metros. Algunos flujos profundos alcanzaron la roca madre, quizá por la presencia de diaclasas. La zona está conformada por granodioritas del Batolito Antioqueño y el saprolito derivado de éstas. También se encuentran depósitos torrenciales y depósitos de movimientos de vertientes recientes y cenizas volcánicas (Hermelin et al., 1991).
- Río San Francisco (Risaralda), junio de 1991. Una lluvia torrencial desencadenó movimientos de masa (flujos de lodo y deslizamientos planares y traslacionales), en una área de 16 km<sup>2</sup> con una densidad de 12,5 movimientos/km<sup>2</sup> y socavación de orillas en la cuenca. Los suelos mas afectados fueron los derivados de cenizas volcánicas en las partes planas y saprolito (de color rojo intenso) de diabasa (rocas volcánicas) en las partas altas (Hermelin et al., 1992).
- Río Frayle, Florida (Valle): Enero de 1993. Avenida torrencial disparada por deslizamientos que represaron la cuenca, ocasionados por un gran volumen de lluvias los días 29, 30 y 31, que afectaron el Batolito de Santa Bárbara (Archivo histórico OSSO).

- El Danubio, Alto Anchicayá (Valle): Mayo de 1996. Lluvias torrenciales con deslizamientos y avenidas torrenciales en los ríos San Juan, Dagua y Anchicayá. La mayor concentración de deslizamientos se ubicó sobre rocas intrusivas del Batolito de Anchicayá, que forman suelos y saprolitos con textura limo arenosa (OSSO, 1996).
- Río Guabas, Ginebra (Valle): Diciembre de 1999. Avenidas torrenciales y deslizamientos por lluvias fuertes en los días previos. Deslizamientos en la Qb. La Cecilia, sobre Batolito de Buga. Deslizamientos en la Qb. Potosí, sobre suelos residuales amarillos a rojizos, producto de la alteración de rocas ígneas básicas de la Formación Amaime -rocas ígneas básicas, basaltos, lavas almohadilladas (CVC, 2000d).
- Río Amaime, Palmira (Valle): Diciembre de 1999. Avenidas torrenciales y deslizamientos por lluvias fuertes. El mayor número de deslizamientos ocurrió sobre los esquistos de Bugalagrande, del Complejo Arquía y en la zona de influencia de la falla Cauca – Almaguer. También se presentaron eventos en la Formación Amaime (CVC, 2000a).
- Río Cerrito, Cerrito (Valle); Diciembre de 1999. Avenidas torrenciales y deslizamientos por lluvias fuertes. Deslizamientos en roca basáltica y rocas de la Formación Amaime, fuertemente alteradas por la presencia de dos fallamientos (CVC, 2000b).
- Río Desbaratado, Florida (Valle): Diciembre de 1999. Debido a fuertes lluvias se presentaron movimientos de masa en la cuenca alta del río Desbaratado, asociados posiblemente al batolito de Santa Barbara y posteriormente se presentó una avenida torrencial en la cuenca (CVC, 2000c).

## 6.8.2 Desarrollo del submodelo de geología.

Una de las principales dificultades en la valoración de la influencia de la geología en la susceptibilidad a movimientos de masa, es el limitado conocimiento que se tiene sobre las complejas y diversas relaciones que la rigen y su comportamiento bajo diferentes condiciones ambientales.

Para este trabajo se digitalizaron las planchas geológicas a escala 1: 100 000 número 243 (Armenia) y 262 (Génova) del (Mc Court et al., 1984). Las unidades litológicas de esta cartografía se complementaron en la zona de Entreríos, cerca de la zona epicentral, a partir de la interpretación de fotografías aéreas -vuelo C2575 de 1995- y de trabajo de campo. En esta zona la cartografía regional muestra predominio de la Formación Armenia (TQa), cuando en realidad se identificaron rocas del Complejo Rosario, Grupo Bugalagrande, Complejo de Córdoba y aluviones recientes (Figura 29).



Nota: las unidades litológicas se describen en el Anexo A.

**Figura 29.** Unidades litológicas.

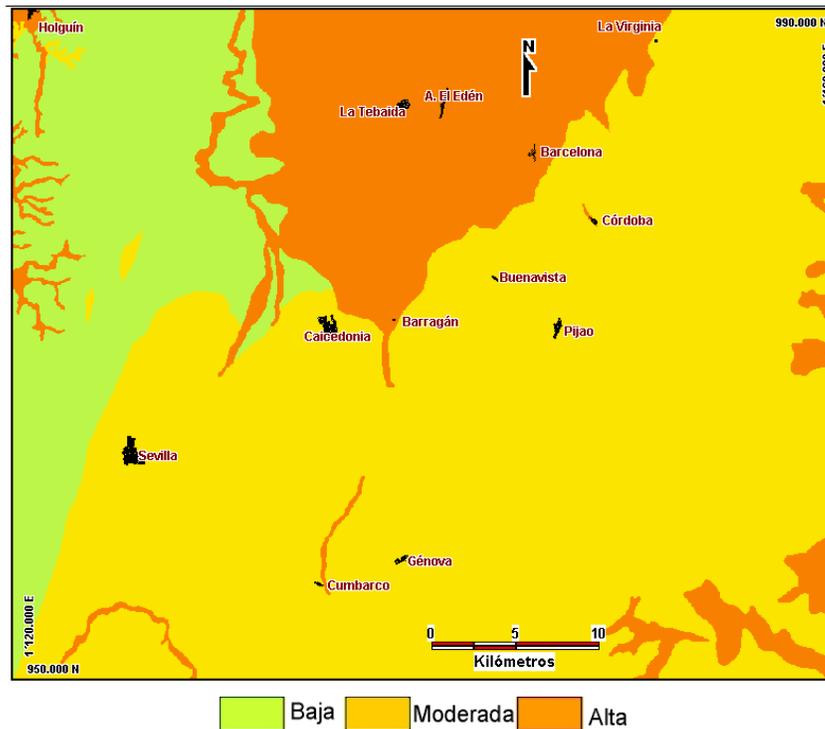
En los estudios "Análisis de Amenazas Naturales, Vulnerabilidad y Riesgos para las Redes de Transporte del Plan de Masificación de Gas" (OSSO, 1995a) y "Apoyo para la Recuperación de la Zona Afectada por el Terremoto del Atrato Medio" (OSSO, 1995b), se clasificaron y agruparon las unidades litológicas según sus características petrográficas, texturales y mineralógicas, de tal manera que expresaran la susceptibilidad a la remoción de los materiales derivados de su meteorización, que cubren los primeros metros de espesor sobre el territorio (Tabla 16).

**Tabla 16.** Clasificación de geología (So).

Unidad Litológica	Susceptibilidad	Peso
Volcánicas ácidas (ricas en sílice), metamórficas de alto grado, plutónicas (ígneas intrusivas), sedimentarias clásticas (areniscas, conglomerados, etc.)	Baja	1
Volcánicas intermedias, esquistos, filitas, sedimentarias pelíticas (lutitas, lodolitas, arcillolitas), calcáreas, sedimentarias con aporte volcánico, intrusivas intermedias.	Moderada	3
Metamórficas de bajo grado, intrusivas máficas intercalaciones de areniscas y lutitas, depósitos terciarios y cuaternarios (depósitos de flujos de lodo, flujos piroclásticos, depósitos fluviovolcánicos, piroclastos)	Alta	6

OSSO (1995c).

Esta clasificación de la geología fue retomada en este estudio como base para el análisis de la variable en el modelo de susceptibilidad, revalorándola de acuerdo con los estudios de caso mencionados y con el criterio mineralógico fundamentado en las Series de Meteorización de Goldich (Goldich, 1936), según la cual las rocas con mayor contenido de minerales ferromagnesianos, formados a mayor temperatura, están en mayor desequilibrio, en condiciones ambientales, que las rocas con abundante cuarzo.



**Figura 30.** Submodelo geología (So).

Las unidades litológicas (20 tipos) fueron clasificadas en cuatro clases (Tabla 17). A cada clase se le asignó un peso (importancia) en una escala de uno a seis que representa su grado de inestabilidad potencial, de acuerdo con los criterios ya enunciados. Las zonas de cataclisis recibieron el mayor peso, debido a la mayor inestabilidad asociada al alto grado de fracturamiento inherente a las zonas de cizalladura (Figura 31).

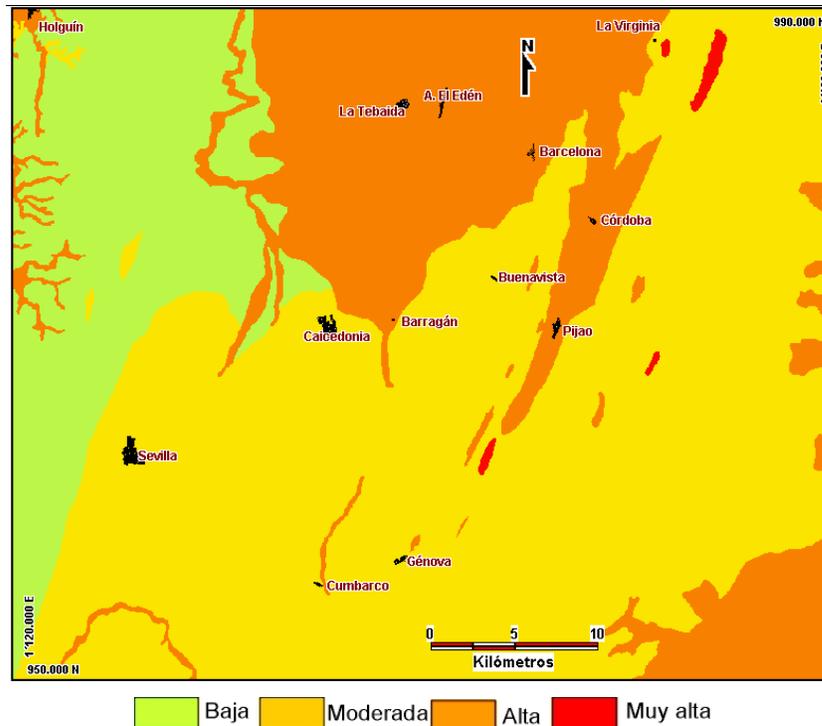
A diferencia de OSSO (1995a, b), en esta clasificación las rocas ígneas intrusivas se llevaron a susceptibilidad alta, en razón a que sus saprolitos tienen textura arenosa (granos de cuarzo) embebidos en matriz arcillo limosa derivada de la descomposición de los feldespatos y ferromagnesianos. Estos saprolitos se saturan fácilmente y, por evidencia empírica, son muy susceptibles a los movimientos de masa como los ya

mencionados en el Batolito de Anchicayá (El Danubio), Batolito de Santa Bárbara (Río Frayle) y Batolito Antioqueño (San Carlos).

Por supuesto, la clasificación propuesta podrá ser mejorada en futuras investigaciones con base en criterios adicionales, mejor conocimiento de cada unidad y trabajo de campo (p. ej., texturas, grados de meteorización medidos en campo, etc.). Por estas razones la extrapolación de la clasificación y pesos asignados debe ser cuidadosa. A ninguna unidad se le asignó susceptibilidad nula.

**Tabla 17.** Clasificación de geología (Som).

Peso	Susceptibilidad	Descripción
1	Baja	Rocas sedimentarias continentales, principalmente conglomerados, areniscas, tobas dacíticas, con intercalaciones de arcillolitas y conglomerados.
3	Moderada	Depósitos sedimentarios, arenas tobáceas, diatomitas, arcillas, gravas. Miembro sedimentario-volcánico, principalmente rocas sedimentarias marinas grauwas, areniscas, calizas, lutitas y chert. Rocas volcánicas submarinas de composición intermedia a básica, principalmente diabasas y andesitas. Lavas basálticas. Esquistos cuarzo-ceríticos con unidades locales de cuarcita. Anfibolitas y esquistos anfibólicos, cloríticos y grafiticos.
5	Alta	Aluviones recientes. Depósitos piroclásticos, cenizas y lapilli. Depósitos no consolidados de cenizas volcánicas, depósitos de flujos de lodo y depósitos de piedemonte. Rocas ígneas intrusivas (pórfidos, cuarzo – dioritas, dioritas). Depósitos glaciales sin diferenciar. Rocas ultramáficas serpentinizadas.
6	Muy Alta	Cualquier unidad litológica en zona de cataclisis.



**Figura 31.** Submodelo geología (Som).

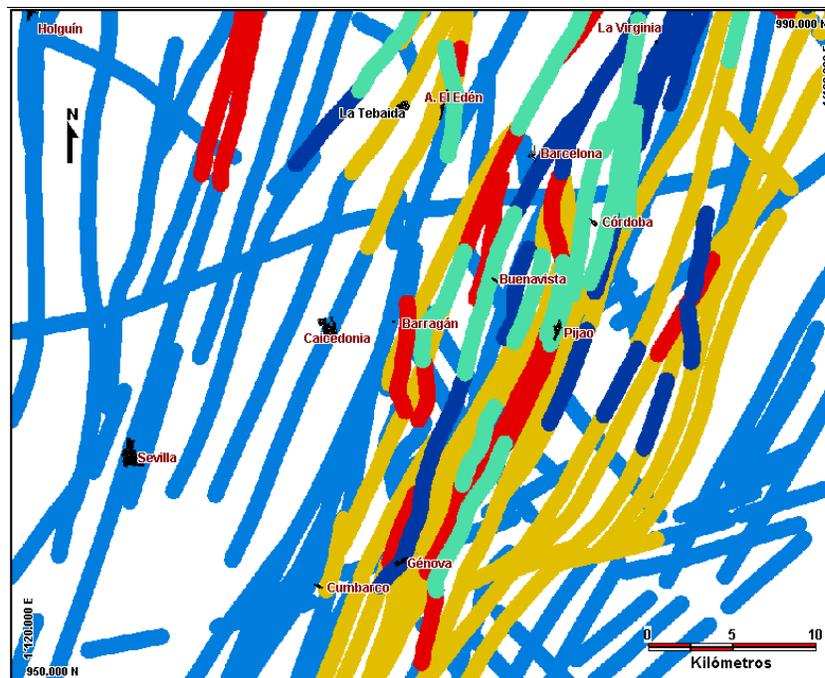
La revisión de literatura y diversos estudios de caso hacen énfasis en el importante papel que juegan las estructuras en la susceptibilidad a movimientos de masa. Para mejorar la valoración de la geología con respecto a trabajos previos (OSSO, 1995a, b), y porque la cartografía geológica utilizada aquí tiene mejor resolución y cantidad de información, se consideró la influencia de las estructuras, agrupándolas en dos categorías:

- Estructuras lineales:

A partir del “Mapa Neotectónico Preliminar del Quindío, Rasgos Morfoneotectónicos” a escala 1:100 000 del estudio de Paris (1997), integrado con las estructuras lineales de las planchas geológicas digitalizadas, se incluyeron las fallas cartografiadas en la zona de estudio. Para la valoración se consideró la actividad neotectónica de cada segmento de falla de acuerdo con Paris (1997). El criterio usado para su valoración fue que a

mayor grado de actividad reportada se espera que el grado de fracturamiento sobre las unidades litológicas sea mayor o, por lo menos, que comprometa los materiales más superficiales y las unidades geológicas más recientes, aumentando su grado de inestabilidad. Por otra parte, el grado de fracturamiento decrece al aumentar la distancia al eje de la estructura considerada.

Como área de influencia en la inestabilidad potencial para cada falla se asignó un corredor de un km de ancho (Figura 32). Los pesos se asignaron como se muestra en la Tabla 18. En donde dos o más estructuras estaban superpuestas se dió prioridad a los pesos más altos (Figura 33).



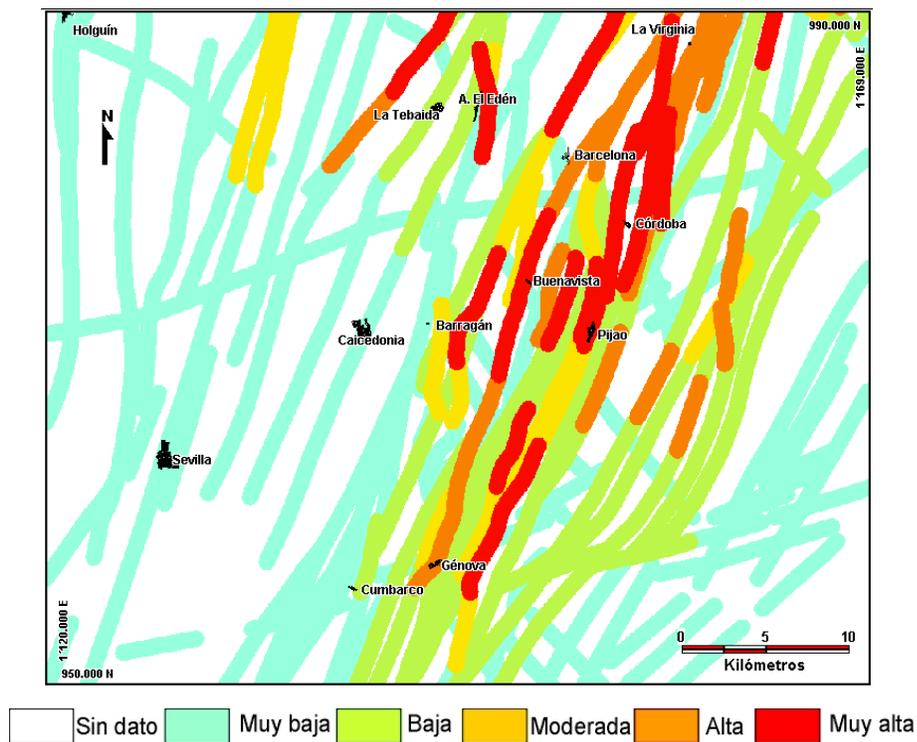
**Figura 32.** Estructuras lineales.

Igual que en casos anteriores, la clasificación y asignación de pesos a esta variable, lo mismo que el ancho de los corredores de influencia, deberán ser revaluados en el futuro. Además, sólo se dispuso de información sobre actividad neotectónica para fallas

en el territorio del Quindío.

**Tabla 18.** Clasificación de las estructuras lineales.

Peso	Susceptibilidad	Descripción
1	Muy Baja	Falla cubierta, fotogeológica, aproximada e inferida.
3	Baja	Falla sin indicios de actividad neotectónica.
4	Moderada	Falla con actividad neotectónica débil y/o baja
5	Alta	Falla con actividad neotectónica moderada
6	Muy Alta	Falla con actividad neotectónica fuerte, comprobada en campo.



**Figura 33.** Submodelo de estructuras lineales.

En este trabajo se asume que la influencia de la falla es simétrica a ambos lados, los que constituye una simplificación, ya que no se consideran otros factores como el tipo de movimiento y buzamiento. Esta generalización debe ser revisada en futuros estudios y, de ser posible, mejorada con nueva información y conocimiento, por ejemplo sobre la

densidad de fracturamiento, diaclasamiento o fallamiento por unidad de área.

- Estructuras puntuales:

A partir de las planchas 243 y 262 a escala 1:100 000 (Mc Court et al., 1984), se digitalizaron los puntos de control de estratificación en rocas sedimentarias del Terciario, en una franja al Oeste de la zona de estudio y, en rocas metamórficas del Cretáceo y del Paleozóico hacia el centro y NE de la misma.

Sobre las rocas del Terciario se identificaron unos 150 sitios con medición de rumbo y buzamiento de la estratificación, con tendencia regional Norte – Sur y predominio de buzamientos al Este. En zonas de anticlinales se delimitaron áreas con rumbo similar y buzamiento al Oeste.

Sobre rocas del Cretáceo y Paleozoico la tendencia regional de la foliación coincide con la dirección general de las unidades y otras estructuras geológicas: N 30° E, con buzamiento general al SE. En una pequeña área al sur del Páramo de Chile (SE de la zona de estudio) la foliación tiene tendencia E-W con buzamiento al N, asociada a fallas de dirección NEE como la de Ibagué (Mc Court et al., 1984).

Con base en la densidad y tendencias regionales de las estructuras puntuales observadas en las planchas geológicas se seleccionaron cuatro tipos de áreas, coincidentes con unidades litológicas, con similar tendencia regional en estas estructuras, a saber: NS/W, NS/E, N30°E/SE y EW/N.

Como la coincidencia entre el rumbo y buzamiento de las estructuras geológicas con la orientación de las pendientes de las laderas induce mayor inestabilidad potencial, se generó un modelo de orientación de las laderas que permitiera calificar en cada área las vertientes coincidentes. El modelo así obtenido es un modelo digital de terreno (MDT), denominado Modelo de Aspectos o modelo de orientación de las pendientes (ver Anexo

B).

Con este procedimiento se obtuvo una regionalización de la influencia de las estructuras puntuales, la cual se simplificó dándole pesos máximos, de seis, a las laderas coincidentes y de uno a las opuestas, según la Tabla 19.

**Tabla 19.** Clasificación de las estructuras puntuales.

Área	Aspecto	Peso	Susceptibilidad
NS/E	181° - 299°	1	Muy baja
	0° - 180°	6	Muy alta
NS/W	0° - 180°	1	Muy baja
	181° - 299°	6	Muy alta
N30°E/SE	211° - 29°	1	Muy baja
	30° - 210°	6	Muy alta
EW/N	91° - 269°	1	Muy baja
	270° - 90°	6	Muy alta

Así, la Figura 34, ilustra las laderas con mayor y menor influencia a movimientos de masa en función de las estructuras puntuales en relación con el Aspecto.

En los casos en que el valor del Aspecto fue cero (superficie horizontal), a los pixeles correspondientes se les asignó peso 1. En la regionalización no se incluyeron algunos datos puntuales con dirección NW y buzamientos al E y al W en las rocas del Terciario ni algunos valores de rumbo N30°E con buzamientos al W, posiblemente correspondientes a pliegues locales en las rocas metamórficas. De esta manera se obtuvo el submodelo de estructuras puntuales mostrado en la Figura 35.

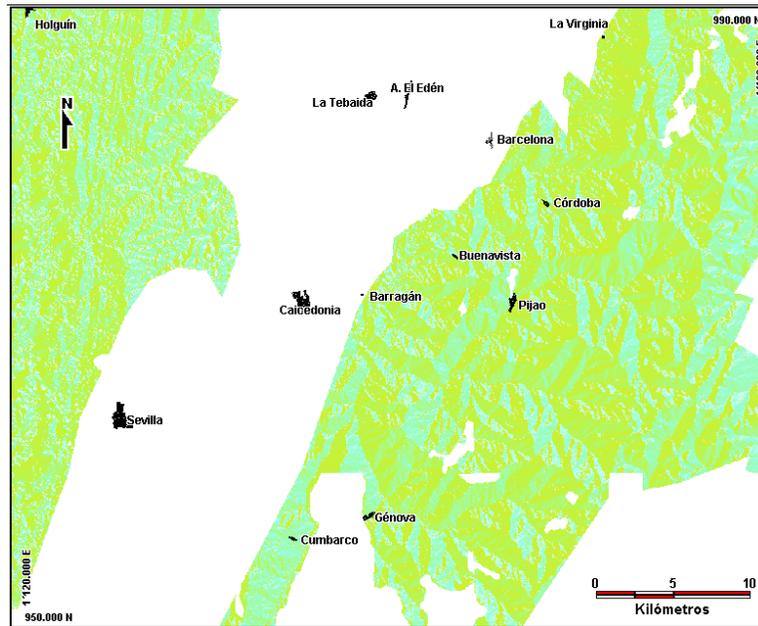


Figura 34. Estructuras puntuales regionalizadas con relación al aspecto.

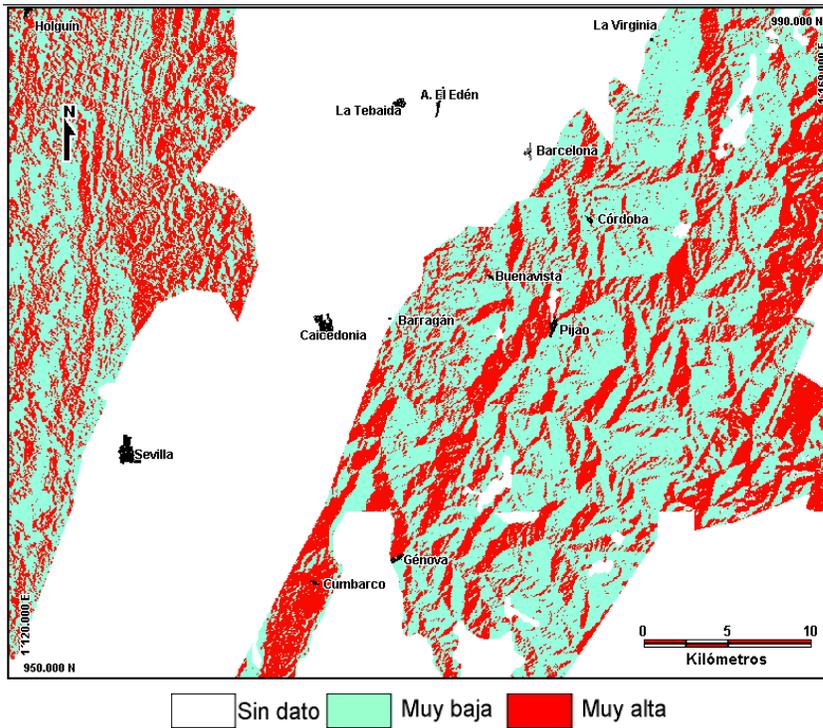


Figura 35. Submodelo de estructuras puntuales.

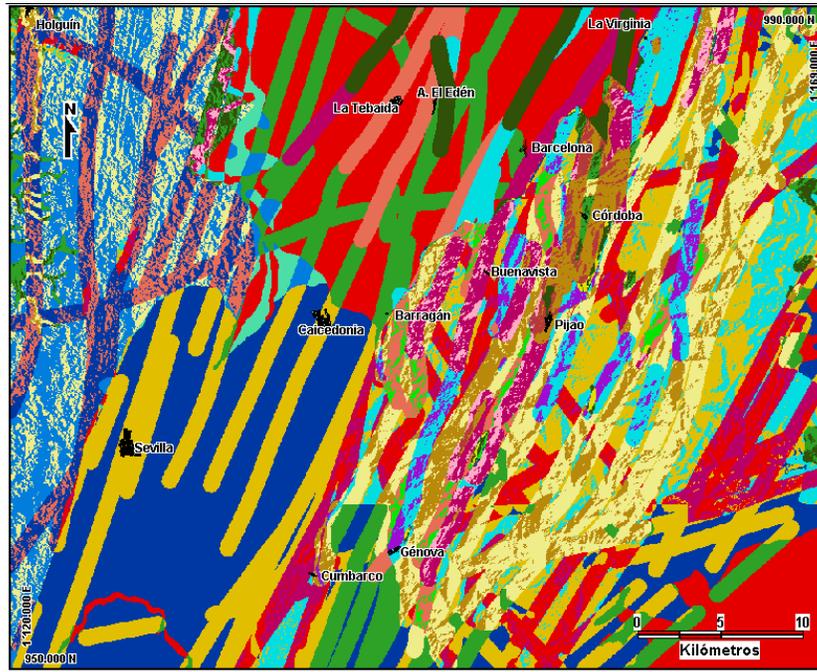
Para la valoración final de la geología, ésta se consideró como un nuevo submodelo correspondiente a la suma de la clasificación obtenida para las unidades litológicas y las estructuras lineales y puntuales, mediante la ecuación:

$$\text{Geología (G)} = \text{Unidades litológicas} + \text{Estructuras lineales} + \text{Estructuras puntuales.}$$

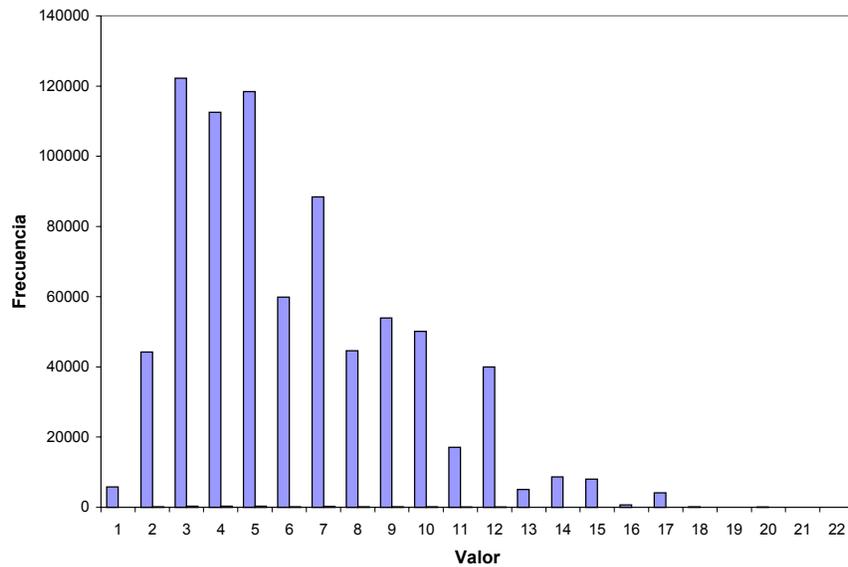
De esta suma de imágenes se obtuvo una nueva con valores de susceptibilidad por pixel entre 1 y 22. (Tabla 20, Figura 36)

**Tabla 20.** Valores de susceptibilidad modelo geológico – estructural.

Valor de susceptibilidad	No. de Pixeles	Área (km <sup>2</sup> )
1	5787	14.47
2	44238	110.60
3	122236	305.59
4	112588	281.47
5	118448	296.12
6	59864	149.66
7	88410	221.03
8	44612	111.53
9	53962	134.91
10	50107	125.27
11	17072	42.68
12	40016	100.04
13	5053	12.63
14	8643	21.61
15	7988	19.97
16	655	1.64
17	4093	10.23
18	135	0.34
19	24	0.06
20	40	0.10
21	21	0.05
22	8	0.02



**Figura 36.** Submodelo geología (Sp) sin clasificar.



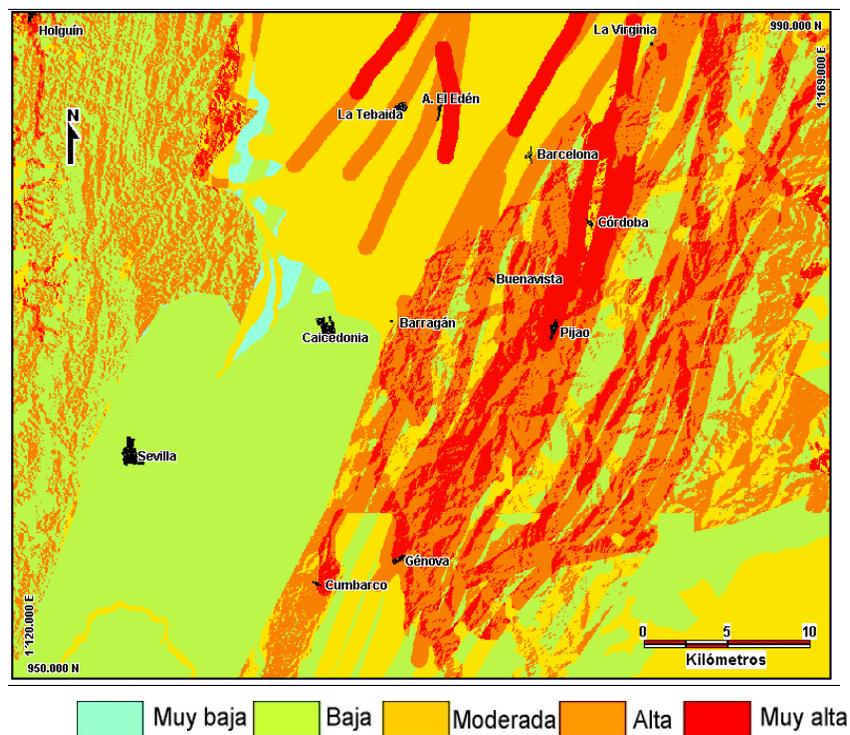
**Figura 37.** Píxeles por valores de susceptibilidad de geología (Sp).

Los valores de susceptibilidad del sub modelo geológico-estructural se agruparon en

cinco clases con apoyo del histograma de frecuencias (Figura 37). A cada clase se le asignó un peso (importancia) que es el grado de susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos de masa (Tabla 21). La imagen obtenida de la suma fue clasificada en éstas categorías y es el resultado final de la valoración de la geología. (Figura 38)

**Tabla 21.** Clasificación de la geología (Sp).

Peso	Susceptibilidad	Rango
1	Muy Baja	1 – 2
3	Baja	3 – 5
4	Moderada	6 – 7
5	Alta	8 – 11
6	Muy Alta	12 – 22



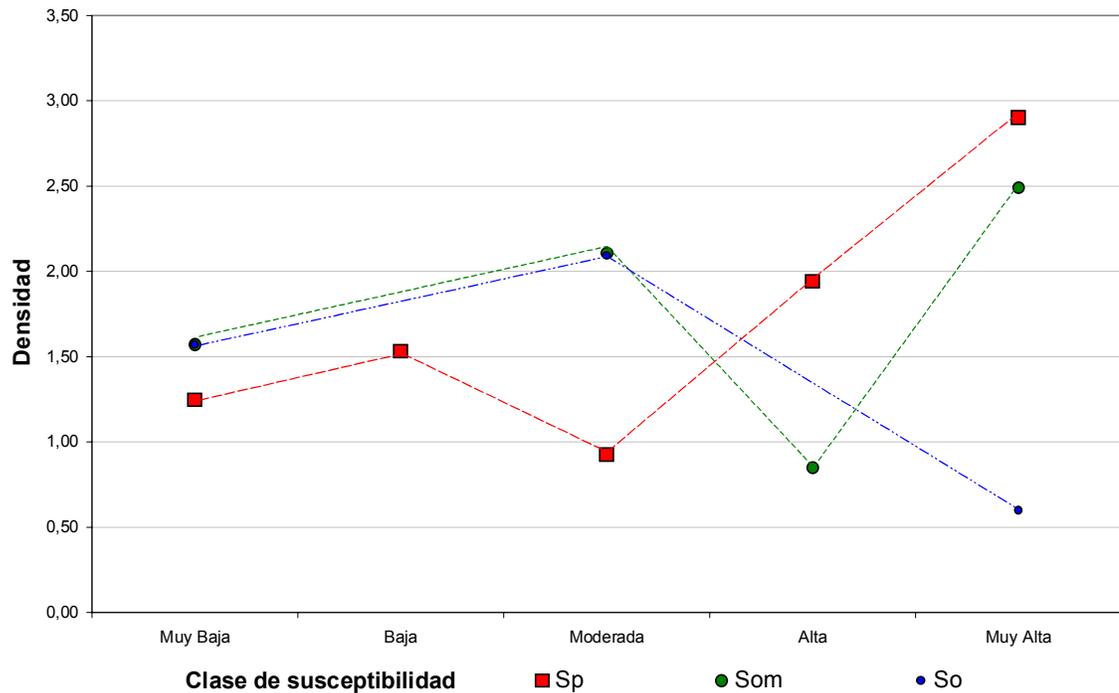
**Figura 38.** Submodelo geología (Sp).

### **6.8.3 Evaluación submodelo de geología.**

Igual que en el submodelo de pendientes, en este caso  $S_o$ , no parece expresar adecuadamente la susceptibilidad en los valores más altos. De hecho, lo que predice este submodelo en la clase de Muy Alta Susceptibilidad, corresponde a la región con menor densidad de huellas de movimientos de masa.

Las curvas de densidad (Figura 39), de  $S_{om}$  y  $S_p$  no son fácilmente comparables, al contrario, parecen contradictorias en las clases Moderada y Alta. Una primera aproximación a la explicación de estas diferencias se describe a continuación.

Un porcentaje importante de las áreas modeladas como de susceptibilidad Moderada corresponde a terrenos del Terciario de la Formación Armenia. Esta unidad por sí misma fue inicialmente incluida como de susceptibilidad Alta, mientras que las rocas del Terciario, al W de la zona de estudio, tenían susceptibilidad Baja y las rocas ígneas y metamórficas Moderada (Figura 31). Sin embargo, la suma de estructuras lineales y de valores de susceptibilidad en regiones con estructuras puntuales aumentaron los valores de susceptibilidad en ellas, mientras que en el proceso final de clasificación la Formación Armenia descendió al rango Moderado (Figura 38), unidad sobre la cual las huellas de movimientos de masa son menos frecuentes, concentrándose a lo largo de canales de incisión de los ríos. En primera aproximación esto explica porqué la clase Moderada presenta la menor densidad de huellas de movimientos en el submodelo geología  $S_p$ .



**Figura 39.** Densidad de movimientos de masa según submodelos de geología.

## 6.9 MODELOS.

Con base en la clasificación y tratamiento de de las variables pendientes, humedad y geología descritas, se generaron tres modelos de susceptibilidad So (Modelo tipo OSSO), Som (Modelo OSSO modificado) y Sp (Modelo propuesto).

### 6.9.1 Modelo So.

Este se generó utilizando los criterios y variables según OSSO (1995a, b), aplicados a escala 1: 500 000 (Tabla 8: Pendientes, Tabla 12: Humedad, Tabla 16: Geología), con la finalidad de evaluar su comportamiento en la zona de estudio a la escala de trabajo 1:100 000, y como un referente de comparación de este proyecto. Los modelos de

clasificación de las variables corresponden a las Figuras 20: Pendientes, 26: Humedad y 30: Geología.

So fué generado mediante la ecuación general **S**, con la siguiente expresión específica:  
 $So = \text{Figura 20} \times \text{Figura 26} \times \text{Figura 30}$ , a partir de la cual se generó una imagen (Figura 40), con valores de susceptibilidad entre 0 y 144, mostrados en la Tabla 22 y Figura 41: Histograma de Frecuencias.

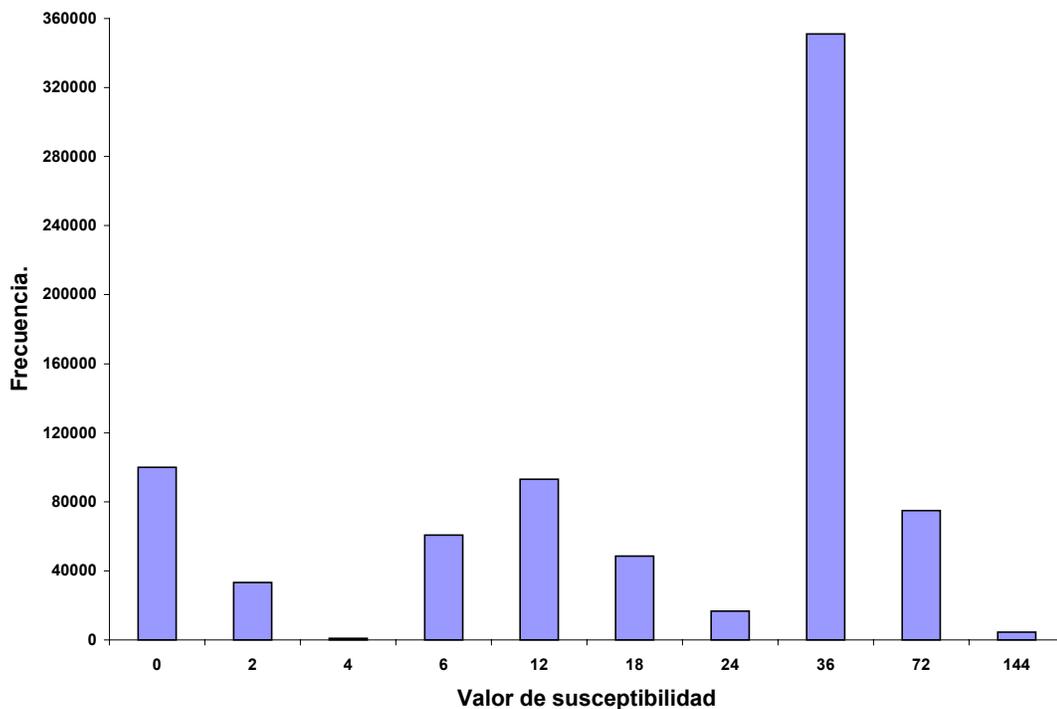


**Figura 40.** Modelo So sin reclasificar.

**Tabla 22.** Valores de susceptibilidad del modelo So.

Valor de susceptibilidad	Frecuencia	Área (km <sup>2</sup> )
0	99.857	249.64
2	33.344	83.36
4	966	2.42
6	60.793	151.98
12	93.117	232.79
18	48.651	121.63

24	16.691	41.73
36	351.058	877.65
72	74.993	187.48
144	4.530	11.33

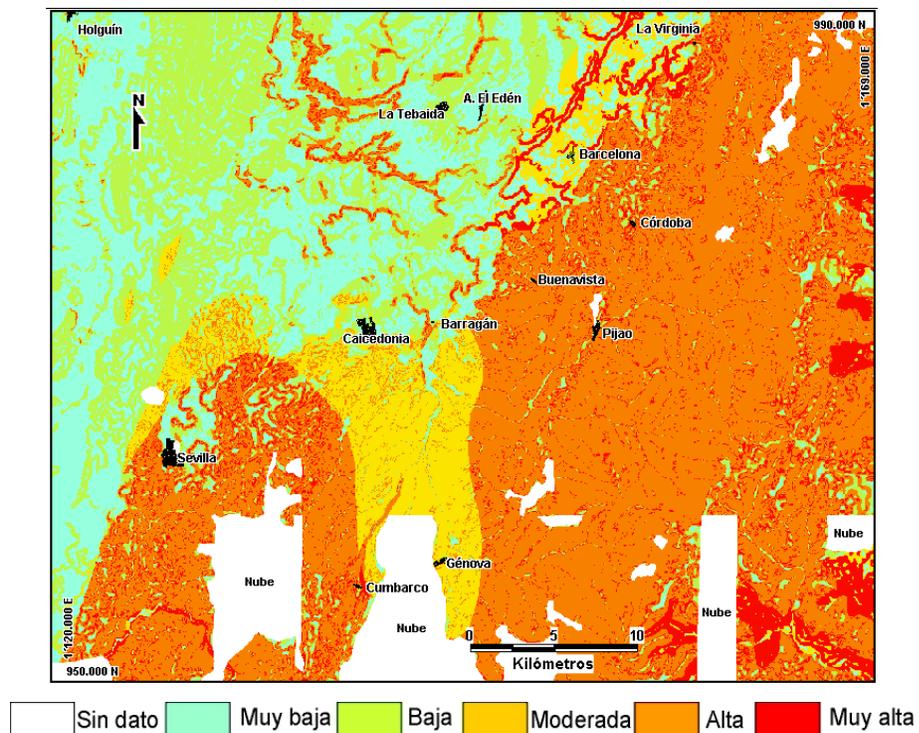


**Figura 41.** Pixeles por valores de susceptibilidad de So.

Los valores obtenidos se agruparon (reclasificaron) en cinco rangos a cada uno de los cuales se le asignó un peso cualitativo según la Tabla 23 y la Figura 42. Esta figura es la reproducción, de acuerdo con los criterios de OSSO (1995a, b), del modelo So, con la salvedad de ser realizado a una escala mayor a la original y con criterios de reclasificación propios de este estudio.

**Tabla 23.** Reclasificación del modelo So.

Peso	Susceptibilidad	Rango
1	Muy Baja	0 – 6
2	Baja	7 – 14
3	Moderada	15 – 30
4	Alta	31 – 44
5	Muy Alta	45 – 145



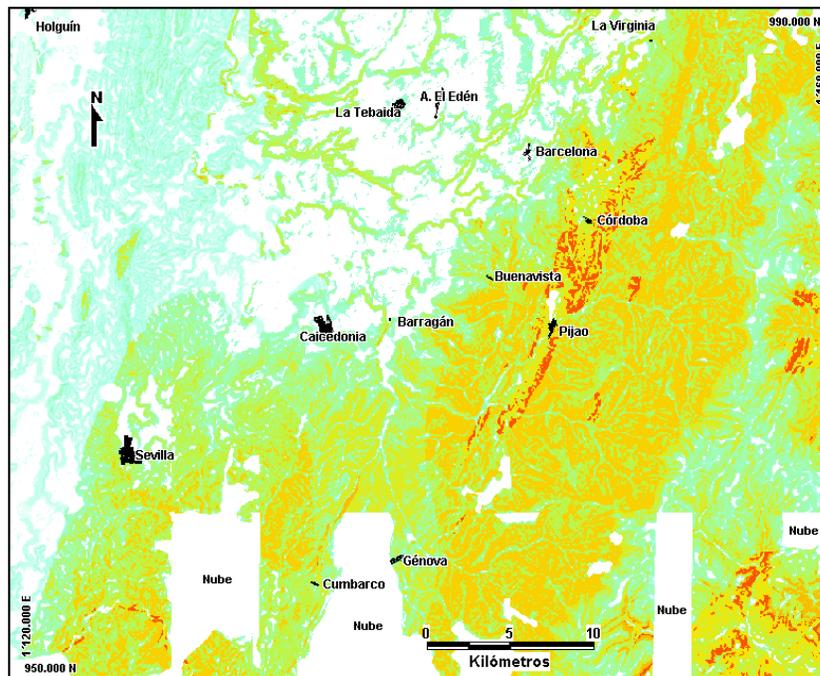
**Figura 42.** Modelo So.

### 6.9.2 Modelo Som.

Som se generó a partir de la valoración de variables propuesta en este estudio. Las diferencias con el modelo So, consisten en la estimación de la humedad en función de la precipitación, altura y zonas climáticas (Tabla 14 y Figura 27), una nueva valoración de

pendientes (Tabla 9 y Figura 21) y de las unidades litológicas (Tabla 17 y Figura 31). La ecuación específica del modelo es Som = Figura 21 x Figura 27 x Figura 31.

Con ello se obtuvieron valores de píxeles entre 0 y 180, mostrados en Figura 43 y la Tabla 24, lo mismo que en el histograma de la Figura 44.

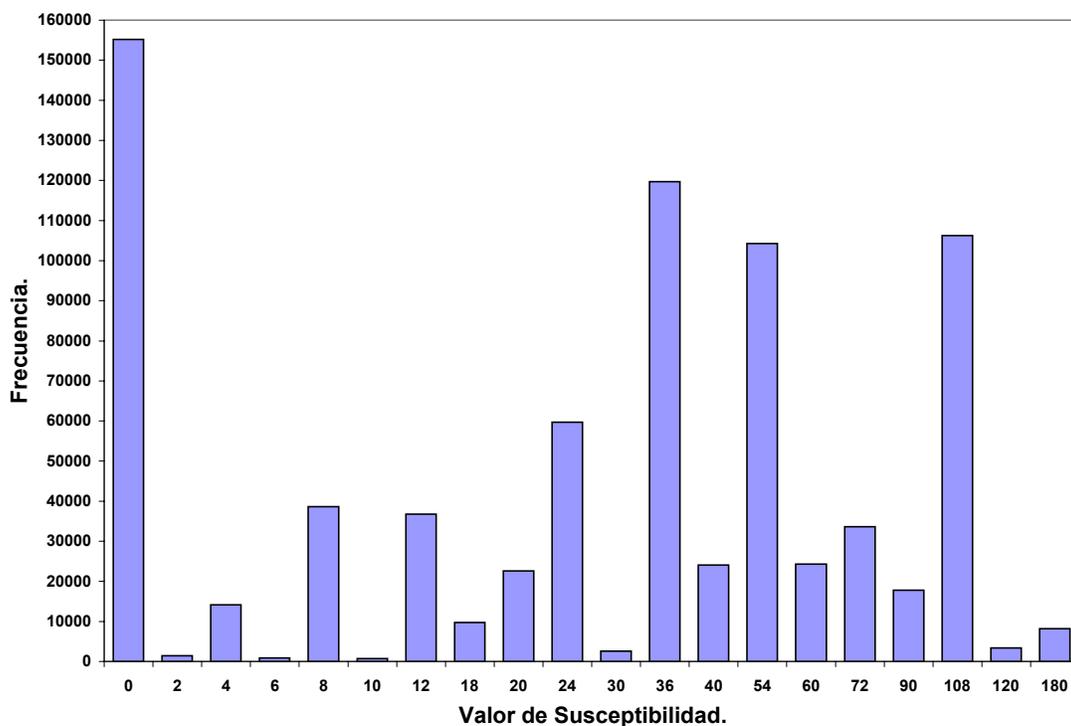


**Figura 43.** Modelo Som sin reclasificar.

**Tabla 24.** Valores de susceptibilidad modelo Som.

Valor	Frecuencia	Área (Km <sup>2</sup> )
0	155.166	387,91
2	1.474	3,68
4	14.155	35,39
6	923	2,31
8	38.649	96,62
10	734	1,83
12	36.757	91,89
18	9.724	24,31
20	22.642	56,60

24	59.699	149,25
30	2.543	6,36
36	119.676	299,19
40	24.034	60,08
54	104.248	260,62
60	24.257	60,64
72	33.648	84,12
90	17.789	44,47
108	106.287	265,72
120	3.388	8,47
180	8.207	20,52



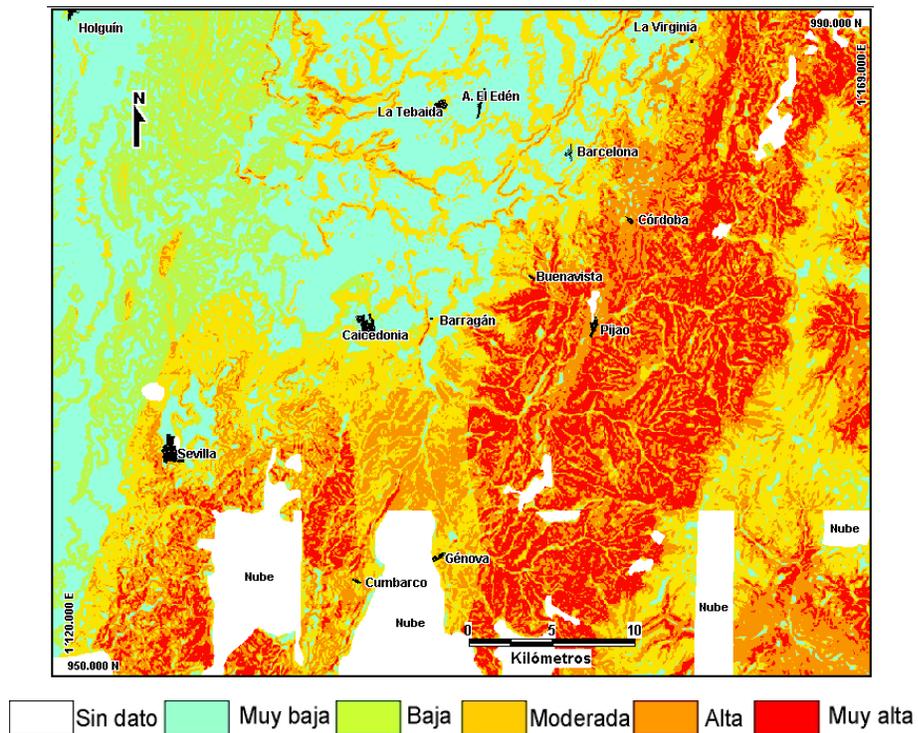
**Figura 44.** Píxeles por valores de susceptibilidad de Som.

Con igual procedimiento que en el caso anterior, para este modelo se reclasificaron los valores obtenidos como se muestra en la Tabla 25.

**Tabla 25.** Reclasificación modelo Som.

Valor	Susceptibilidad	Rango
1	Muy baja	0 – 8
2	Baja	9 – 20
3	Moderada	21 – 50
4	Alta	51 – 100
5	Muy Alta	101 - 180

A partir de esta reclasificación se obtuvo el modelo Som (Figura 45), cuya más notoria diferencia con So (Figura 42), por apreciación visual, es el incremento de áreas de la mayor susceptibilidad.



**Figura 45.** Modelo Som.

### 6.9.3 Modelo Sp.

Con similar procedimiento que para So y Som, para la generación de Sp se utilizó la ecuación específica  $Sp = \text{Figura 21} \times \text{Figura 27} \times \text{Figura 38}$ .

Como se ha presentado, la Figura 38, corresponde a el submodelo de geología, en el cual se introdujeron criterios y variables de estructuras geológicas, documentadas en la cartografía disponible para algunas de las unidades litológicas. Los submodelos de pendientes y humedad son iguales a los usados en Som.

Los valores de pixeles obtenidos con la ecuación Sp oscilan entre 0 y 216 (Figura 46 y Tabla 26). Igual que en la comparación entre Som y Som, en este caso Sp muestra, a primera vista, un incremento del rango más alto de la susceptibilidad.

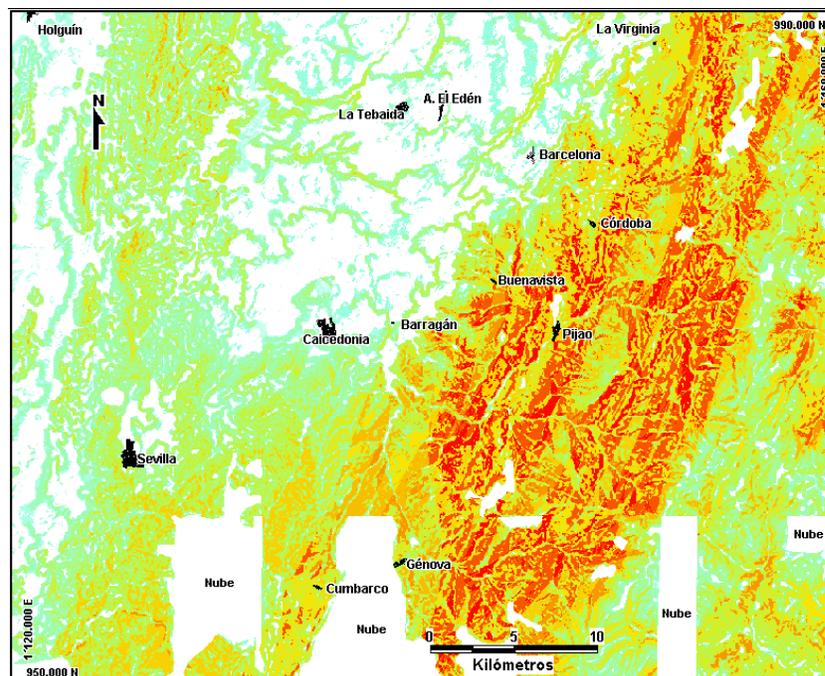
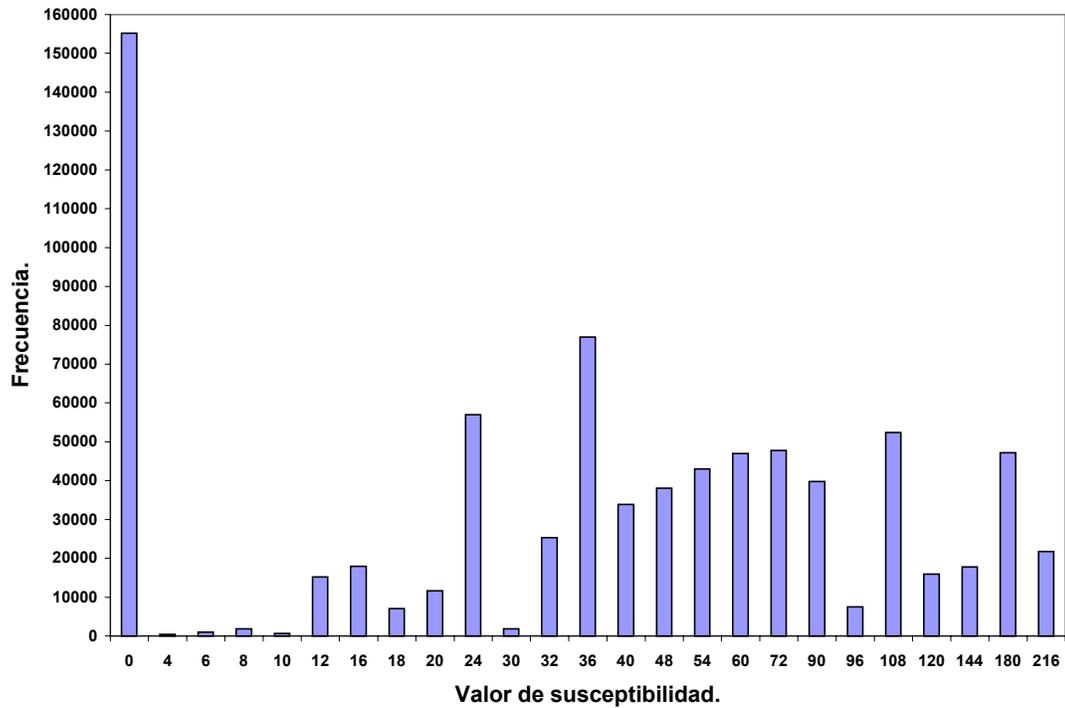


Figura 46. Modelo Sp sin reclasificar.

**Tabla 26.** Valores de susceptibilidad modelo Sp.

Valor	Frecuencia	Área (km <sup>2</sup> )
0	155.166	387.91
4	441	1.10
6	1.034	2.59
8	1826	4.57
10	630	1.58
12	152.223	38.06
18	7.091	17.73
20	11.621	29.05
24	56.944	14.36
30	1.841	4.6
32	25.345	63.36
36	76.943	19.236
40	33.843	84.81
48	38.038	95.10
54	43.004	107.51
60	47.019	117.55
72	47.778	119.45
90	39.802	99.51
96	7.476	18.69
108	52.370	130.93
120	15.940	39.85
144	17.785	44.46
180	47.152	117.88
216	21.722	54.31
180	47.152	117.88
216	21.722	54.31

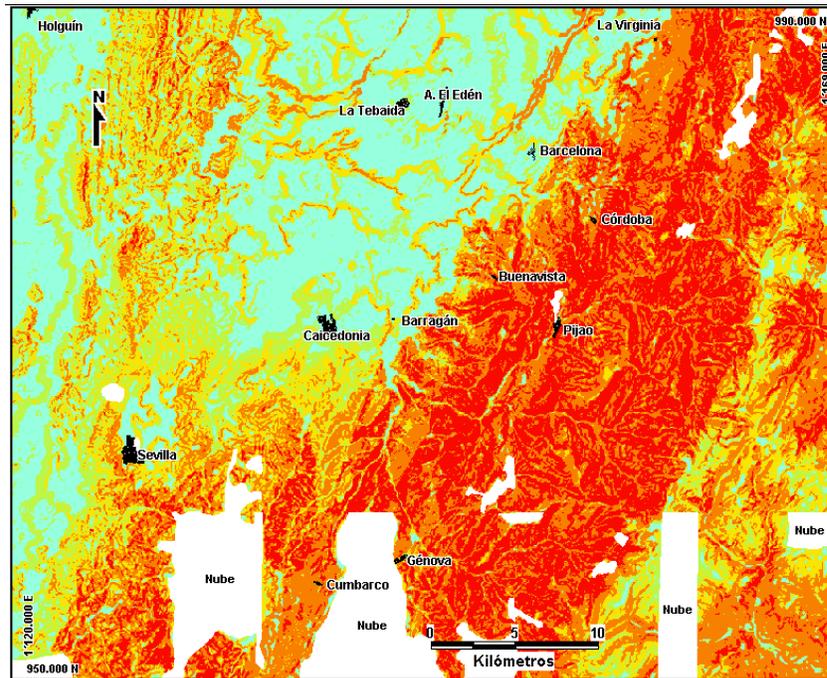


**Figura 47.** Píxeles por valor de susceptibilidad de Sp.

Los valores de la Tabla 26 se ilustran en la Figura 47, histograma que igualmente se utilizó como apoyo para la reclasificación, Tabla 27, para obtener, finalmente, el modelo Sp de la Figura 48.

**Tabla 27.** Reclasificación modelo Sp.

Valor	Susceptibilidad	Rango
1	Muy baja	0 – 9
2	Baja	10 – 25
3	Moderada	26 – 41
4	Alta	42 – 100
5	Muy Alta	101 – 216



Sin dato
  Muy baja
  Baja
  Moderada
  Alta
  Muy alta

**Figura 48.** Modelo Sp.

**Tabla 28.** Áreas por modelo de susceptibilidad.

Modelos de Susceptibilidad	Area por clase de susceptibilidad (km <sup>2</sup> )				
	Muy Baja	Baja	Moderada	Alta	Muy Alta
So	332.61	345.34	147.52	802.37	175.25
Som	421.08	194.96	478.45	423.45	285.06
Sp	388.24	235.02	288.30	514.12	377.41

#### 6.9.4 Evaluación de modelos.

Después de evaluar las variables y submodelos temáticos de pendientes, humedad y geología, la pregunta obvia es ¿Cómo se comportan los modelos con respecto a las reclasificaciones adoptadas?. Para resolverla en primera instancia se evaluaron los modelos no reclasificados (Figuras 40: So, 43: Som y 46: Sp). Esto se muestra en la Figura 49. Obsérvese que la continuidad (abcisas y ordenadas) de los modelos son diferenciables, especialmente en So, que muestra menor continuidad en las abcisas y mayores saltos en los valores de las ordenadas. Como era de esperarse, de acuerdo con la evaluación de los submodelos ya realizada, el modelo Sp presenta la mejor continuidad en la figura, con una *impresión visual*, de curva logarítmica. En otras palabras, sugiere que el modelo es más representativo de procesos de la Naturaleza gobernados por variables que interactúan de manera continua, no escalonada.

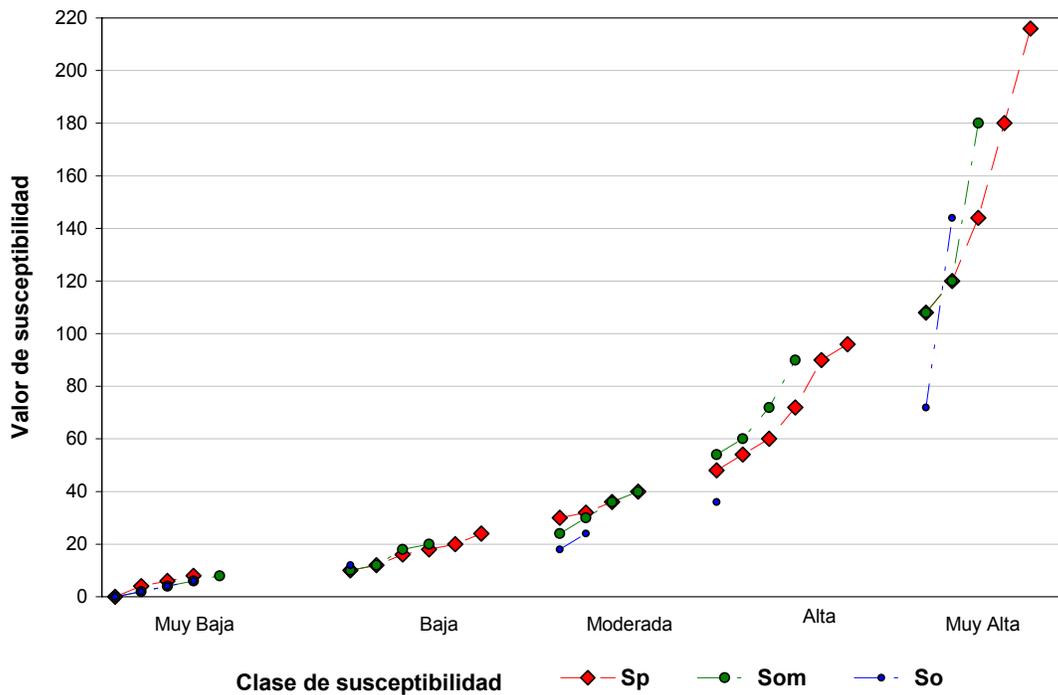
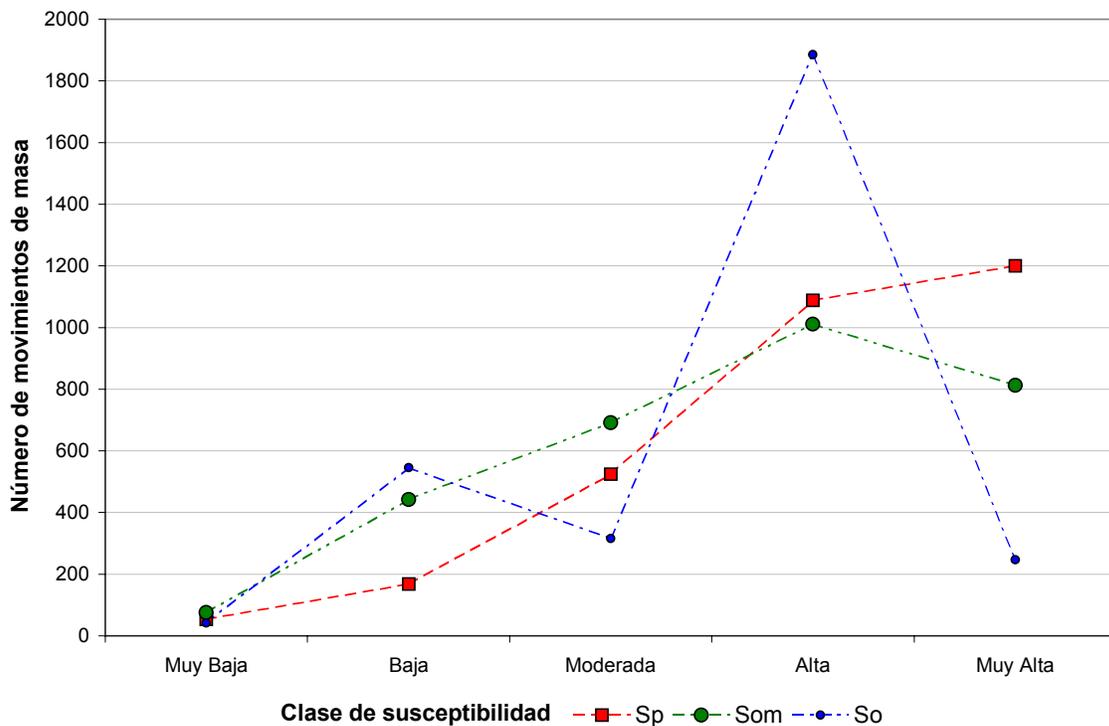


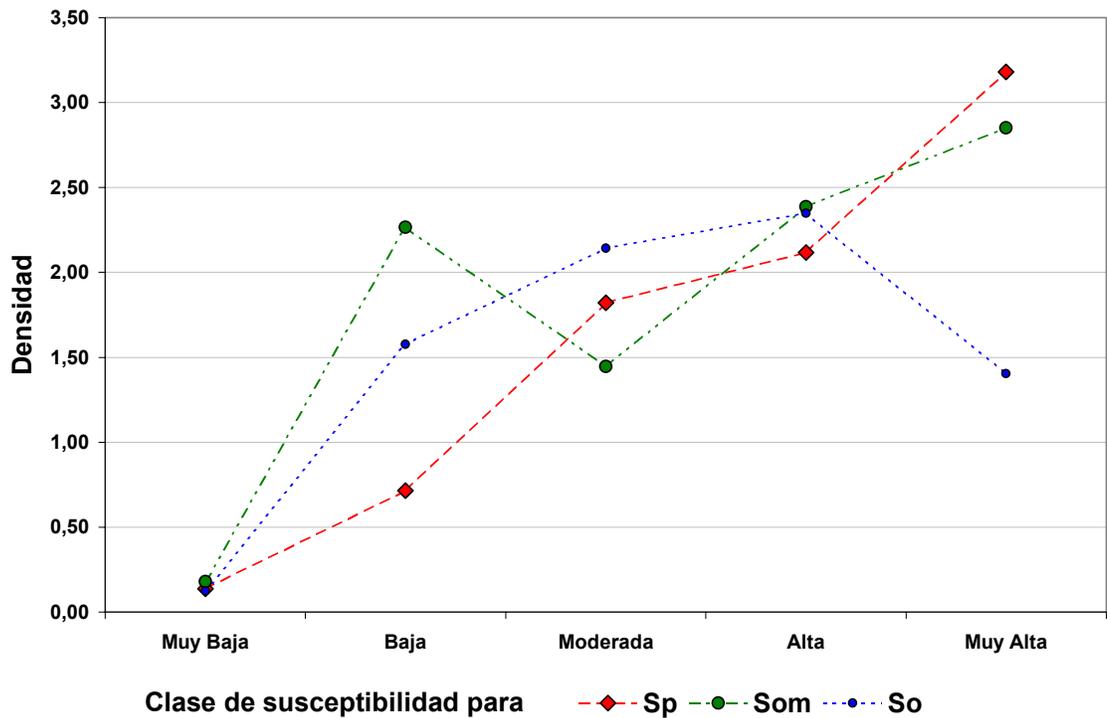
Figura 49. Valores de susceptibilidad por modelo sin reclasificar.

Ahora bien, ¿cómo se comportan los modelos con respecto al inventario de referencia?. Para resolver esta pregunta en primera instancia se comparó cada clase de susceptibilidad en cada modelo con respecto al número de huellas. Esto se representa en la Figura 50. De nuevo, el modelo más anómalo parece ser So. El número de huellas representado en la clase Alta supera de manera destacada los valores de los otros modelos, mientras que en la clase Muy Alta desciende por debajo de casi todos los valores obtenidos. Sin embargo, esto no es preocupante, porque la figura no la relación entre el número de huellas y el área que cada clase ocupa en cada modelo.



**Figura 50.** Número de huellas de movimiento de masa por modelo.

En consecuencia, la siguiente pregunta obvia es ¿cuál es la relación entre número de huellas y área por clase de susceptibilidad en cada modelo?. Mejor aún, ¿hay alguna relación entre los grados de susceptibilidad de cada modelo y el inventario de referencia? Para responder esta pregunta se calculó la densidad que expresa la ocurrencia de movimientos de masa (huellas) por unidad de área en cada clase de susceptibilidad en cada modelo, como se muestra en la Figura 51.



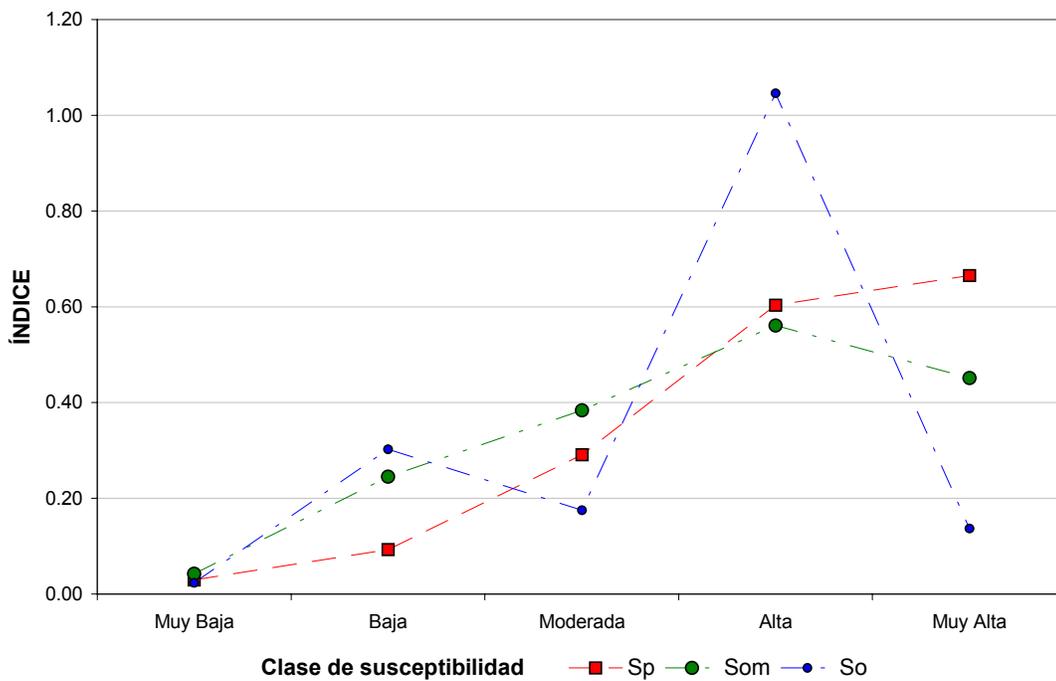
**Figura 51.** Densidad de huellas de movimientos de masa por modelo.

De forma preliminar se construyó un índice que expresa la ocurrencia de huellas de movimientos de masa por área total de la zona en cada modelo, como se muestra en la Figura 52.

Los resultados encontrados en las Figuras 51 y 52 son similares, pero en posteriores estudios se espera desarrollar un índice que permita evaluar con mayor rigor la validez de el modelo de susceptibilidad, a partir de un mapa de referencia.

La calidad de los modelos, interpretada como el grado de representación que expresan de los procesos en la naturaleza, debe conducir a que la densidad y el índice sean más pequeños en las áreas modeladas con menor susceptibilidad y mayor en las más altas.

Aunque los valores de la densidad y el índice para cada clase son discretos, en las Figuras 51 y 52 se representan como si se hubiera interpolado entre las clases de tal manera que se genera la sensación de obtener una curva para cada modelo. En la evaluación se utiliza el término curva con la restricción aquí indicada.



**Figura 52.** Índice de ocurrencia de movimientos de masa por modelo.

En la clase Muy Baja susceptibilidad los tres modelos son coincidentes, en términos de sus respectivos índices. En las demás clases las curvas difieren, especialmente la del modelo So con tres inconsistencias notables: índice bajo en la clase Moderada, muy alto en la Alta y muy bajo en la Muy Alta. La más notable de las anomalías radica en que para la clasificación Muy Alta el índice de So es menor que para las demás clases, excepto en la Muy Baja. En primera aproximación, las anomalías del índice de So

sugieren que el modelo no representa adecuadamente la susceptibilidad y no debe ser utilizado en la zona de estudio, a la escala de trabajo desarrollada.

Las curvas de Som y Sp tienen valores similares en las clases Muy Baja y Alta y difieren principalmente en las clases Baja y Muy Alta. La curva de Som es casi lineal entre las clases Muy Baja y Alta y desciende en la Muy Alta con respecto a la Alta, mientras que la curva Sp sugiere un comportamiento doblemente asintótico con el índice de la clase Muy Alta mayor que el de la clase Alta. El análisis anterior sugiere que el índice de Sp se comporta como una *Función de Pertenencia Tipo S* (Cardona y Carreño, 2002).

Prácticamente ninguno de los autores revisados realiza validaciones de los modelos a los cuales llegan. Sólo se encontró un documento (Fabbri and Chung, 2001), en el cual los autores utilizan una metodología similar a la seguida en este trabajo, comparando modelos amenaza por movimientos de masa, generados a partir de superposición de mapas, con 123 movimientos ocurridos antes y después de 1955. Los autores llegan a curvas con tendencias similares a las del modelo Sp.

Como el resultado final (Figura 48) corresponde al producto de los índices de cada submodelo afectado por la reclasificación, la forma de la curva también indica que los criterios generales adoptados en las reclasificaciones son aceptables. Sin embargo, y esto es propio de la metodología adoptada, los criterios de clasificación y reclasificación están abiertos a la discusión.

## **6.10 RESULTADOS.**

El modelo Sp tiene un significado de predictibilidad espacial e indica, en la región, los rangos y grados de susceptibilidad que a la escala utilizada, muestra de manera coherente la disposición a la ocurrencia de movimientos de masa, o mejor aún, de zonas en las que los movimientos de masa tienen mayor potencial de ocurrencia, teniendo como referencia huellas con pixeles de 50 o más m de lado. Es además un

insumo para evaluaciones de amenaza por movimientos de masa, avenidas torrenciales.

Otras validaciones del modelo, a escalas más detallada para calibrar su sensibilidad y limitaciones, requiere de inventarios con fotografías aéreas o bases de datos homogéneas y detalladas de inventarios de campo, no disponibles en este momento.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **7.1 CONCLUSIONES.**

- Las variables que intervienen en la evolución de un paisaje son todos los elementos que lo constituyen; los patrones de relación de estos elementos generan variados procesos que, en su conjunto, hacen del paisaje una estructura de cambio permanente. Entre una variada gama de procesos de “evolución” o cambios del paisaje se encuentran los movimientos de masa. En este sentido, para una escala regional, se puede modelar la susceptibilidad a movimientos de masa a partir del análisis de la interacción entre la geología, humedad del terreno y pendientes.
- Este trabajo puede ser un aporte para aproximaciones futuras y más detalladas a la comprensión de los complejos procesos que contribuyen a la transformación del paisaje en la zona de estudio. Los movimientos de masa, vistos a escala regional y sobre un período de tiempo del orden de los  $10^2$  años, son un fenómeno frecuente en el Eje Cafetero, debido a las condiciones ambientales que favorecen su ocurrencia, como se observa en los modelos de susceptibilidad. Estos fenómenos están desplazando material de las partes altas de las montañas y transportándolo a través de los drenajes. Se requiere información de tasas de depositación, entre otros datos, para reconstruir el proceso completo y entenderlo mejor en un contexto de evolución del paisaje.

- El modelo de susceptibilidad del territorio a los movimientos de masa  $S_p$ , desarrollado y propuesto para la zona de estudio, muestra un grado de correlación aceptable con respecto a un modelo patrón de inventario de huellas de movimientos en la zona. El índice de movimientos de masa por clase de susceptibilidad (Muy Baja, Baja, Moderada, Alta y Muy alta), indica que se trata de un modelo de predictibilidad tipo S (doblemente asintótico).
- Con respecto a modelos previos, se encontró que una mejor clasificación de la geología, incluyendo variables estructurales, y un modelo de humedad que va más allá de las precipitaciones (isoyetas), mejoran sustancialmente la capacidad del modelo para representar la susceptibilidad a los movimientos de masa.
- Los sismos y las lluvias son procesos o eventos que pueden actuar como disparadores de movimientos de masa pero también en un momento dado como preparadores. El primer caso, ocurre cuando la magnitud del evento sísmico o de la lluvia son suficientes para alterar el equilibrio del terreno. El segundo caso, ocurre cuando un sismo agrieta el terreno generando una superficie de despegue y un periodo de lluvias intensas ó un nuevo sismo pueden generar nuevos movimientos de masa. A partir de los datos con los que se trabajó se puede decir que la secuencia de eventos *periodo intenso de lluvias – sismo fuerte – periodo intenso de lluvias* generó efectos combinados de preparación y disparo de movimientos de masa a lo largo de 1999 en la zona de estudio, manifestados más intensamente entre el 25 de enero y el 27 de febrero y en diciembre.
- El sismo del 25 de enero del 1999 en el Eje Cafetero, disparó movimientos de masa, que se concentraron en un área máxima de 1402 km<sup>2</sup> localizados a una distancia máxima de 30 km del epicentro; el área de mayor concentración de movimientos de masa fue de 136.8 km<sup>2</sup> a una distancia máxima de 11 km, en los municipios de Pijao, Córdoba y Calarcá.
- Los movimientos de masa disparados por el sismo del 25 de enero y las lluvias posteriores de enero y diciembre de 1999, ponen de manifiesto la necesidad de registrar y analizar no sólo los efectos de un sismo a nivel de infraestructura, sino

también los efectos ambientales. Los efectos ambientales se manifiestan en el corto plazo con el disparo de movimientos de masa cosísmicos y a mediano y largo plazo con la ocurrencia de movimientos de masa en sitios afectados por agrietamientos y hundimientos cosísmicos, bajo la influencia de otro agente disparador.

- Para modelar la susceptibilidad a movimientos de masa en la zona de estudio (escala regional), se asumió como aceptable utilizar la geología, la humedad y las pendientes; sin embargo, otros factores como los usos del suelo podrían ser un aporte significativo. La decisión sobre las variables que se deben usar en el modelamiento está regida por el conocimiento que se tenga de la región, la disponibilidad de información y el tiempo y recursos necesarios para el trabajo.
- La humedad como factor de susceptibilidad no se refiere a la cantidad de agua que aportan las precipitaciones sino a la cantidad de agua que permanece en el suelo; es por ello que su determinación es más que un análisis pluviométrico. El desarrollo del submodelo de humedad significó un avance con respecto a las metodologías utilizadas, especialmente en Colombia
- El 64 % de la zona de estudio presenta potencial entre moderado a muy alto de susceptibilidad a movimientos de masa. Una somera revisión de las condiciones fisiográficas y de información histórica, permite concluir que la zona se encuentra amenazada por otros fenómenos como sismos y avenidas torrenciales. Dado el alto grado de destrucción que éstos implican, surge la necesidad de plantear estudios posteriores que evalúen el grado de amenaza y la vulnerabilidad a estos fenómenos de las comunidades asentadas allí, y que los resultados de los estudios sean tenidos en cuenta en la planificación del desarrollo de la región.
- El modelo de susceptibilidad propuesto ( $S_p$ ) puede ser utilizado como variable para evaluaciones de amenaza en la zona de estudio.
- Los criterios, métodos y herramientas desarrollados y utilizados en este trabajo pueden ser aplicados en otras regiones, siempre y cuando se disponga de claridad sobre las implicaciones metodológicas, que en análisis heurísticos significan que los

criterios mismos pueden variar de uno a otro grupo de investigadores.

## **7.2 RECOMENDACIONES.**

- Dado que no todos los municipios tienen el 100% de su territorio dentro de la zona de estudio, se recomienda extender el modelo de susceptibilidad a movimientos de masa en las áreas municipales que estén por fuera de la zona de estudio, utilizando la metodología y el modelo de susceptibilidad propuestos.
- Realizar estudios detallados de susceptibilidad y amenaza por movimientos de masa a escala municipal, principalmente en los municipios de Pijao, Calarcá y Córdoba, debido a los alto potencial a la ocurrencia por movimientos de masa que poseen, obtenidos del modelo propuesto.
- Dada la alta concentración de huellas de movimientos de masa en las porciones medias y altas de las cuencas, se recomienda realizar estudios de amenazas por avenidas torrenciales.
- Realizar estudios regionales y detallados sobre el comportamiento de las aguas subterráneas, para una mejor aproximación al análisis del contenido de humedad del suelo. Además, porque una porción importante de la región estudiada drena al río La Vieja, es importante realizar estudios del balance hídrico de la cuenca, lo que sería un insumo para mejorar el modelo de humedad desarrollado.
- Hacer estudios de susceptibilidad a movimientos de masa utilizando variables como usos del suelo a diversas escalas de análisis, para detallar la influencia que tienen en el potencial de ocurrencia de movimientos de masa.
- Actualizar y homogenizar la cartografía a escala 1:25 000, de tal manera que se reduzcan los errores y las inconsistencias derivados de las fuentes disponibles.
- Diseñar y aplicar metodologías eficaces para la generación de inventarios regionales homogéneos de movimientos de masa.

- Evaluar las implicaciones sociales y económicas de los movimientos de masa en la zona de estudio.
- Promover la difusión, discusión y aplicación de los procesos y resultados obtenidos, incluyendo instituciones regionales, comunidades y municipios.

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

**ACOSTA J.** Memoria explicativa del Atlas Geológico Digital de Colombia. Capítulo de Geología Estructural. Bogotá: **1997**.

**ASOCIACIÓN COLOMBIANA INGENIERIA SÍSMICA AIS.** Estudio General del Riesgo Sísmico de Colombia. Bogotá: **1984**.

----- Estudio General del Amenaza Sísmica de Colombia. Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR – 98. Ley 400 de 1996 y Decreto 33 de 1998. Bogotá: **1996**.

**ARANGO, M. y A. VELÁSQUEZ.** Catálogo Histórico Sísmico para Medellín. Medellín: Alcaldía de Medellín – PNUD, Edit. Cadena, **1993**.

**ARANGO, J. D. y QUINTERO, B. E.** Dianóstico de los Procesos Erosivos Acelerados por el Sismo del 25 de enero de 1999 en Chinchina Caldas. En Boletín de la Red Sismológica del Eje Cafetero. Vol.8 Manizales: **2000** 46 – 53 p.

**BAKER, V. R.** Regional Landforms Analysis. NASA, Red mundial, 2001.  
[http://eosdata.gsfc.nasa.gov/DAAC\\_DOCS/geomorphology/GEO\\_1/GEO\\_CHAPTER\\_1.HTML](http://eosdata.gsfc.nasa.gov/DAAC_DOCS/geomorphology/GEO_1/GEO_CHAPTER_1.HTML).

**BARREDO, J.I.; BENAVIDES, A.; HERVÁS, J. and VAN WESTEN, C.J.** Comparing Heuristic Landslide Hazard Assessment Techniques Using GIS in the Tirajana Basin, Gran Canaria Island, Spain. Red mundial **2002**.  
[http://www.itc.nl/aqs/data/pdf/papers/Comparing%20 heuristic landslide.pdf](http://www.itc.nl/aqs/data/pdf/papers/Comparing%20heuristic%20landslide.pdf)

**BERTALANFFY, L. Von.** Teoría General de Sistemas. Fondo de Cultura Económica. México. **1968**.

**BLOOM, A. L.** Geomorphology: A Sistematic Analysis of Late Cenozoic Landforms. New Jersey: **1991**. 532 p.

**BOLT, B.** Terremotos. España: Editorial Reverté, S. A., Madrid: **1981**.

**BOMMER, J. y RODRIGUEZ, C.E.** Earthquake-induced Landslides in Central America: Engineering Geology, Vol 63, Amsterdarm: Elsevier Science B.V. **2002**. 189 - 200 p.

**BOSQUE, S. J.** Sistemas de Información Geográfica. Madrid: **1997**. 367, 371, 395, 396, 419 p.

**BUCELLI, F. y CORAL, C.** Breve reseña sobre el Riesgo Sísmico en las Principales Fallas del Territorio Colombiano. Revista CIAF volumen 11 N° 1-3, **1986**. 475 a 485 p.

**BUSTAMANTE, M.** Las Dunitas de Medellín y los Deslizamientos de Media Luna (1954), Santo Domingo (1974) y Villatina (1987). Medellín: AGID Report 13. **1990**. 25 -32 p.

**CAMACHO, E.; SCHMID, V.; MARROQUIN, G. and CRUZ, G.** Technical Mission to El Salvador, Following the January 13 Earthquake. Report for CEPREDENAC. San Salvador: **2001** 33 p.

**CAPRA, F.** La Trama de la Vida, una Nueva Perspectiva de los Sistemas Vivos. New York: **1996**. 359 p.

**CARDER. a.** Proyecto para la Mitigación del Riesgo Sísmico de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal, Informe Final. Pereira: **1999**.

----- **b.** Exploración Geotécnica, Investigación de Laboratorio y Zonificación Sísmica de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal. Bogotá: Universidad de los Andes, **1999**.

**CARDONA, C.** The January 25, 1999 Colombian Earthquake: Observations of Armenia and Pereira, Colombia. A Preliminary Report. Geohazards International. Red mundial, **2000**. [www.geohaz.org/member/news/pereira99.htm](http://www.geohaz.org/member/news/pereira99.htm).

**CARDONA, O. D.** Lessons in Seismic Engineering and Disaster Prevention. Special Report. The Earthquake of Armenia, Colombia, January 25, 1999. Geohazards International. Red mundial, **2000**. [www.geohaz.org/member/report/cardeng99.html](http://www.geohaz.org/member/report/cardeng99.html)

**CARDONA, O. D y CARREÑO, M. L.** Redes Neuronales y Teoría de los Conjuntos Difusos. Resumen en Boletín Técnico No 57. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá: **2002**.

**CARRILLO, E.A.; FORERO, C. A. y MORENO, M.** Zonificación Rápida de Susceptibilidad de Fenómenos de Remoción en Masa –Colombia- Usando SIG. En Boletín Colombiano de Geotécnica. No 8. Bogotá: **2000**.

**CASTAÑO, N. F.; VON CHRISTEN, H. y QUIROGA, R.** Zonificación Climática Preliminar del Área Jurisdiccional de la C.V.C. con Fines Agrícolas Forestales. Buga: Informe C.V.C. No. 86 – 6, **1980**.

**CASTELLANOS, R.** Lluvias Críticas en la Evaluación de Amenazas de Eventos de Remoción en Masa. Tesis de Magister en Geotécnia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil, **1996**.

**CEPAL.** El Terremoto de Enero de 1999 en Colombia: impacto socioeconómico del desastre en la zona del Eje Cafetero. Bogotá: **1999**.

**CERESIS Centro Regional de Sismología para América del Sur.** Catálogo de Terremotos para América del sur. Vol. 4 Colombia. Lima: **1985**. 267 p.

**CHAISSON, B.** Curso de Evolución del Paisaje EES201. Basado en **Wicander, R. and MONROE, J. S.** Historical Geology. NewYork: Universidad de Rochester, Red mundial, **2001**. [Http://www.earth.rochester.edu/ees201/history.html](http://www.earth.rochester.edu/ees201/history.html).

**CHOUBEY, V.D. and LITORIA, P. K.** Terrain Classification and Land Hazard Mapping in Kalsi – Chakrata area (Garhwal Himalaya), India. ITC Journal. **1990, 1991**.

**CHUVIECO, E.** Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid: **1996**. Cap.5.

**CMT.** Harvard Catalog. Red mundial, **2001** [www.seismology.harvard.edu/](http://www.seismology.harvard.edu/)

**CORPES DE OCCIDENTE Y OSSO.** Elementos para un Catalogo Macrosismico para el Occidente Colombiano. En Aproximación a las Amenazas Naturales, Vulnerabilidades y Estrategias para su Mitigación en el Occidente Colombiano. Cali: **1994**.

**CREPAD.** Inventario Nacional de Desastres Naturales. Armenia : **2000**.

**CRQ.** Evaluación de la Amenaza Geológica por Deslizamientos e Inundación en la Ciudad de Armenia. En Zonas de Alto Riesgo Geológico en la Ciudad de Armenia. Armenia: **1996**.

----- **a.** Informes de Control de Erosión. Subdirección de Recursos Naturales y Educación Ambiental. Armenia: **2000**.

----- **b.** Inventario de Procesos de Inestabilidad de Laderas en las Ciudades de Armenia y Calarcá. Armenia: **2000**.

----- Evaluación y Diagnóstico de Fenómenos de Remoción en Masa en el Departamento del Quindío. Informe Final Subdirección de Recursos Naturales. Convenio No. 023/200. Armenia: **2001**.

**C.V.C.** Resumen mensual multianual climático. Estación Bahía Málaga, período 1984 – 1995. Cali: **1995**.

----- Informe Técnico 07 del Archivo Recursos Hídricos, Hidrología. Precipitación Media en el Departamento del Valle del Cauca. Cali: **1997**.

----- **a.** Informe Técnico Creciente del Río Amaime el 24 de diciembre de 1999, Municipio de Palmira Valle. Cali: **2000**.

----- **b.** Informe Técnico Creciente del Río Cerrito el 24 de diciembre de 1999, Municipio de Cerrito Valle. Cali: **2000**.

----- **c.** Informe Técnico Creciente del Río Desbaratado el 14 de enero de 1999, Municipio de Florida Valle. Cali: **2000**.

----- **d.** Informe Técnico Creciente del Río Guabas el 24 de diciembre de 1999, Municipio de Ginebra Valle. Cali: **2000**.

**DANE.** Dimensión Social y Económica de los Efectos del Terremoto del Eje Cafetero. Diagnostico para la Reconstrucción. Bogotá: **1999**.

**DENSMORE, A. L. and HOVIUS, N.** Topographic Fingerprints of Bedrock Landslides. Rev. Geology; Vol. 28, No. 4, abril **2000**. 371 – 374 p.

**DESINVENTAR.** Base de datos sobre desastres en Colombia. **2001** Red Mundial, 2001. [www.desinventar.org](http://www.desinventar.org).

**DNPAD: Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres. a.** Evaluación Técnica de Infraestructura. Informe DNPAD N°16, **1999**.

**EISBACHER. G.E. y CLAGUE. J.J.,** Destructive Mass Movement in High Mountains - Hazard Management. Geological Survey of Canada Paper, 84-16, **1984** 230p.

**EERI a.** The Quindío, Colombia Earthquake of January 25, 1999. ERI Special Earthquake Report. Red mundial, **1999**. [www.eeri.org/Reconn/Colombia/Colombia99.html](http://www.eeri.org/Reconn/Colombia/Colombia99.html)

-----**b.** EERI AUTOGMT. Red mundial, **1999**.

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/~http/CMT/9901251819.gif>

**EL COLOMBIANO.** Periódico. Armenia: **Varias fechas**.

**EL ESPECTADOR.** Periódico. Bogotá: **Varias fechas**.

**EL PAIS.** Periódico. Cali: **Varias fechas**.

**EL TIEMPO.** Periódico. Cali: **Varias fechas**.

**EUROPEAN SEISMOLOGICAL COMMISSION - ESC.** European Macroseismic Scale 1998 EMS - 98. Luxemburgo: **1998**.

**ESPINAL, S.** Zonas de Vida o Formaciones Vegetales de Colombia. IGAC Bogotá: 1977, 238 p.

**ETTER, A.** Introducción a la Ecología del Paisaje, un Marco de Integración para los Levantamientos Rurales. Bogotá: **1990**. 83 p.

**FABBRI, A. G. and CHUNG, C. F.** Spatial Support in Landslide Hazard Prediction Based on Map Overlays. In Proceedings Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology. Cancun: **2001**. Red Mundial 2002. <http://www.kgs.ukans.edu/Conferences/IAMG/Sessions/K/fabbri.html>.

**FALCONI, R. A.** Factores que Influyeron en el Daño en el Sismo del Colombia de Enero de 1999. Ecuador: Escuela Politecnica del Ejercito, **2000**. Red Mundial 2001. [www.espe.edu.co/publicaciones/articulos/ingcivil/armenia/armenia.html](http://www.espe.edu.co/publicaciones/articulos/ingcivil/armenia/armenia.html)

**FENG, X. y GUO, A.** Earthquake Landslides in China. Proceedings of the IV International Conference and Field Workshop on Landslides. Tokyo: **1985**. 339-346 p.

**FELICÍSIMO, A.M.** La Utilización de los MDT en los Estudios del Medio Físico. Red Mundial, **1999**. <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>

**FLÓREZ, A.** Los Principios Fundamentales de la Evolución del Paisaje (Traducción. Original en Ingles). Cuadernos de Geografía, Vol. V, No. 1. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, **1994**. 68 – 79 p.

**FORERO, C.A.** Caracterización Geotécnica General del Subsuelo de Armenia, Colombia. En Boletín Colombiano de Geotécnica. No 8. Bogotá: Sociedad Colombiana de Geotécnica, **2000**.

**FRANCO, L.** Análisis de la Susceptibilidad a los Movimientos en Masa en el Departamento del Quindío. Tesis de Grado para optar al título de geólogo. Manizales: Universidad de Caldas, **1998**.

**GEOMORPHLIST.** Modelo de Evolución del paisaje Según William Morris Davis. Red mundial, **2001**. [Http://main.amu.edu.pl/~sgplgw/wmd/wmd.html](http://main.amu.edu.pl/~sgplgw/wmd/wmd.html)

**GOLDICH, S. S.** A Study of Rock-Weathering. Thesis Doctoral from University of Minnesota, Minneapolis, MN: **1936**. 97 p.

**GONZALEZ, A.J.; ZAMUDIO, E. y CASTELLANOS, R.** Relaciones de precipitación Crítica – Duración de Lluvias que Disparan Movimientos en Masa en Santafe de Bogotá. En Estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Inestabilidad del Terreno para Varias Localidades de Santafe de Bogotá. Bogotá: INGEOCIM, **1998**.

**GONZÁLEZ, R. C. y WOODS, R. E.** Tratamiento Digital de Imágenes. Massachusetts, E.U.A.: **1992**.

**GONZÁLEZ, A. y MILLÁN J.A.** Procedimiento para la Evaluación de la Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa en Santafe de Bogotá – Colombia. Bogotá: INGEOCIM, **1998**.

**GREEM, D.G.** Fractals and Scale. Australia 1993. En Red mundial **2001**. <http://complex.csu.edu.au/complex/tutorials/tutorial3.html>

**GUPTA, R.P. y JOSH, B.B.** Landslides Hazard Zoning Using the GIS Approach - A Case Study from the Ramaganga Catchmente, Himalayas. 1990. In Engineering Geology, 20 Amsterdam: Elsevier Publishers B.V., **1990**. 119 -121 p.

**GUZMAN, M.; MARÍN, M.A.; MORAN, M. y REYES M.** Estructuras Fractales y sus Aplicaciones. Barcelona: **1993**. 278 p.

**GUZMAN, J.; FRANCO, G. y OCHOA, M.** Evaluación Neotectónica Informe Final. Proyecto Para La Mitigación Del Riesgo Sísmico De Pereira Dosquebradas Y Santa Rosa De Cabal. Pereria: **1998** 136 p.

**HANSEN, A. y FRANKS, C.A.M.** Characterisation and Mapping of Earthquake Triggered Landslides for Seismic Zonation. En Proceedings Fourth International Conference on Seismic Zonation. Volumen 1. EERI Stanford: **1991**. 149 - 195 p.

**HARP, E.** Damaging landslides in Central America - Earthquake of January 13, 2001. Provisional Report Disclaimer. NATIONAL LANDSLIDE INFORMATION CENTER. **2001** En Red Mundial 2001, [http://landslides.usgs.gov/html files/centrala.html](http://landslides.usgs.gov/html_files/centrala.html)

**HARP, E.L. y JIBSON, R.W. a.** Seismic Instrumentation of Landslides: Building a Better Model Of Dynamic Landslides Behavior. Bulletin of Seismological Society of America., Vol. 85, **1995**. 93-33 p.

----- **b.** Inventory of landslides trigguered by the 1994 Northridge, California Earthquake. US Geol. Surv. Open-File Report. 95-213 **1995** 17 p.

**HARP, E. L. y WILSON, R. C.** Shaking Intensity Threshold for Rocks Falls and Slides: Evidence from 1987 Whittier Narrows and Superstition Hills Earthquake Strong-Motion Records., Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 85, No. 6., **1995**. 1739 – 1757 p.

**HERMELIN, M; CURVELO, C. A. y OSORIO, V. L.** Fenómenos Asociados al Aguacero del 27 de Junio de 1992 en la Cuenca del Río San Francisco. Pereira: Memorias II Conferencia Colombiana de Geología Ambiental. Vol. II., **1992**. 147 - 176 p.

**HERMELIN, M; VELASQUEZ, E. y MEJIA, O.** Algunas Reflexiones Acerca de la Catástrofe del 21 de Septiembre de 1999 en San Carlos Antioquía. Medellín: AGID Report 16. **1991**. 117 – 128 p.

**IDEAM.** Informe Ambiental Condiciones Hidroclimáticas y Ambientales en Colombia. Diciembre de **1999**.

----- Informe Ambiental Condiciones Hidroclimáticas y Ambientales en Colombia. Diciembre de **2000**.

**IGAC.** Atlas de Colombia. Bogotá: IGAC, **1992**.

----- Pérdidas en las masas de hielo en el Nevado del Ruiz, causadas por procesos climáticos y eruptivos durante los últimos 50 años. Análisis Geográficos No. 23. Bogotá, Canal Ramírez Antares, **1993**, 123 p. 3 mapas.

----- Suelos de Colombia. Bogotá: IGAC, **1995**.

----- **a.** Suelos Departamento del Quindío. Armenia: Corporación Autónoma Regional del Quindío, CRQ, **1996**.

----- **b.** Diccionario Geográfico de Colombia. Edición No. 3, **1996**. Tomos 1 al 4.

**INFOPLEASE DICTIONARY.** Learning Network. Tomado de la Red Mundial, enero 2002  
<http://www.infoplease.com>.

**INGEOMINAS.** Mapa Geológico Preliminar, Plancha 244 - Armenia. Escala 1:100.000. Bogotá: INGEOMINAS, **1982**.

----- Mapa Geológico Preliminar, Plancha 224 - Armenia. Escala 1:100.000. Bogotá: INGEOMINAS, **1983**.

----- **a.** Mapa Geológico Preliminar, Plancha 243 - Armenia. Escala 1:100.000. Bogotá: INGEOMINAS, **1984**.

----- **b.** Mapa Geológico Preliminar, Plancha 262 - Armenia. Escala 1:100.000. Bogotá: INGEOMINAS, **1984**.

----- El Sismo de Popayán del 31 de Marzo de 1983. Bogotá: INGEOMINAS, **1986**. 320 p.

----- **a.** Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Quindío. Escala 1:100.000. Bogotá: **1991**.

-----**b.** Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Quindío: Memoria Explicativa. Bogota : **1991**.

----- Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Valle del Cauca: Memoria Explicativa. Bogota: **1992**.

----- a. Boletín Trimestral de Sismos. Enero a Marzo de 1995. Vol 3 No 1. Bogota: INGEOMINAS, **1995**.

----- b. Boletín Trimestral de Sismos. Octubre a Diciembre de 1995. Vol 3 No 4. Bogota: INGEOMINAS, **1995**.

**INGEOMINAS y Corporación Nasa Kiwe.** Zonificación para Usos del Suelo en la Cuenca del Río Paéz. Popayán: **1995**.

----- a. (1999) Terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999) Informe Técnico Preliminar No. 2. Armenia Quindío. Bogota: **1999**.

----- b. Terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999). Informe Técnico Preliminar No. 3. Evaluación de daños en Calarcá, Pijao y Córdoba. Bogota: **1999**.

----- c. Informe Preliminar No.1. Bogota: **1999**.

----- d. Geología de la Zona del Eje Cafetero, Terremoto del Quindío (25 de enero de 1999) Informe Técnico - Científico. Escala: 1:200.000, Bogotá: **1999**.

----- a. Terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999) Informe Técnico Científico. Vol, 2: Zonificación Geotécnica Indicativa para la Reconstrucción de Armenia. Bogota: **2000**.

----- **b.** Informe Técnico de Evaluación Preliminar de la Afectación por Avenidas Torrenciales en el Corregimiento de La Virginia, Municipio de Calarcá, Quindío – Colombia. Bogotá: **2000**.

----- **c.** Aspectos Geodinámicos Regionales En Terremoto del Quindío (25 de enero de 1999) Informe Técnico Científico Vol, 1. Bogotá: **2000**.

**INTERNATIONAL INSTITUTE FOR AEROSPACE SURVEY AND EARTH SCIENCES**  
**ITC.** Rapid Inventory of Earthquake Damage (RIED) Assessment of the damage of the Quindío Earthquake in Armenia and Pereira, Colombia. **2000**.

**ISHIHARA, K. y YASUDA, S.** Microzonation for Liquefaction Potential During Earthquake in Japan. En Proceedings IV. Int. Conference on Seismic Zonation. Vol 1. EERI: Stanford: **1991** 703 - 724 p.

**JAMES, M.E.** Estudio Sismotectónico del área del viejo Caldas. Medellín: INGEOMINAS, **1986**. 1-113 p.

**JAPANESE SOCIETY OF SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING.**  
Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards. Cap. 4. **1993**. 47 - 70 p.

**JIBSON, R.W.** Predicting Earthquake-Induced Landslide Displacements Using Newmark's Sliding Block Analysis: Transportation Research Record 1411. **1993**. 9 – 17 p.

**JIBSON, R.W. y KEEFER, D.K.** Analysis of the Origin of Landslides in the New Madrid Seismic Zone, U. S. Geological Survey, **1994**. Professional Paper 1534-D.

**JIMENEZ, H.** Hidrología Básica I Cali: Universidad del Valle, Oficina de Publicaciones. **1986.** 160 p.

**KEEFER, D. K.** Landslides Caused by Earthquakes: Geological Society of America Bulletin, v.95, april **1984.** 406 – 421 p.

----- The Importance of Earthquake-Induced Landslides to Long-Term Slope Erosion and Slope-Failure Hazards in Seismically Active Regions, in Journal Geomorphology, **1994** 10: 265 – 284 p.

----- Earthquake-Induced Landslides and Their Effects on Alluvial Fans. In Journal of Sedimentary Research. Vol 69. No 1. Society for Sedimentary Geology SEPM. EEUU., **1999.** 84 – 104 p.

**KELLOG, J; DIXON, T. and NEILAN, R.** CASA Central and South America GPS Geodesy. In Transactions, American Geophysical Union. Vol, 70. No 24. Washington: **1989.** 649 - 656 p.

**KOJIMA, H. and CHUNG, C. F.** Testing the Time-Robustness of a Landslide Prediction Model. In Proceedings Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology. Cancun: **2001.** Red Mundial 2002.  
<http://www.kgs.ukans.edu/Conferences/IAMG/Sessions/K/kojima.html>.

**LARSEN, M. C., y SIMON, A.** The Frequency and Distribution of Recent Landslides in Three Montane Tropical Regions Of Puerto Rico, Journal Geomorphology 24, **1998.** 309 – 331 p.

**LEVIN, S. A.** The problem of Pattern and Scale in Ecology. Ecology Vol. 73, No. 6. Ecological Society of America, **1992**. 1943 – 1967 p.

**LI, T.** A Study on the Relationship between Earthquake and Landslides and the Prediction of Seismogenic Landslides Areas. Collected Works of Landslides, Beijing Railway Press, 2, **1979** 127-232 p.

----- Landslide Management in Mountain Areas in China. Occasional Paper 15. Internacional Centre for Integrated Mountain Development. Kathmandu. Nepal: **1990** 50 p.

**LI, T., y SCHUSTER, R.L.** Landslides Dams in South-Central China. In R.L. Schuster (ed), Landslides Dams: Processes, Risk and Mitigation. ASCE Special Geotechnical Pub.3: **1986** 146-163 p.

**LIAO, H. y LEE, CH.** Landslides Triggered by the Chi-Chi Earthquake. Taiwan: **2000** En Red Mundial 2001. [Http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts8/hami0007.shtml](http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts8/hami0007.shtml)

**LILLESAND, T. M. and KIEFER, R.W.** Remote Sensing and Image Interpretation. Canadá: **1994**. 579 – 585 p.

**LINSLEY, RAY K. JR.; KOHLER, M. A. and PAULUS. J. L.H.** Hidrología para Ingenieros. Bogotá: **1977**. 386 p.

**LOMBANA, E. J. y FORERO, C.A.** Zonificación Rápida de Susceptibilidad a Fenómenos de Remoción en Masa de Armenia – Colombia, usando SIG. En Boletín Colombiano de Geotécnia. No 8.. Bogotá: Sociedad Colombiana de Geotécnia, **2000**.

**MARIN, W.; COSSIO, U.; GARCIA, J. y PARIS, G.** Evaluación de las Causas de las Movimientos de Masa en la Vía Loboguerrero – Buenaventura a Finales de Noviembre de 1989. Medellín: AGID Report 13. **1990**. 399 – 408 p.

**MASSONNET, D. and FEIGL, K. L.** Radar Interferometry and its Application to Changes in the Earth's Surface. Reviews of Geophysics Vol. 36, No. 4. American Geophysical Union, **1998**. 441 – 500 p.

**MCCOURT, W.** The geology of the Central Cordillera in the departments of Valle del Cauca, Quindio and (N.W.) Tolima (sheets 243,, 261, 262, 280 y 300). Misión Británica (British Geological Survey), report No. 8. Cali: INGEOMINAS, **1984**.

**MEDINA, J.** Fenómenos Geodinámicos. Estudio y Medidas de Tratamiento. Tecnología Intermedia ITGD. Perú: **1991**, 87 p.

**MEYER, H.** Reports from Hansjürgen Meyer Regarding Macroseismic Studies and Geophysical Data for the Calima III Project. 1983. En Seismic Hazard Evaluation Calima III Project Colombia. WCC para Consorcio Integral-Planes y éstos para la C.V.C. San Francisco, CA. **1983**.

**MIDAS.** Significant Events. Red mundial, **1999** <http://midas.upr.clu.edu/>

**MILLAN, J.A. a.** Procedimiento para la Evaluación de la Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa en Santafé de Bogotá – Colombia. Bogotá: INGEOCIM, **1998**.

----- **b.** Lineamientos Metodológicos para la Evaluación de la Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa. Tesis de grado Ms. en Geotecnia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, **1998**.

**MILLAN, J.A. y VESGA, L. F.** Inventario de Procesos de Remoción en Masa en los Estudios de Amenaza y riesgo en Santafe de Bogotá – Colombia. Bogotá: INGEOCIM, **1998**.

**MINISTERIO DE AGRICULTURA.** El Terremoto de Bahía Solano del 26 de Septiembre de 1970. Bogotá: Informes Técnicos, **1971**.

**MONSALVE, H.** Geometría de la Subducción de la Placa Nazca en el Noroeste de Colombia: Implicaciones tectónicas y sísmicas. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, **1998**.

**MONSALVE, H.; CANO, L.; ESPINOSA, A.; RUBIANO, D.; PARIS, G. y GUZMAN, J.** Evaluación de la Amenaza Sísmica del Eje Cafetero. En Revista Universidad del Quindío Ciencias Aplicadas. Vol 2. No 6. Armenia: **2000**. 5 – 22 p.

**MORA, C. S. y MORA, R.** Los Deslizamientos Causados por el Terremoto de Limón: Factores de Control y Comparación con Otros Eventos en Costa Rica. Rev. Geol. Amér. Central, Vol. Esp. Terremoto de Limón, **1994**. 139 – 152 p.

**MORA, C. S. y VAHRSON, W. G.** Determinación a Priori de la Amenaza de Deslizamientos Utilizando Indicadores Morfodinámicos. Rev. Tecnología ICE, Vol.3, No.1, Octubre de **1993**. 32 – 42 p.

----- Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. Bulletin of the Association of Engineering Geologists Vol. XXXI, No. 1, **1994**. 49 – 58 p.

**MORA, H.** Resultados de G.P.S. en el Sector Colombiano. Seminario de Sismotectónica del Borde Llanero. INGEOMINAS. Santafé de Bogotá, **1995**. 52-66 p.

**MORIN. E.** Introducción al Pensamiento Complejo. París: 1990. 167 p.

**NASA.** SRTM, Shuttle Radar Topography Mission. Red mundial, **2001**.  
<http://www.jpl.nasa.gov/srtm/>

**NEIC.** Earthquake Search. Red mundial, **1999**. <http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>

**NIVIA, A.** Memoria explicativa de la geología de la Plancha 242-Zarzal. INGEOMINAS, **1997**.

**NOAA.** National Oceanic & Atmospheric Administration. Red mundial, **2001**.  
<http://www.noaa.gov/>, <http://pubs.usgs.gov/bulletin/b2187/table1.html>.

**OLIVIERA, M.F. y AGUIRRE, N.** Evaluación Ambiental de Amenazas Naturales en el Departamento de Cundinamarca. Bogotá: Programa Naciones Unidas para el Desarrollo y Gobernación de Cundinamarca, proyecto Col.88/009, Centro de Atención y Prevención de Desastres, **1991**. 106 p.

**OSSO Observatorio Sismológico del SurOccidente** Informe Preliminar sobre el Terremoto del 19 de noviembre en el departamento del Chocó. Cali: **1991**.

----- Resultados preliminares del Estudio de los Terremotos de Atrato Medio (Departamento del Choco – Antioquia) del 17 y 18 de octubre de 1992. Cali: Informe final para DNAPD y al Fondo Nacional de Calamidades, **1993**.

----- **a.** Análisis De Amenazas Naturales, Vulnerabilidad Y Riesgos Para Las Redes De Transporte Del Plan Para La Masificación De Gas. Cali: Osso Para Ecopetrol, Contrato Png. 94 – 099, Parte III, **1995**.

----- **b.** Apoyo a la Recuperación de la Zona Afectada por el Terremoto del Atrato Medio en 1992. Cali: PNUD. Proyecto Col. 95 / 009 / 10., **1995**.

----- **a.** Plan para la Mitigación de Riesgos en Cali. Cali: Red mundial, OSSO para Alcaldía, **1996** <http://osso.univalle.edu.co/docs/planii/cap04/text21.htm>

----- **c.** Estudio y Atlas Regional Amenazas, Vulnerabilidades y Riesgos en el Occidente Colombiano. Cali: OSSO para CORPES DE OCCIDENTE, **1995**.

----- **b.** Catalogo Macrosismico. Cali: Informe General 1987 – 1996, **1996**

----- **c.** Reporte de Visita a la Zona de Deslizamientos y Avenidas Torrenciales de El Danubio (Alto Anchicayá)". Cali: Publicación Ocasional, **1996**.

----- **a.** Evaluación de Riesgos Geológicos, Aptitud de Terrenos y Acompañamiento Técnico a los Campesinos para la Reconstrucción en la Provincia Campesina de Entreríos, Municipios Córdoba y Cálarca Zona del Terremoto del Quindío. Cali: Osso para Swissaid, Informe final, **1999**. 61p.

----- **b.** Asesoría al cuerpo suizo de socorro para intervenciones posterremoto en el departamento del Quindío, Colombia. Cali: Osso para cuerpo suizo de socorro, **1999**. 25p.

----- **c.** Sismo en Quindío, Enero 25 de 1999. Reporte Especial, Red mundial, **1999**.  
<http://tsunami.univalle.edu.co/sismo01251999/>

----- **d.** Informe Técnico Preliminar, Municipio de Caicedonia. Cali: Red mundial, **1999**  
<http://osso.univalle.edu.co/pages/sismo01251999/comision/caicedonia.htm>

**OSQ, Observatorio Sismológico del Quindío.** Resumen de la Sismicidad Registrada en el Quindío durante el Periodo Enero – Marzo 29 del 2001. Boletín Especial, Armenia: **2001.**

**PAPADOPULOS, G.A. y PLESSA, A.** Magnitude-distance Relations for Earthquake-induced Landslides in Greece: Engineering Geology. Vol. 58 Amsterdam: Elsevier Publishers B.V., **2000** 377-386 p.

**PARÍS, G. y ROMERO, J.** Fallas Activas de Colombia. Boletín Geológico Volumen 34, No 2-3. INGEOMINAS. **1994.** 1-53 p.

**PARÍS, G.** Fallas Potencialmente Sismogénicas que pueden Afectar las Obras del Complejo Vial y Cruces a Desnivel de La 2ª con Avenida Bolívar y de La Cejita con Avenida República del Líbano. Armenia: Empresa Geologico-Minera Gabriel París-Alcaldía de Armenia **1997,** 93 p.

**PARRA, E. y MEJÍA, I.** Efectos del Sismo del Quindío de Enero 25 de 1999 en el Sureste del Departamento del Tolima. Revista del RSREC, Vo 5, **2000.** 17 p.

**PCI V.5.3.** Using PCI Software. Ontario, Canadá, **1994.** Vol. I p. 210, Vol. II 262 – 264 p.

**PERAZZO, E.; CERVANTES, J.F. Y MORA, C. S.,** Análisis De La Estabilidad Del Deslizamiento De Piedras De Fuego. Método De Povedas: Les Perturbations. Costa Rica: Vi Seminario Nacional De Geotecnia, **1994.**

**PUJOL, S.; RAMIREZ, J. y SARRIA, A.** Coffee Zone, Colombia, January 25 Earthquake. Observations on the Behavior of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings. General Papers. Red mundial, **1999.** <http://www.eerc.berkeley.edu/lessons/colombia.pdf>

**QUI, J. y LIU, X.** A Summary of Damage of Extraordinary Collapse, Landslides and Debris Flows in Mountain Areas of Southwest China. En Bulletin of Soil and Water Conservation,. Vol 4. **1985.** 43 - 47 p.

**QUINTERO, H.J.** Diagnóstico y Estudios para la Recuperación Ambiental de la Microcuenca de la Quebrada La Montañita Capítulo 2.1 Componente Tierra. Informe Final. Convenio FOREC – ACODAL Armenia : **2000** 8 – 46 p.

**RAMIREZ, J. E. y GOBERNA, J.R.** Terremotos Colombianos Noviembre 23 y Diciembre 12 de 1979. Bogotá: Universidad Javeriana, Informe Preliminar Serie A, Sismología No 45, Instituto Geofísico de Los Andes Colombianos, **1980.**

**RAMÍREZ, J.E.** Historia de los Terremotos en Colombia. Bogotá: IGAC, Editorial Andes, **1975.** 250 p.

**RESTREPO, C. y VELÁSQUEZ, A.** Resiliencia de los Ecosistemas Tropicales de Montaña Frente al Cambio: Biodiversidad, Procesos y Deslizamientos de Tierra. Cali: OSSO para COLCIENCIAS, **1997.** Propuesta, 62 p.

**RODRIGUEZ, C.E.; BOMMER, J.J. and CHANDLER, R.J.** Earthquake-Induced Landslides: 1980 – 1997, Journal Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 18, **1999.** 325 – 346 p.

**ROGERS, J. W. and ADAMS, J.A.,** Fundamentals of Geology, Harper & Row. New York: **1996.** 273 p.

**ROMEO, R. and PRESTININZI, A.** Earthquake-induced Ground Failures in Italy in Engineering Geology 58 Amsterdam: Elsevier Publishers B.V.: **2000** 387-397 p.

**SALA, S. M. y BATALLA, R.** Teoría y Métodos en Geografía Física. Madrid, **1996**. Cap. 5: Geomorfología. 91-114 p.

**SAUTER, F.** Introducción a la Sismología. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Cartago, **1989**.

**SAWCHYN, D.J.** Advanced Geomorphology. Canadá: Universidad de Regina, Red mundial, **2001**. <http://www.uregina.ca/~souchyn/geog423>.

**SCHEIDEGGER, A.E.** The Fundamental Principles of Landscape Evolution. CATENA, **1987**, Suppl. 10: 199-210 p.

**SHAW, E.** Hydrology in practice, Van Nostrand Reinhold International. London: **1983**. En SALA Ma. S. y BATALLA R.J. Teoría y Métodos en Geografía Física. Madrid: **1996**. 198 – 199 p.

**SHUK, T.** La Evolución y el Estado Actual de la Metodología Basada en Taludes Naturales para Análisis de Estabilidad en Masas de Materiales Geológicos – Parte I. SVMSIF, Caracas: Octubre **1990**.

**SHUM, A.S.; MOSLEY, M.P. and WEAVER, W.E.** Experimental Fluvial Geomorphology. U.S: **1987**. 413 p.

**SIMONS, E.** Geología Física Básica. México D. F.: Editorial Limusa. S. A., **1990**. 699 p.

**SITAR, N. y KHAZAI, B.** Characteristics of Seismically Induced Landslides in Recent Earthquakes. Proceedings of the International Conference on Landslides: Causes, Impacts and Countermeasures. **2001**. 227 - 137 p.

**SMILES, S.B. and KEEFER, D.K.** Comparación of Seismic Slope-Performance Models – Case Study of the Oakland East Quadragle, California, U.S. Geological Survey : Open-File Report 99-137. **1999**.

**SOETERS, R. and VAN WESTEN, C. J.** Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation. In: Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board Special Report 247, **1996**.

**SUÁREZ, J.** Deslizamientos y Estabilidad de Laderas en Zonas Tropicales. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda., **1998**.

**THOMAS, F. M.** Geomorphology in the Tropics, a Study of Weathering and Denudation in Low Latitudes. U.K: **1994**. 460 p.

**THOURET, J. C.** La Cordillère Centrale des Andes de Colombie et ses bordures: morphogénèse plio-quadernaire et dynamique récente et actuelle d'une cordillère volcanique englacée. Grenoble: Université J. Fourier, Thèse de Doctorat d'Etat, 3 tomos, pp. 1040, **1988**. 1 - 327 p.

**TROJER, H.** Meteorología y Climatología de la Vertiente del Pacífico Colombiano. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Vol. X, Número 40, Noviembre **1958**.

**TROLL, C.** Landscape Ecology. 1st. Int. Seminar on Int. Surveys ITC – UNESCO, Delft. **1966**.

**VAN WESTEN, C.J.; SEIJMONSBERGEN, A.C. and MANTOVANI, F.** Comparing Landslide Hazard Maps. Red Mundial **2001**.  
[http://www.itc.nl/ags/data/pdf/papers/natural\\_hazards.pdf](http://www.itc.nl/ags/data/pdf/papers/natural_hazards.pdf).

**VAN WESTEN, C.J.; SOETERS, R. and SIJMONS, K.** Digital Geomorphological Landslide Hazard Mapping of the Alpage area, Italy. Red Mundial **2001**.  
[http://www.itc.nl/ags/data/pdf/papers/JAG\\_Alpage.pdf](http://www.itc.nl/ags/data/pdf/papers/JAG_Alpage.pdf)

**VAN WESTEN, C. J. and TERLIEN, M. T. J.** An Approach Towards Deterministic Landslides Hazard Analysis in GIS. A Case Study from Manizales (Colombia). Rev. Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 21, **1996**. 853 – 868 p.

**VARGAS, C.G.** Guía Técnica para la Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza por Movimientos de Masa. Cooperación Colombo - Alemana. Proyecto Río Guatiquía PRG. Villavicencio: **1999**. 197 p.

**VARGAS, G. y GOMEZ, J.** Estudio Geoambiental y Zonificación de Amenazas por Erosión y Remoción en Masa en la Cuenca del Río Teusaca, **1999**.

**VELASQUEZ, A.; MEYER, H.; MARIN, W.; RAMIREZ, F.; CAMPOS, A.; DREWS, A.D.; ARANGO, M.; HERMELIN, M.; BENDER, S.O. y SERJE, J.** Planificación Regional del Occidente Colombiano Bajo Consideración de las Restricciones por Amenazas. pp 141-185, Cap 6. En MASKREY, A. (editor). Navegando entre Brumas. Perú: La Red, **1998**.

**VERGARA, H. y MORENO, M.** Actividad neotectónica en el departamento del Quindío, con énfasis en la Falla de Armenia. Medellín: II Simposio de Sismotectónica del Noroccidente Colombiano, INGEOMINAS, **1996**, 10 p.

**VILLOTA, H.** Geomorfología Aplicada a Levantamientos Edafológicos y Zonificación Física de las Tierras. IGAC, Bogotá: **1991**.

**WILSON, R.C, and KEEFER, D.K.** Dynamic Analysis of a Slope Failure From the 6 August, 1979 Coyote Lake, California, earthquake. Seismological Society of American Bulletin, v. 73, **1983**.

----- Predicting Areal Limits of Earthquake-Induced Landsliding. In Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region – An Earth-Science Perspective, U.S. Geological Survey Professional Paper 1360, J. I. Ziony (Editor), **1985**. 316-345 p.

**WISLER, C.O y BRATER, E.F.** Hidrología. Cuba: Ediciones de Ciencia y Técnica, **1969**.

**WOOD, J.** Visualitation of Scale Dependencies in Surface Models.

Department of Geography, University of Leicester, UK. Copy of paper to be presented at the International Cartographic Association Annual Conference, Ottawa: **1999**. Tomado de la Red Mundial, 2001.

<http://www.geogle.le.ac.uk/jwo/research/conferences/ica99/index.html>

**WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO** - Guide to Hydrometeorological Practices, 2d ed. Geneva: Tech. Pap.82 no.168, 1970. pp.III-8-III-11. En RAY K. LINSLEY, JR, MAX A. KOHLER Y JOSEPH L:H. PAULUS. Hidrología para Ingenieros, 2d ed., Bogotá: **1977**. 58 – 59 p.

**WODWARD & CLYDE CONSULTANTS.** Geología Sísmica y Sismicidad del Noroccidente de Colombia. Medellín: Informe preparado para INTEGRAL Ltda **1983**. 116 p.

## **9. ANEXOS.**

### **ANEXO A. Productos Cartográficos.**