

GEOLOGÍA PARA PROFESIONALES DEL MEDIO AMBIENTE

JORGE ENRIQUE CHACON DÍAZ

EMILSE ROJAS MAYORGA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2006**

GEOLOGÍA PARA PROFESIONALES DEL MEDIO AMBIENTE

JORGE ENRIQUE CHACON DÍAZ

EMILSE ROJAS MAYORGA

MONOGRAFÍA

DIRECTOR: HECTOR HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2006**

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1 LA TIERRA | 3 |
| 1.1 ORIGEN DE LA TIERRA | 3 |
| 1.2 FORMA Y COMPOSICION DE LA TIERRA | 4 |
| 1.3 ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA | 4 |
| 1.4 CICLOS TERRESTRES | 5 |
| 1.4.1 CICLO DEL CARBONO..... | 5 |
| 1.4.2 CICLO HIDROLÓGICO..... | 5 |
| 1.4.3 CICLO DE LAS ROCAS | 7 |
| 1.5 INICIOS DE LA GEOLOGIA | 8 |
| 1.6 DERIVA CONTINENTAL, EXPANSION DEL PISO OCEANICO Y PLACAS TECTONICAS | 9 |
| 1.7 LÍMITES ENTRE PLACAS | 11 |
| 1.7.1 LÍMITES DIVERGENTES..... | 11 |
| 1.7.2 LÍMITES CONVERGENTES..... | 11 |
| 1.7.3 LÍMITES TRANSFORMANTES | 12 |
| 1.8 TECTÓNICA COLOMBIANA | 12 |
| 2 MINERALOGÍA | 14 |
| 2.1 GENESIS DE LOS MINERALES | 14 |
| 2.2 LOS MINERALES Y SUS ASOCIACIONES | 16 |
| 2.3 LAS ROCAS COMO AGREGADOS DE MINERALES | 16 |
| 2.3.1 ROCAS SEDIMENTARIAS Y SUS PROCESOS | 16 |
| 2.3.2 ROCAS METAMORFICAS Y SUS PROCESOS..... | 17 |
| 2.3.3 ROCAS IGNEAS Y SUS PROCESOS..... | 17 |
| 2.4 CLASIFICACION DE LOS MINERALES | 18 |
| 2.4.1 LOS SILICATOS | 18 |
| 2.4.2 LOS ELEMENTOS NATIVOS | 18 |
| 2.4.3 LOS SULFUROS | 19 |
| 2.4.4 LOS HALUROS..... | 19 |
| 2.4.5 LOS ÓXIDOS | 19 |
| 2.4.6 LOS HIDRÓXIDOS..... | 20 |
| 2.4.7 LOS CARBONATOS..... | 20 |
| 2.4.8 LOS SULFATOS..... | 20 |
| 2.5 PROPIEDADES FISICAS DE LOS MINERALES | 20 |
| 2.5.1 FORMA DEL CRISTAL Y HÁBITO..... | 21 |
| 2.5.2 BRILLO Y TRANSPARENCIA | 21 |
| 2.5.3 COLOR Y RAYA | 21 |
| 2.5.4 CLIVAJE Y FRACTURA | 22 |
| 2.5.5 TENACIDAD | 23 |
| 2.5.6 LA DUREZA | 23 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 2.5.7 | OTRAS PROPIEDADES..... | 23 |
| 3. | ROCAS ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS | 24 |
| 3.1. | ROCAS IGNEAS | 24 |
| 3.1.1 | CLASIFICACION DE LAS ROCAS IGNEAS INTRUSIVAS | 24 |
| 3.1.2. | CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS ÍGNEAS EXTRUSIVAS O EFUSIVAS | 27 |
| 3.2 | ROCAS METAMORFICAS | 29 |
| 3.3 | TIPOS DE METAMORFISMO | 29 |
| 3.4 | CLASIFICACION DE LAS ROCAS METAMORFICAS | 30 |
| 4. | LA METEORIZACION | 33 |
| 4.1. | CLASES DE METEORIZACION | 33 |
| 4.1.1 | METEORIZACIÓN MECÁNICA O FÍSICA | 33 |
| 4.1.2 | METEORIZACIÓN QUÍMICA | 34 |
| 4.2 | FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA METEORIZACIÓN | 35 |
| 4.3. | PRODUCTOS DE LA METEORIZACIÓN | 36 |
| 4.4 | LA METEORIZACIÓN Y LAS OBRAS CIVILES | 37 |
| 4.5 | PERFILES DE METEORIZACION | 37 |
| 4.5.1 | PERFILES TÍPICOS DE METEORIZACIÓN PARA ROCAS METAMÓRFICAS E ÍGNEAS INTRUSIVAS | 38 |
| 5. | ROCAS SEDIMENTARIAS..... | 40 |
| 5.1 | ORIGEN | 40 |
| 5.1.1 | LITIFICACIÓN | 40 |
| 5.2 | TEXTURA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS | 41 |
| 5.3 | COMPOSICIÓN DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS..... | 42 |
| 5.4 | CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS | 42 |
| 5.4.1 | CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS DE CARBONATO | 43 |
| 5.4.2 | CLASIFICACIÓN Y NOMBRES DE LAS ROCAS AUTÍGENAS..... | 43 |
| 5.4.3 | CLASIFICACIÓN Y NOMBRES DE LAS ROCAS CARBONOSAS | 44 |
| 5.4.4 | CLASIFICACIÓN Y NOMBRES DE LAS ROCAS TERRÍGENAS..... | 44 |
| 5.5 | CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS | 46 |
| 6. | GEOLOGIA ESTRUCTURAL | 48 |
| 6.1 | RESPUESTA DE LAS ROCAS A LOS ESFUERZOS | 48 |
| 6.2 | PLIEGUES | 49 |
| 6.3 | FALLAS | 50 |
| 6.3.1 | CLASIFICACIÓN DE FALLAS | 50 |
| 6.3.2 | HORTS Y GRABENS | 51 |
| 6.3.4 | CRITERIOS PARA UBICAR FALLAS EN CAMPO | 52 |
| 6.4 | DIACLASAS | 52 |
| 6.4.1 | DIACLASAS TECTÓNICAS | 52 |
| 6.4.2 | DIACLASAS NO TECTÓNICAS | 53 |
| 6.5 | SIMBOLOS DE LAS ESTRUCTURAS EN LOS MAPAS GEOLOGICOS | 54 |
| 7. | SUELOS..... | 55 |

| | | |
|-------------|---|----|
| 7.1 | PERFIL DE SUELO | 55 |
| 7.2 | FACTORES EN LA FORMACION DEL SUELO | 56 |
| 7.3 | PROCESOS FORMADORES DE SUELOS | 57 |
| 7.4. | LOS COMPONENTES FUNDAMENTALES DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON EL MATERIAL PARENTAL | 58 |
| 7.5 | CARACTERISTICAS FÍSICAS DEL SUELO | 60 |
| 7.5.1 | TEXTURA | 60 |
| 7.5.2 | COLOR | 61 |
| 7.5.3 | CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA | 62 |
| 7.5.4 | ESTRUCTURA | 62 |
| 7.5.5 | RETENCIÓN DE HUMEDAD | 63 |
| 7.5.6 | PROFUNDIDAD EFECTIVA | 63 |
| 7.6 | CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS | 63 |
| 7.6.1 | CLASIFICACION GEOLOGICA | 64 |
| 7.6.2 | CLASIFICACIÓN PEDOGÉNICA DE LOS SUELOS | 65 |
| 7.6.3 | CLASIFICACIÓN AGROLÓGICA | 65 |
| 7.6.4 | CLASIFICACIÓN DEL SUELO DE ACUERDO AL USO | 66 |
| 7.6.5 | CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS PARA INGENIEROS | 67 |
| 7.7 | PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS | 67 |
| 7.7.1 | DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS PARA SUELOS NO COHESIVOS | 68 |
| 7.7.2 | DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS PARA SUELOS COHESIVOS | 69 |
| 7.8 | RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO | 70 |
| 7.9 | ASENTAMIENTO Y CONSOLIDACIÓN DEL SUELO | 70 |
| 7.10 | MINERALES ARCILLOSOS | 70 |
| 7.11 | AMENAZAS DE LOS SUELOS | 71 |
| 7.11.1 | EXPANSIÓN DE LOS SUELOS O SUELOS EXPANSIVOS..... | 71 |
| 7.11.2 | HIDROCOMPACTACIÓN | 72 |
| 7.11.3 | LICUACIÓN | 72 |
| 7.11.4 | SUBSIDENCIA DE SUELOS | 73 |
| 7.12 | USO DEL SUELO EN ESTUDIOS AMBIENTALES | 73 |
| 8. | EROSION | 74 |
| 8.1 | EROSIÓN NATURAL | 74 |
| 8.2 | EROSIÓN ACELERADA | 75 |
| 8.3 | EROSION POR AGUA | 75 |
| 8.3.1 | VARIABLES DE LA EROSIÓN POR AGUA | 76 |
| 8.3.2 | EROSIÓN POR RÍOS | 76 |
| 8.3.3 | EROSIÓN POR LAGOS | 76 |
| 8.3.4 | EROSIÓN SUBTERRÁNEA | 77 |
| 8.4 | EROSION EOLICA | 77 |
| 8.4.1 | PROPIEDADES DEL SUELO Y LA EROSIÓN EÓLICA | 77 |
| 8.5 | CONTROL DE LA EROSIÓN | 79 |
| 9. | AMENAZAS GEOLÓGICAS | 81 |
| 9.1 | LOS TERREMOTOS | 81 |

| | | |
|---------------|---|------------|
| 9.1.1 | TEORIA DEL REBOTE ELASTICO | 81 |
| 9.1.2 | DETECCION Y REGISTRO DE TERREMOTOS | 82 |
| 9.1.3 | MAGNITUD E INTENSIDAD | 82 |
| 9.1.4 | CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS SISMICAS | 82 |
| 9.1.5 | RELACIONES TIEMPO – DISTANCIA | 83 |
| 9.1.6 | RIESGOS DE LOS TERREMOTOS | 84 |
| 9.1.7 | RIESGO SISMICO Y PLANEAMIENTO DEL USO DEL SUELO | 85 |
| 9.1.8 | LOCALIZACION DE FUENTES DE TERREMOTOS | 85 |
| 9.1.9 | MOVIMIENTO DEL SUELO | 86 |
| 9.1.10 | RELACION ENTRE TERREMOTOS Y SUELOS | 87 |
| 9.1.11 | PREDICCIÓN DE TERREMOTOS | 89 |
| 9.1.12 | EFFECTOS SECUNDARIOS DE LOS TERREMOTOS | 89 |
| 9.1.13 | LOS TERREMOTOS Y LA SOCIEDAD | 90 |
| 9.2 | LOS FENOMENOS DE REMOCION EN MASA (FRM) | 93 |
| 9.2.1 | FACTORES QUE FAVORECEN LOS FENOMENOS DE REMOCION EN MASA (FRM) | 93 |
| 9.2.2 | CLASIFICACION DE LOS FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA | 93 |
| 9.2.2.1 | REPTACIÓN | 95 |
| 9.2.2.2 | FLUJOS | 95 |
| 9.2.2.3 | DESGLIZAMIENTOS | 98 |
| 9.2.3 | IMPACTOS AMBIENTALES DE LOS FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA | 100 |
| 9.2.3.1 | EFFECTOS SOBRE LA TOPOGRAFÍA Y LA MORFOLOGÍA | 101 |
| 9.2.3.2 | EFFECTOS SOBRE LOS LECHOS DE LOS RÍOS | 101 |
| 9.2.3.3 | EFFECTOS DE LAS REPRESAS POR FRM SOBRE LOS LECHOS Y LOS VALLES | 101 |
| 9.2.3.4 | IMPACTOS DE LOS FRM SOBRE LA COBERTURA VEGETAL | 102 |
| 9.2.3.5 | IMPACTOS DE LOS FRM SOBRE LA FAUNA SALVAJE | 102 |
| 8.2.6 | EJEMPLOS DE FRM EN COLOMBIA | 102 |
| 9.2.7 | LOS FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA Y EL CLIMA EN COLOMBIA | 104 |
| 9.3 | VOLCANES | 106 |
| 9.3.1 | CLASIFICACIÓN DE LOS VOLCANES | 106 |
| 9.3.1.1 | CLASIFICACIÓN POR ACTIVIDAD | 106 |
| 9.3.1.2 | CLASIFICACIÓN POR LA FORMA DEL VOLCÁN | 106 |
| 9.3.1.3 | CLASIFICACIÓN POR EL TIPO DE ERUPCIÓN | 107 |
| 9.3.2 | PRODUCTOS VOLCÁNICOS Y SUS AMENAZAS | 109 |
| 9.3.3 | PREDICCIÓN DE ERUPCIONES VOLCÁNICAS | 110 |
| 10. | GEOMORFOLOGIA | 112 |
| 10.1 | PROCESOS QUE INTERVIENEN EN LAS FORMAS DEL RELIEVE | 112 |
| 10.1.1 | PROCESOS ENDOGENOS | 112 |
| 10.1.2 | PROCESOS EXOGENOS | 113 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| 10.2 | GEOFORMAS PRIMARIAS | 113 |
| 10.3 | GEOFORMAS ORIGINADAS POR EROSIÓN FLUVIAL O ALUVIAL | 113 |
| 10.3.1 | PATRONES DE DRENAJE | 114 |
| 10.4 | GEOFORMAS PRODUCTO DE PROCESOS DE SEDIMENTACION | 115 |
| 10.4.1 | VALLE ALUVIAL (Llanura aluvial) | 116 |
| 10.4.2 | LLANURA ALUVIAL DE PIEDEMORTE | 117 |
| 10.4.3 | LLANURA ALUVIAL DE RÍO TRENZADO | 117 |
| 10.4.4 | SISTEMAS DE RÍOS MEÁNDRICOS | 118 |
| 10.5 | GEOFORMAS DE ORIGEN MARINO | 121 |
| 10.5.1 | GEOFORMAS POR TRANSGRESIONES Y REGRESIONES MARINAS | 121 |
| 10.5.2 | GEOFORMAS POR EROSION Y SEDIMENTACION MARINA | 122 |
| 10.6 | GEOFORMAS DE SEDIMENTACIÓN EOLICA | 125 |
| 10.6.1 | LAS DUNAS | 125 |
| 11. | AGUA SUBTERRÁNEA | 128 |
| 11.1 | HIDROGEOLOGÍA DE LOS ACUÍFEROS | 128 |
| 11.1.1 | POROSIDAD Y PERMEABILIDAD | 128 |
| 11.1.2 | FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA | 129 |
| 11.2 | NIVEL FREÁTICO | 131 |
| 11.3 | SISTEMAS DE FLUJOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA | 131 |
| 11.4 | FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA | 133 |
| 11.4.1 | UBICACIÓN GEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS | 134 |
| 11.5 | EL AGUA SUBTERRÁNEA Y LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES | 135 |
| 11.6 | EL AGUA SUBTERRÁNEA Y LAS CONSTRUCCIONES | 135 |
| 11.7 | CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA | 136 |
| 11.8 | CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS SEGÚN SU COMPOSICIÓN QUÍMICA (Noisette) | 137 |
| 11.9 | CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA | 138 |
| 11.9.1 | FUENTES DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA | 139 |
| 11.9.2 | CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE ACUERDO A SU UBICACIÓN | 143 |
| 11.10 | CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO | 144 |
| 11.10.1 | CONTAMINACIÓN POR ACTIVIDADES AGRARIAS | 144 |
| 11.10.2 | CONTAMINACIÓN POR ACTIVIDADES URBANAS | 147 |
| 11.10.3 | CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS POR ACTIVIDADES URBANAS | 148 |
| 12. | EVOLUCIÓN Y MEDIO AMBIENTE | 150 |
| 12.1 | LA ESCALA GEOLOGICA | 150 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 12.2 | ORIGEN DE LA VIDA | 151 |
| 12.3 | EVOLUCION DE LAS PRIMERAS FORMAS DE VIDA | 151 |
| 12.4 | MEDIO AMBIENTE Y LAS FORMAS DE VIDA | 152 |
| 12.5 | ERAS Y PERIODOS DE LA TIERRA | 153 |
| 12.5.1 | ERA PRECÁMBRICA | 154 |
| 12.5.2 | ERA PALEOZOICA | 155 |
| 12.5.3 | ERA MESOZOICA | 156 |
| 12.5.4 | ERA CENOZOICA | 157 |
| 12.5 | MOVIMIENTO DE LOS CONTINENTES Y LA EVOLUCIÓN | 158 |
| 13. | RECURSOS ENERGETICOS Y MEDIO AMBIENTE | 160 |
| 13.1 | PETROLEO Y GAS | 160 |
| 13.2 | EL CARBON | 162 |
| 13.3 | ENERGIA NUCLEAR | 165 |
| 13.4 | ENERGIA HIDROELECTRICA | 165 |
| 13.5 | ENERGIA GEOTERMICA | 166 |
| 13.6 | ENERGIA EOLICA | 167 |
| 13.7 | ENERGIA SOLAR | 167 |
| 13.8 | ENERGIA DE LA BIOMASA | 168 |
| 13.9 | ENERGIA DE LOS OCEANOS | 170 |

ANEXOS

ANEXO 1. MAPA DE FALLAS DE COLOMBIA

ANEXO 2. ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA EN COLOMBIA

INDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| FIGURA 1. Muestra de oro de filón, encontrada en Vetas, Santander. | 19 |
| FIGURA 2A. Cristales de cuarzo. | 21 |
| FIGURA 2B. Cristal de Pirita. | 21 |
| FIGURA 3. Cristal de Calcita con sus planos de clivaje. | 22 |
| FIGURA 4. Roca ígnea fanerítica intrusiva llamada Granito. | 26 |
| FIGURA 5. Roca ígnea afanítica extrusiva llamada Basalto. | 26 |
| FIGURA 6. Roca ígnea porfírica intrusiva llamada Diabasa. | 26 |
| FIGURA 7. Toba. | 29 |
| FIGURA 8. Contacto entre rocas ígneas y rocas metamórficas. | 30 |
| FIGURA 9. Esquisto. | 31 |
| FIGURA 10. Gneiss. | 31 |
| FIGURA 11. Cuarzita. | 32 |
| FIGURA 12. Mármol. | 32 |
| FIGURA 13. Exfoliación producida por pérdida del material suprayacente. | 34 |
| FIGURA 14. Expansión de las fracturas de las rocas por acción de las raíces. | 34 |
| FIGURA 15. Arenisca. | 45 |
| FIGURA 16. Conglomerado. | 46 |
| FIGURA 17. Planos de estratificación. | 46 |
| FIGURA 18. Amonita. | 47 |
| FIGURA 19. Anticlinal ubicado en el municipio de Sáchica, Boyacá. | 50 |
| FIGURA 20. Anticlinal truncado. | 52 |
| FIGURA 21. Diaclasas en el batolito de Pescadero. | 53 |
| FIGURA 22. Horizonte A y parte del horizonte B de un suelo. | 56 |
| FIGURA 23. Coluvión. | 65 |
| FIGURA 24. Efecto de la licuación de los suelos sobre las construcciones. | 71 |
| FIGURA 25. Proceso erosivo en surcos y cárcavas. | 75 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 26. Proceso de erosión avanzado. | 75 |
| FIGURA 27. Colector de aguas lluvias. | 80 |
| FIGURA 28. Solifluxión Plástica (patas de vaca). | 96 |
| FIGURA 29. Flujo en estado líquido conocido como Golpe de cuchara. | 96 |
| FIGURA 30. Avalancha de lodo debido al represamiento de la quebrada. | 97 |
| FIGURA 31. Deslizamiento planar ocasionado por la ampliación de la vía Cimitarra – Landázuri Santander. | 99 |
| FIGURA 32. Deslizamiento retrogresivo. | 99 |
| FIGURA 33. Abanico Aluvial. | 117 |
| FIGURA 34. Tronco del río Chicamocha que corresponde a la llanura aluvial de río trenzado. | 118 |
| FIGURA 35. Destrucción de un tramo de la autopista Maracay – Caracas en Venezuela debido a la acción de agua subterránea. | 136 |
| FIGURA 36. Vivienda agrietada y desestabilizada por movimiento del suelo. .. | 161 |
| FIGURA 37. Pérdida de cobertura vegetal por traslado de material de la mina a los molinos. | 163 |
| FIGURA 38. Patio de acopio de una mina de carbón. | 163 |
| FIGURA 39. Drenaje de minas. | 164 |
| FIGURA 40. Planta nuclear. | 165 |
| FIGURA 41. Represa. | 166 |
| FIGURA 42. Energía Eólica. | 167 |
| FIGURA 43. Panel solar. | 168 |
| FIGURA 44. Biodigestores. | 169 |

INDICE DE GRAFICAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| GRAFICA 1. Movimiento de la tierra alrededor del sol. | 3 |
| GRAFICA 2. Estructura Interna de la Tierra. | 5 |
| GRAFICA 3. Ciclo del carbono. | 6 |
| GRAFICA 4. El ciclo del agua. | 6 |
| GRAFICA 5. Balance Total de agua en la tierra. | 7 |
| GRAFICA 6. Ciclo de las rocas. | 7 |
| GRAFICA 7. Principios de Steno. | 9 |
| GRAFICA 8. Placas Tectónicas. | 10 |
| GRAFICA 9. Límite convergente y divergente. | 11 |
| GRAFICA 10. Dirección y convergencia entre las tres placas que interactúan en los Andes del Norte. | 13 |
| GRAFICA 11. Series de Bowen. | 14 |
| GRAFICA 12. Escala de dureza. | 23 |
| GRAFICA 13. Algunas formas de cuerpos ígneos o plutones. | 25 |
| GRAFICA 14. Metamorfismo regional generado por colisión entre placas. | 30 |
| GRAFICA 15. Influencia del clima sobre los procesos de meteorización. | 36 |
| GRAFICA 16. Productos de la meteorización. | 36 |
| GRÁFICA 17. Perfil de meteorización para rocas ígneas y metamórficas..... | 39 |
| GRAFICA 18. Sinclinal y Anticlinal. | 49 |
| GRAFICA 19. Falla Normal. | 50 |
| GRAFICA 20. Falla Inversa. | 50 |
| GRAFICA 21. Falla de Cabalgamiento. | 51 |
| GRAFICA 22. Falla de Rumbo o Transcurrente. | 51 |
| GRAFICA 23. Factores que intervienen en la formación del suelo. | 57 |
| GRAFICA 24. Clasificación del suelo de acuerdo a su textura. | 61 |
| GRAFICA 25. Límites de Atterberg. | 69 |
| GRAFICA 26. Atracción de cationes y moléculas de agua hacia la superficie | |

| | |
|--|-----|
| de arcilla. | 70 |
| GRAFICA 27. Clases de arreglo de las partículas de arcilla en el suelo. | 71 |
| GRAFICA 28. Estructura del suelo insaturado sostenida por el agua de los poros y ligaduras de arcilla. | 72 |
| GRAFICA 29. Transporte de partículas por el viento. | 78 |
| GRAFICA 30. Nido sísmico asociado a la falla de San Andrés. | 81 |
| GRAFICA 31. Movimiento de las ondas P. | 83 |
| GRAFICA 32. Movimiento de las ondas S. | 83 |
| GRAFICA 33. Relación Tiempo – Distancia entre las ondas S y P. | 84 |
| GRAFICA 34. Mapa geológico del área de San Francisco (EE.UU). | 86 |
| GRAFICA 35. Mapa de intensidad relativa del terremoto ocurrido en San Francisco (EE.UU) en 1906. | 87 |
| GRAFICA 36. Actividades antrópicas y su influencia en los FRM. | 94 |
| GRAFICA 37. Reptación. | 95 |
| GRAFICA 38. Avalancha de lodo o Lahar. | 97 |
| GRAFICA 39. Deslizamientos rotacionales. | 98 |
| GRAFICA 40. Distribución por departamentos de los FRM ocurridos en Colombia durante los fenómenos de El Niño y La Niña del Pacífico. | 105 |
| GRAFICA 41. Clasificación de los volcanes por la forma. | 107 |
| GRAFICA 42. Clasificación de volcanes de acuerdo al tipo de erupción. | 108 |
| GRAFICA 43. Volcán y sus productos. | 109 |
| GRAFICA 44. Geoformas originadas por procesos endógenos. | 113 |
| GRAFICA 45. Proceso de formación y abandono de meandros. | 120 |
| GRAFICA 46. Llanura aluvial de desborde. | 121 |
| GRAFICA 47. Deltas del río Mississipi y el río Nilo. | 123 |
| GRAFICA 48. Albufera. | 124 |
| GRAFICA 49. Marisma y cordón lateral. | 125 |
| GRAFICA 50. Dunas transversales. | 126 |
| GRAFICA 51. Duna tipo barján o barchán. | 126 |

| | |
|---|-----|
| GRAFICA 52. Duna Parabólica. | 126 |
| GRAFICA 53. Tipos de porosidad en las rocas. | 129 |
| GRAFICA 54. Piezómetros. | 130 |
| GRAFICA 55. Zonas del agua en la subsuperficie. | 131 |
| GRAFICA 56. Interacción entre el agua atmosférica y el agua subterránea. ... | 132 |
| GRAFICA 57. Manantiales y su marco geológico. | 133 |
| GRAFICA 58. Acuífero confinado y pozo artesiano. | 134 |
| GRAFICA 59. Valle trenzado y valle meándrico. | 134 |
| GRAFICA 60. Valle tectónico (graben). | 135 |
| GRAFICA 61. Mayores fuentes de contaminación en la superficie. | 139 |
| GRAFICA 62. Eras y periodos de la tierra. | 154 |
| GRAFICA 63. El supercontinente Pangea. | 156 |
| GRÁFICA 64. Intercambio de especies entre Norteamérica y Suramérica debido a la aparición del istmo de Panamá. | 159 |
| GRÁFICA 65. Contaminación generada por extracción y uso del carbón. | 162 |

INDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| TABLA 1. Clasificación de las rocas ígneas de acuerdo a su contenido mineralógico. | 28 |
| TABLA 2. Clasificación de las rocas metamórficas. | 31 |
| TABLA 3. Clasificación de partículas de acuerdo al tamaño. | 45 |
| TABLA 4. Símbolos estructurales en mapas geológicos. | 54 |
| TABLA 5. Descripción general de los horizontes. | 56 |
| TABLA 6. Procesos formadores de suelo. | 58 |
| TABLA 7. Clasificación del suelo de acuerdo a la profundidad efectiva. | 63 |
| TABLA 8. Clasificación pedogénica de los suelos. | 66 |
| TABLA 9. Clasificación de los suelos para ingenieros. | 68 |
| TABLA 10. Variables que intervienen en la erosión por agua. | 76 |
| TABLA 11. Relación entre la velocidad del viento y el tamaño de las partículas que pueden ser levantadas. | 78 |
| TABLA 12. Tipo de construcciones y susceptibilidad al daño por terremotos... | 88 |
| TABLA 13. Características de los fenómenos de remoción en masa producidos por terremotos. | 91 |
| TABLA 14. Clasificación de los Fenómenos de Remoción en Masa FRM. | 94 |
| TABLA 15. Rangos de valores de propiedades hidrológicas para depósitos y rocas. | 130 |
| TABLA 16. Clasificación del agua subterránea basada en TDS. | 136 |
| TABLA 17. Clasificación de constituyentes inorgánicos disueltos en el agua subterránea. | 137 |
| TABLA 18. Acción de las variables en la contaminación de las aguas subterráneas a través del suelo. | 139 |
| TABLA 19. Valores de los factores CRIPTAS | 146 |

TITULO: GEOLOGIA PARA PROFESIONALES DEL MEDIO AMBIENTE*

**AUTORES: Emilse Rojas Mayorga
Jorge Enrique Chacón Díaz****

PALABRAS CLAVES: Tierra, Suelos, Erosión, Acuíferos.

RESUMEN

La estructura interna de la tierra está conformada por el núcleo, el manto y la corteza, subdivididas en otras capas diferentes entre sí física y químicamente. La corteza terrestre se compone de corteza continental y oceánica, dividida en placas que se mueven lenta y continuamente en diferentes direcciones. Estos movimientos han modificado la fisiografía terrestre durante la historia de la tierra, dando lugar a cambios climáticos, procesos evolutivos en la flora - fauna y formación de diferentes estructuras como pliegues, fallas y diaclasas. Los pliegues son importantes para el medio ambiente, se interponen a las corrientes de aire cambiando el clima y generan pisos térmicos. Las fallas y las diaclasas, importantes en diseños mineros y viales, contribuyen a la rápida meteorización de las rocas generando suelos en los continentes.

La clasificación de los suelos de acuerdo al origen, composición química, características físicas y uso, permite una utilización más racional de este recurso y un desarrollo sostenible de las actividades agropecuarias. Uno de los grandes problemas de los suelos es la erosión, un proceso natural que se ve acelerado por las actividades humanas, afectando a las rocas y a todo aquello que pueda ser desgastado como construcciones y obras civiles.

Los Fenómenos de Remoción en Masa, los terremotos y los volcanes constituyen las tres más importantes amenazas geológicas. Sus efectos a menudo catastróficos contribuyen a modelar la superficie terrestre, generando geoformas cuya identificación es básica para mapas de riesgos y ubicación de acuíferos.

En la construcción de obras civiles, la explotación de aguas subterráneas y de recursos energéticos, la geología juega un papel determinante en la determinación de costos, políticas y magnitud del impacto ambiental lo que la hace una ciencia de gran importancia.

* Proyecto de grado

** Facultad de ciencias fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental

TITLE: GEOLOGY FOR PROFESSIONALS OF THE ENVIRONMENT*

**AUTHORS: Emilse Rojas Mayorga
Jorge Enrique Chacón Díaz****

KEY WORDS: Earth, Soils, erosion, Groundwater

SUMMARY

The internal structure of the earth is conformed by the core, the mantle and the crust, subdivided to each other in other different layers physical and chemically. The terrestrial crust is composed of continental and oceanic crust, divided in plates that move slow and continually in different addresses. These movements have modified the terrestrial shape during the history of the earth, giving place to climatic changes, evolutionary processes in the flora - fauna and formation of different structures like folds, faults and joins. The folds are important for the environment, they intervene to the currents of air changing the climate and they generate thermal floors. The faults and the joins, important in mining designs and ways, they contribute to the quick weathering of the rocks generating soils in the continents.

The classification of the soils according to the origin, chemical composition, physical characteristics and use, it allows a more rational use of this resource and a sustainable development of the agricultural activities. One of the big problems of the soils is the erosion, a natural process that is accelerated by the human activities, affecting to the rocks and everything that can be worn away as constructions and civil works.

The landslides, the earthquakes and the volcanoes constitute the three more important geologic threats. Their effects often catastrophic they contribute to model the terrestrial surface, generating geofomas whose identification is basic for maps of risks and location of aquifer.

In the construction of civil works, the exploitation of groundwater and of energy resources, the geology plays a decisive role in the determination of costs, political and magnitude of the environmental impact what makes it a science of great importance.

* Proyecto de grado

** Facultad de ciencias fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental

INTRODUCCION

La geología ambiental comienza a presentarse como una disciplina independiente en los años sesenta, en ella se incluyen recursos, riesgos, contaminación y planeamiento regional. En resumen, es la aplicación de los conocimientos y el entendimiento de los conceptos básicos de la geología a la solución, mitigación o prevención de problemas ambientales generados por razones naturales o antropogénicas.

La aplicación de la geología a la problemática ambiental no es algo sencillo y por esta razón no existen manuales o métodos de aplicación general; cada problema geológico-ambiental involucra diversas variables como clima, pendientes, agua subterránea, tipos de suelo y de roca, entre otras, que deben ser tenidas en cuenta al momento de proponer una solución o un plan de acción. En este texto se suministran unos conocimientos básicos acerca de la conformación del planeta, de los procesos físicos y químicos y de las geoformas que estos procesos originan y su relación con la problemática ambiental, con el fin de que los diferentes profesionales y estudiantes de carreras relacionadas con el medio ambiente adquieran los conocimientos necesarios para un buen desempeño.

La tierra es un planeta cuya conformación interna le permite ser dinámica y ese dinamismo es el que facilita la conservación de la vida en todas sus formas. La teoría de las placas tectónicas explica la división de la corteza o capa superior de la tierra en una serie de placas que se mueven en diferentes direcciones, destruyendo y generando nueva corteza, desplazando los continentes y cambiando las condiciones climáticas; obligando a las especies a evolucionar o a desaparecer. Estos movimientos también generan los fenómenos conocidos como amenazas geológicas: volcanes, fenómenos de remoción en masa y terremotos, los cuales son factores determinantes a la hora de elegir sitios para asentamientos humanos o para tomar decisiones sobre las características de las obras de infraestructura, para evitar su destrucción o para minimizar su impacto ambiental.

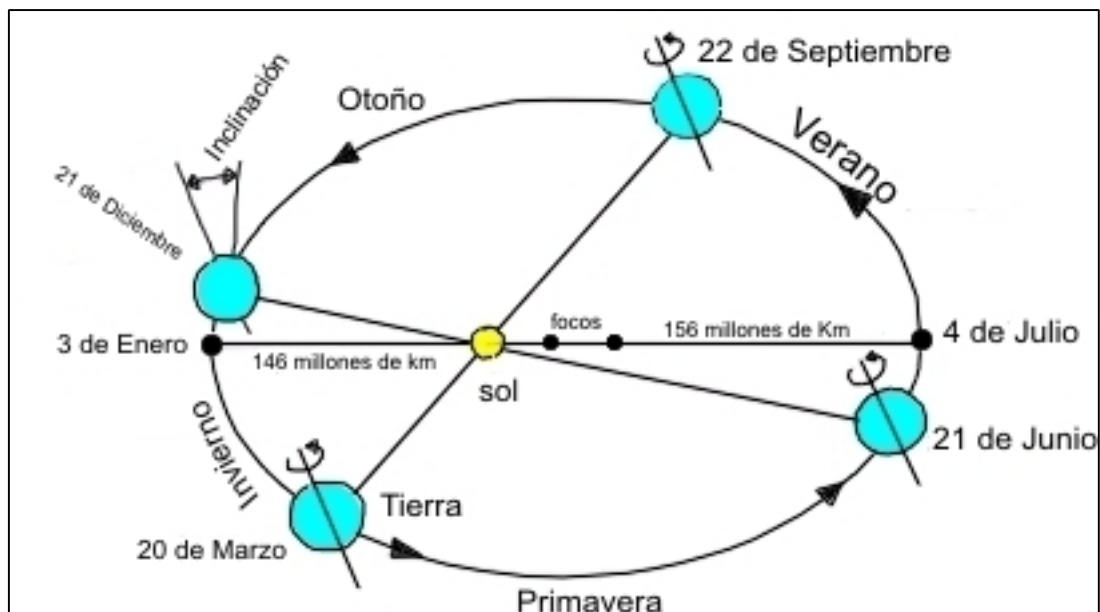
Algunas de las características de las rocas como el origen, composición y el proceso de meteorización, determinan el comportamiento mecánico de éstas, como techos de túneles o de minas y como base de construcciones. También determinan la composición y características físicas y químicas de los suelos; variables que adquieren gran importancia para poder determinar el uso adecuado y sostenible de este recurso que junto al agua se han venido explotando y contaminando de manera indiscriminada.

Las geoformas o las formas del relieve terrestre juegan un importante papel, especialmente cuando se trata de prevenir las pérdidas de vidas o de propiedades como consecuencia de deslizamientos, lahares, inundaciones y otros fenómenos que cada día son más comunes debido a la deforestación, calentamiento global y deficientes métodos de explotación de recursos.

En síntesis, se puede decir sin lugar a dudas que la geología determina en gran parte la intensidad del impacto ambiental que puede generar una actividad antropogénica o un fenómeno natural y por tanto, su aplicación en cualquier tipo de proyecto que involucre suelos, agua y aire, reduce los costos ambientales, económicos y sociales.

1. LA TIERRA

La tierra es el tercer planeta más cercano al sol después de Mercurio y Venus, describe una órbita elíptica en su viaje alrededor del sol en un movimiento conocido como translación con una duración de un año. Su eje se encuentra inclinado $23,5^\circ$ con respecto al plano de su órbita, debido a esta inclinación realiza un movimiento lento de cabeceo que durante seis meses expone más un hemisferio que el otro a la radiación solar. Esta diferencia en exposición a la radiación entre los hemisferios junto con la distancia al sol produce cambios climáticos conocidos como estaciones (Gráf. 1).



Gráfica 1. Movimiento de la tierra alrededor del Sol.

Fuente: Modificado de New Views on an old planet.

1.1 ORIGEN DE LA TIERRA

El origen del sistema solar sigue siendo materia de debate. Actualmente existen diversas hipótesis acerca del origen de la tierra, pero una de las más consistentes se refiere a una gran masa difusa de gas y polvo que rotaba lentamente en el espacio y posteriormente comienza a contraerse debido a la fuerza gravitacional, aumentando su velocidad de rotación y concentrando materia en el centro. La compresión de materia eleva la temperatura hasta que se inicia el proceso de fusión nuclear; así nace el sol. La materia que gira alrededor del nuevo sol se enfría y se condensa formando nueve planetas, entre ellos la tierra.

Durante dicho enfriamiento, la tierra fue embestida por un gran meteorito que en su paso hacia el interior arrastró los metales hacia el centro, es por esta razón que

el centro de la tierra es predominantemente metálico. La colisión levantó gran cantidad de material que posteriormente da origen a la Luna.

1.2 FORMA Y COMPOSICION DE LA TIERRA

La tierra es un cuerpo aproximadamente esférico con un diámetro de 12756 km en el Ecuador y 12714 km en los polos, que gira sobre un eje imaginario en un movimiento llamado rotación, produciendo una fuerza centrífuga mayor en el Ecuador y menor en los polos, lo cual ha dado como resultado un cuerpo abultado en el Ecuador y achatado en los polos. La tierra atrae los cuerpos hacia el centro del planeta con una fuerza conocida como fuerza de gravedad, pero debido a la diferencia en los diámetros esta fuerza es ligeramente mayor en los polos.

La tierra se encuentra rodeada de una capa gaseosa llamada atmósfera y en su superficie se encuentran otras capas como la hidrosfera, biosfera y la capa regolítica o regolito. Esta última es la que comúnmente se conoce como suelo y se forma por la interacción entre las diferentes capas en un proceso llamado meteorización. La superficie de la tierra está dividida en continentes y océanos en un 29 y 71%, respectivamente.

1.3 ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA

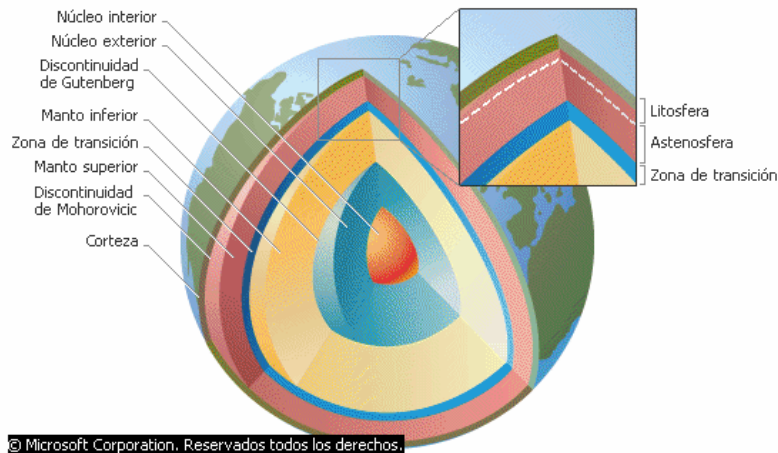
Internamente la tierra está dividida en una serie de capas concéntricas de propiedades químicas y físicas diferentes pero complementarias. La primera capa es la corteza con un espesor que varía de 5 a 70 Km, dividida en corteza continental y corteza oceánica.

La corteza continental está conformada principalmente por rocas graníticas y su densidad promedio es de 2.7 g/cm^3 , mientras la oceánica está conformada principalmente por rocas basálticas de una densidad promedio de 3.2 g/cm^3 . La corteza junto con la zona más externa del manto (aproximadamente 200 Km. de espesor) conforman la litosfera.

La segunda capa es el manto con un espesor de 2900 Km. dividido en manto superior y manto inferior. El límite entre la corteza y el manto es conocido como la discontinuidad de Mohorovicic, una zona de unos cientos de metros de espesor donde se intercalan materiales de corteza y el manto. Encima y debajo de la discontinuidad existe una marcada diferencia de las propiedades físicas y químicas de los materiales. La parte superior del manto es una capa que debido a su composición, presión y temperatura se comporta como un cuerpo rígido y junto con la corteza forman la litosfera. Debajo de la litosfera se encuentra una capa del manto más dúctil llamada Astenosfera que gradualmente varía hacia abajo, convirtiéndose en una capa más rígida a una profundidad de 220 Km. o más. Después de una zona de transición de un espesor aproximado de 270 Km. se

encuentra el manto inferior o mesosfera cuyo límite con el núcleo está a unos 2900 km. de profundidad.

El núcleo se divide en dos partes: Núcleo externo y Núcleo Interno constituidos por aleaciones de hierro y níquel, el primero se comporta como un líquido y tiene un espesor de 2200 Km. y el segundo es sólido. (Gráfica 2).



Gráfica 2. Estructura interna de la tierra.

Fuente: Enciclopedia Encarta Microsoft.

1.4 CICLOS TERRESTRES

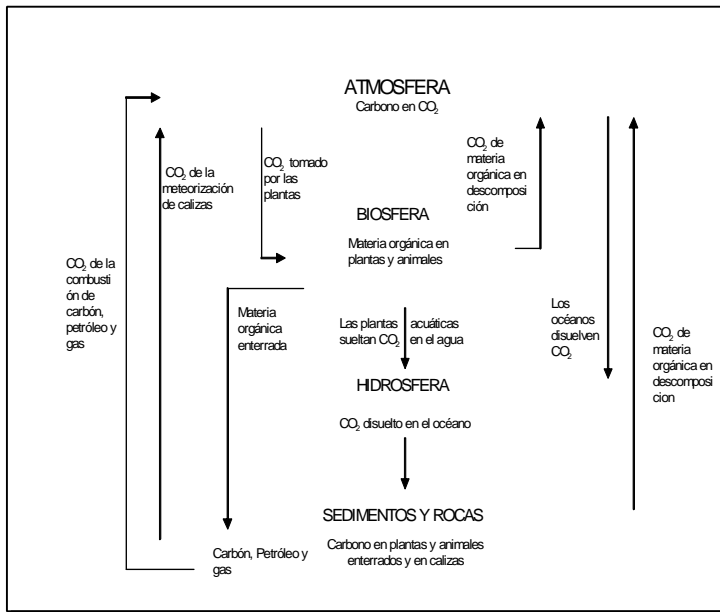
Las capas exteriores de la tierra son sitios de continua e intensa actividad en ciclos o secuencias de eventos recurrentes. Existen diversos ciclos entre los cuales se destacan el del carbono, el hidrológico y el de las rocas.

1.4.1 CICLO DEL CARBONO

Este ciclo involucra circuitos intercomunicados entre la atmósfera, la biosfera, hidrosfera y la corteza. Los circuitos y los reservorios están en equilibrio excepto por la interferencia del hombre. La combustión de carbón y petróleo acelera el ciclo del carbono de las rocas sedimentarias hacia la atmósfera, aumentando así el contenido de CO_2 en esta capa. (Gráfica 3)

1.4.2 CICLO HIDROLÓGICO

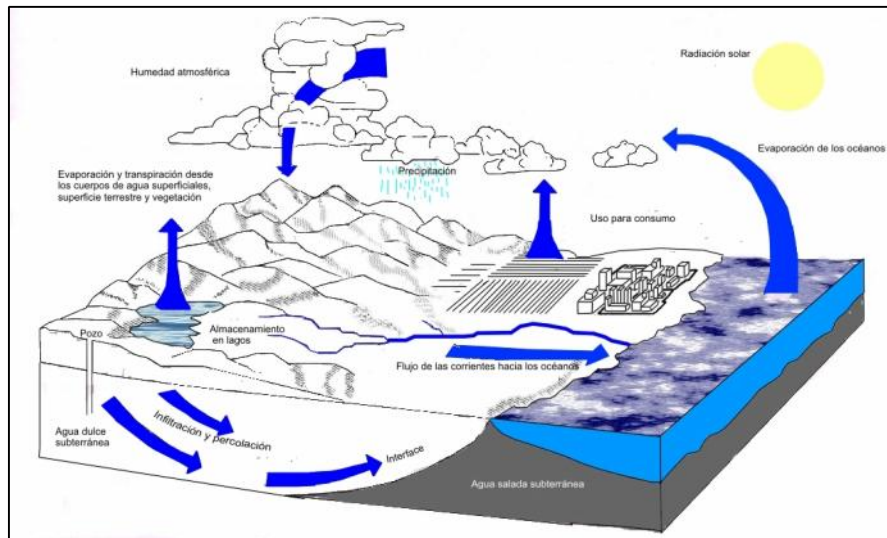
El ciclo hidrológico comprende el complejo sistema por el cual el agua circula entre sus reservorios, éstos incluyen océanos, polos, glaciares, agua subterránea y superficial. Se encuentra directamente acoplado con el ciclo de energía de la tierra, debido a que la radiación solar se combina con la gravedad para generar la circulación global del agua.



Gráfica 3. Ciclo del carbono.

Fuente: Earth Systems Processes and Issues.

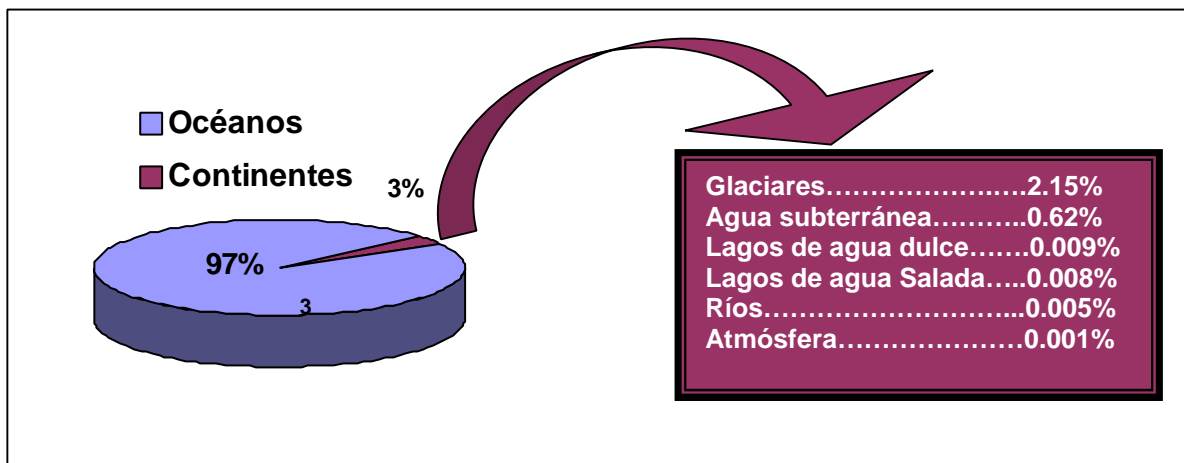
El agua se evapora hacia la atmósfera a partir de los océanos y en menor escala a partir de los continentes; el viento transporta este aire cargado de humedad. Cuando la lluvia cae sobre el océano el ciclo se completa; pero si cae sobre el continente una porción se infiltra en el suelo apareciendo luego en ríos, lagos o directamente en el océano, otra porción se evapora o corre superficialmente hacia lagos o corrientes donde también se presenta evaporación. El agua que absorben las plantas es liberada a la atmósfera en un proceso llamado transpiración. El agua que cae en altas elevaciones o altas latitudes se congela y luego es liberada por descongelación (Gráfica 4).



Gráfica 4. El ciclo del agua.

Fuente: modificado de Earth Systems Processes and Issues.

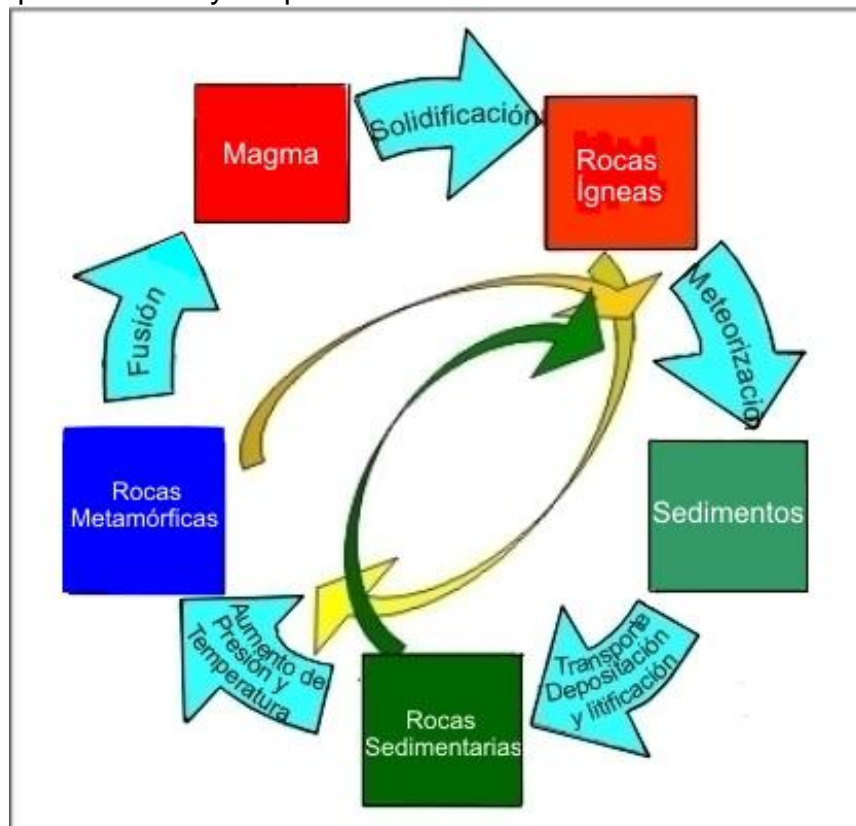
El contenido total de agua en la hidrosfera es de 1360 millones de kilómetros cúbicos de los cuales el 97.2% se encuentra en los océanos (Gráfica 5).



Gráfica 5. Balance total de agua en la tierra.
Fuente: Autor.

1.4.3 CICLO DE LAS ROCAS

Las rocas en la corteza terrestre están sujetas a procesos físicos y químicos que las destruyen o las convierten en otro tipo de rocas. La gráfica 6, muestra los diferentes tipos de rocas y los procesos.



Gráfica 6. Ciclo de las rocas.
Fuente: Autor

1.5 INICIOS DE LA GEOLOGIA

La geología es una ciencia que ha venido evolucionando y haciéndose cada vez más precisa a medida que los cambios sociales y los adelantos tecnológicos permiten un mayor conocimiento de nuestro planeta. Básicamente se define la geología como la ciencia que estudia la tierra desde su origen, composición y estructura interna hasta los fenómenos físicos y químicos que han dado lugar a los rasgos físicos y a las especies presentes en la superficie del planeta.

Las primeras ideas conocidas sobre el origen del planeta y sus rasgos físicos fueron de tipo religioso, en las cuales se planteaba un origen divino para todo el universo; con ideas erróneas como la de que la tierra era el centro del universo. A pesar del dominio de las ideas religiosas, la ciencia continuó avanzando y grandes astrónomos y físicos como Nicolás Copérnico y Galileo Galilei lograron importantes avances en el conocimiento del universo y plantearon por primera vez la idea de que la tierra giraba alrededor del sol.

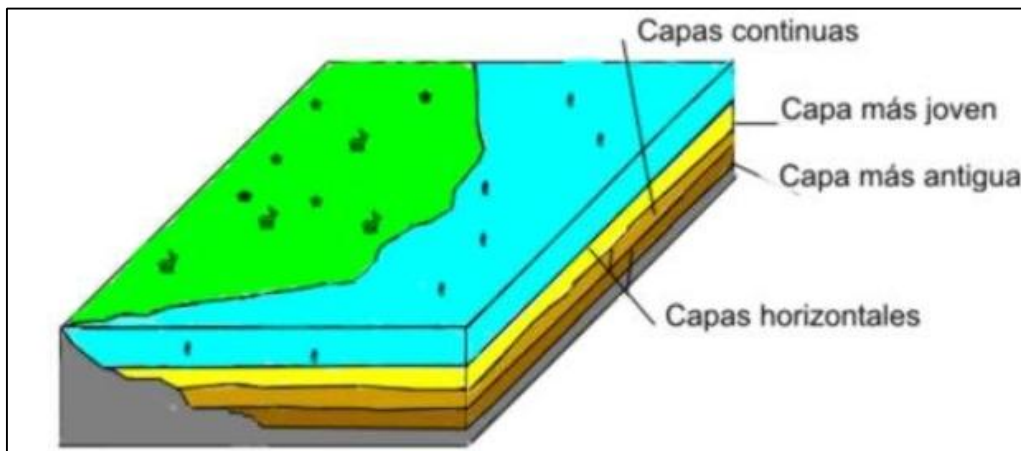
El desarrollo social debilitó el poder religioso permitiendo el avance de la investigación científica. Con el conocimiento de que la tierra no era el centro del universo y era esférica y además la duda sobre el origen divino, empezaron las primeras contribuciones a la ciencia que hoy conocemos como geología.

Los primeros científicos consideraban que la superficie de la tierra era relativamente estable y que las montañas, valles y otros rasgos fisiográficos se formaban por eventos rápidos y de intensidad cataclísmica. Esta teoría fue conocida como Catastrofismo. Otra teoría fue el Neptunismo, que con base en la presencia de fósiles de animales marinos en zonas continentales, consideraba el origen de la superficie de la tierra a partir de un gran océano que la cubría totalmente.

Las primeras contribuciones a la geología moderna las hizo el físico Danés Nicolaus Steno en el siglo XVII, después de estudiar los sedimentos depositados por los ríos y el mar Mediterráneo. Él observó que los sedimentos tenían algunos rasgos físicos similares a los de las rocas y concluyó que éstas se habían originado a partir de antiguos sedimentos.

Steno propuso tres principios fundamentales para la geología moderna: primero, el principio de la horizontalidad original que establece que los sedimentos siempre se depositan en capas horizontales. El segundo principio es el de la continuidad original, en el cual se establece que los sedimentos se depositan en capas continuas hasta que ellas terminan en una superficie sólida. El tercer principio es el de la superposición, que establece que en una secuencia vertical de capas rocosas cada capa que suprayace a otra es más joven que ésta. (Gráf. 7).

En el siglo XVIII, James Hutton refuta el catastrofismo y el neptunismo al afirmar que la superficie de la tierra no es estable, que los valles se forman por un proceso lento y constante llamado erosión y las montañas por solevantamientos graduales. También explicó que algunas rocas se forman más por enfriamiento de una mezcla fundida que por precipitación de un océano. Todas las ideas de Hutton se incorporan en el principio del Uniformitarismo, en el cual se establece que las leyes físicas y químicas que rigen los procesos naturales han sido constantes a lo largo de la historia de la tierra y que su evolución ha sido más continua que catastrófica. Este principio agrega que los procesos varían en intensidad de acuerdo a las circunstancias.



Gráfica 7. Principios de Steno.

Fuente: Modificado de Fundamentos de Geología

1.6 DERIVA CONTINENTAL, EXPANSION DEL PISO OCEANICO Y PLACAS TECTONICAS

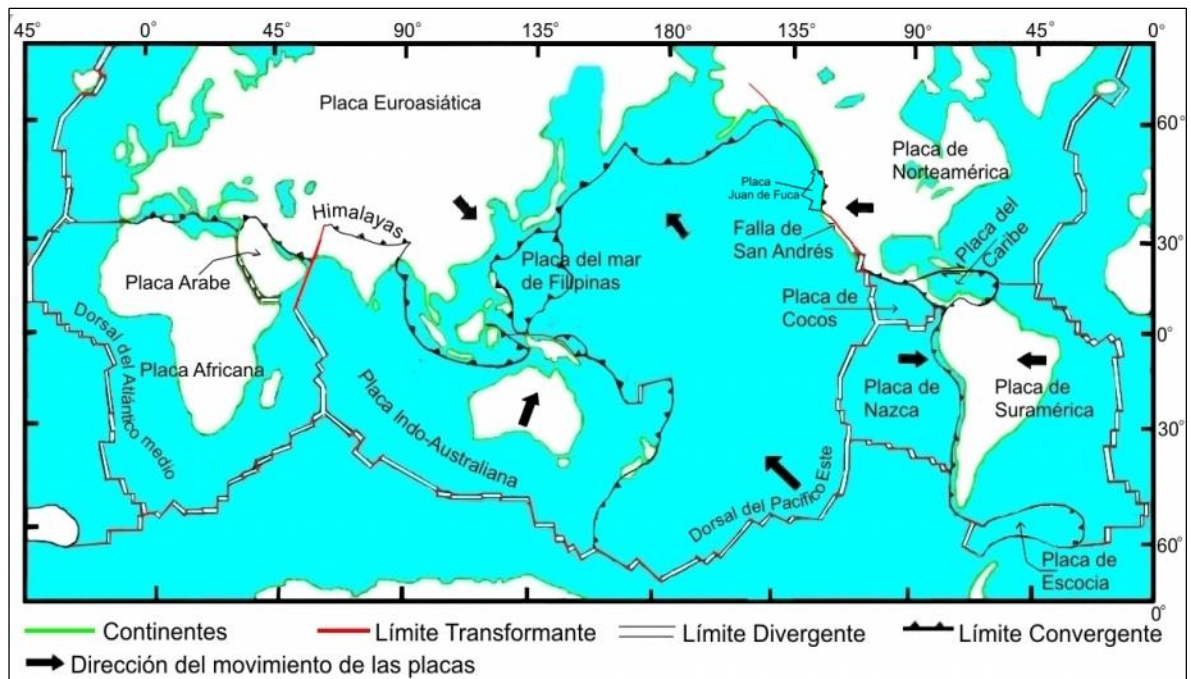
En 1915, el meteorólogo y geofísico alemán Alfred Wegener sugirió la hipótesis de la deriva continental, según la cual los continentes flotan alejándose o acercándose entre sí, sobre un substrato más denso y menos rígido que la corteza. Algunas de las bases de esta hipótesis fueron la marcada similitud entre las líneas costeras opuestas, la presencia de rocas y fósiles similares en diversos continentes y la evidencia de paleoclimas idénticos. En los inicios de los años sesenta se encontró que los límites de las plataformas continentales correspondían más exactamente entre un continente y otro que las costas.

Wegener sostenía que a finales de la era paleozoica (hace 200 a 250 m.a.) existía una gran masa de tierra llamada Pangea que consistía de dos segmentos supercontinentales: Laurasia conformado por Norteamérica y Eurasia y Gondwana conformado por Suramérica, Africa, India y Antártida. Aparte de la concordancia de los límites continentales, de la existencia de esta gran masa continental,

existen otras pruebas como fósiles de plantas y animales encontrados en estratos con edades de 205 a 280 m.a, que exhiben fuertes similitudes.

Los nuevos adelantos tecnológicos han permitido formular una teoría más consistente y de mayor alcance que la deriva continental conocida como Placas Tectónicas. De acuerdo con esta teoría la corteza terrestre se encuentra dividida en placas que se mueven en diferentes direcciones, impulsadas por las corrientes de convección que se presentan en el manto. En este movimiento la parte superior del manto que se comporta como una capa fuerte y rígida se mueve junto a la corteza, sobre una capa plástica conocida como astenosfera.

La litosfera se encuentra dividida en numerosos segmentos llamados placas (gráfica 8) que se mueven en diferentes direcciones y cambian continuamente de tamaño y forma. Se reconocen siete placas mayores: Norteamérica, Suramérica, Pacífico, África, Eurasia, Australia y Antártica.



Gráfica 8. Placas tectónicas.

Fuente: modificado de Surface processes and Landforms.

La placa más grande es la del Pacífico conformada casi totalmente por piso oceánico, existen placas de tamaños intermedios como Nazca, Cocos, Filipinas, Arabia, Caribe y Escocia.

Las placas se mueven de manera muy lenta pero continuamente a razón de pocos centímetros por año. Esos movimientos de las placas generan terremotos, crean volcanes y deforman grandes masas de rocas formando cadenas montañosas.

1.7 LÍMITES ENTRE PLACAS

El contorno de las placas está definido por tres tipos de límites: divergentes, convergentes y de falla de rumbo o límites transcurrentes; cada placa está rodeada por una combinación de esos límites o zonas.

1.7.1 LIMITES DIVERGENTES

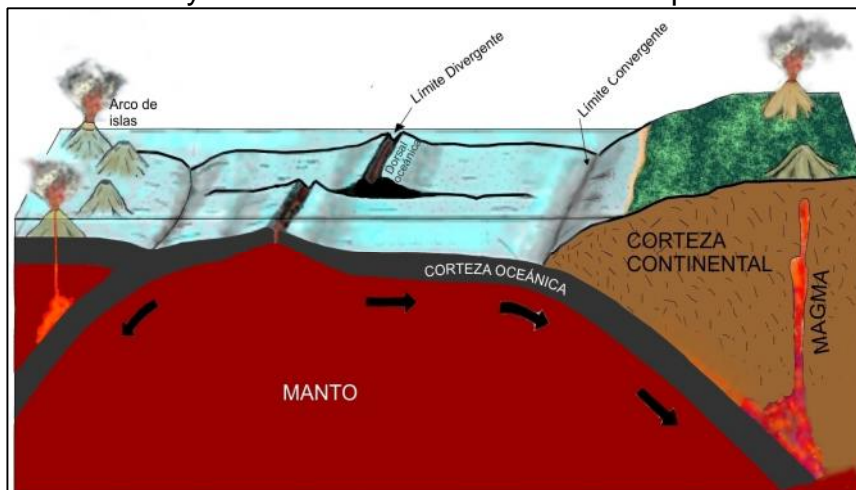
La mayoría de estos límites están situados a lo largo de cordilleras oceánicas también llamadas dorsales; allí las placas se alejan una de la otra permitiendo la salida de material fundido proveniente de la astenosfera, expandiendo de esta manera el piso oceánico. Un ejemplo de ello es la dorsal oceánica que se encuentra entre Suramérica y África. Otros centros de expansión o límites divergentes se encuentran en los continentes como es el caso del mar Rojo, donde la península Arábiga se está separando de África con un movimiento hacia el noreste. Los valles oceánicos adyacentes a los límites divergentes son conocidos como Rifts. (Gráfica 9).

1.7.2 LIMITES CONVERGENTES

Estos límites corresponden a los sitios donde dos placas chocan, plegándose y fracturándose, dando lugar a un acortamiento y engrosamiento de la corteza. Estos sitios también son conocidos como zonas de subducción. Las colisiones pueden suceder entre placas continentales, entre placas oceánicas o entre una placa continental y una oceánica.

En el caso de la colisión entre placas continentales ambas se pliegan y forman una cadena montañosa, un ejemplo son los montes Urales producto de la colisión entre la placa Asiática y la Europea.

En la colisión entre placas oceánicas una se incrusta debajo de la otra hacia la astenosfera y cuando la colisión es entre una placa oceánica y una continental, la primera se incrusta debajo de la segunda.



Gráfica 9. Límite convergente y Divergente.

Fuente: modificado de Surface Processes and Landforms.

Un ejemplo de un límite convergente formado por el choque entre una placa oceánica y una continental es la zona occidental de Suramérica, donde la placa de Nazca (oceánica) se incrustó bajo la placa Suramericana, plegándola y dando origen a la cordillera Andina y a los volcanes que se encuentran allí. En el caso de Colombia donde existen tres cordilleras, es la cordillera Central la que se forma simultáneamente con la cordillera Andina. Las cordilleras Occidental y Oriental se forman por los mismos esfuerzos generados por el choque entre estas placas, pero posteriormente y bajo otras circunstancias. Por esta razón los volcanes colombianos se ubican solo en la cordillera Central.

1.7.3 LIMITES TRANSFORMANTES

En este caso, las placas pasan una al lado de la otra sin producción o destrucción significativa de litosfera. Uno de los ejemplos más conocidos es la falla de San Andrés en California, Estados Unidos con unos mil kilómetros de extensión, donde la placa Norteamericana y la placa del Pacífico pasan una junto a la otra produciendo grandes terremotos que afectan áreas metropolitanas. Otro ejemplo es la falla Alpina que pasa por Nueva Zelanda en el límite de las placas del Pacífico y la Indo-Australiana. Otros ejemplos son las fallas transformantes que cortan dorsales y fosas oceánicas.

1.8 TECTÓNICA COLOMBIANA

Desde el punto de vista geodinámico, el territorio Colombiano hace parte de los Andes del norte, que corresponden a una zona orogénica relativamente ancha situada en la frontera entre tres grandes placas litosféricas. Al S-E de los Andes se encuentra la placa de Suramérica, que abarca todo el continente Suramericano y parte del océano Atlántico. Al norte y al occidente de los Andes se encuentran las placas del Caribe y Nazca.

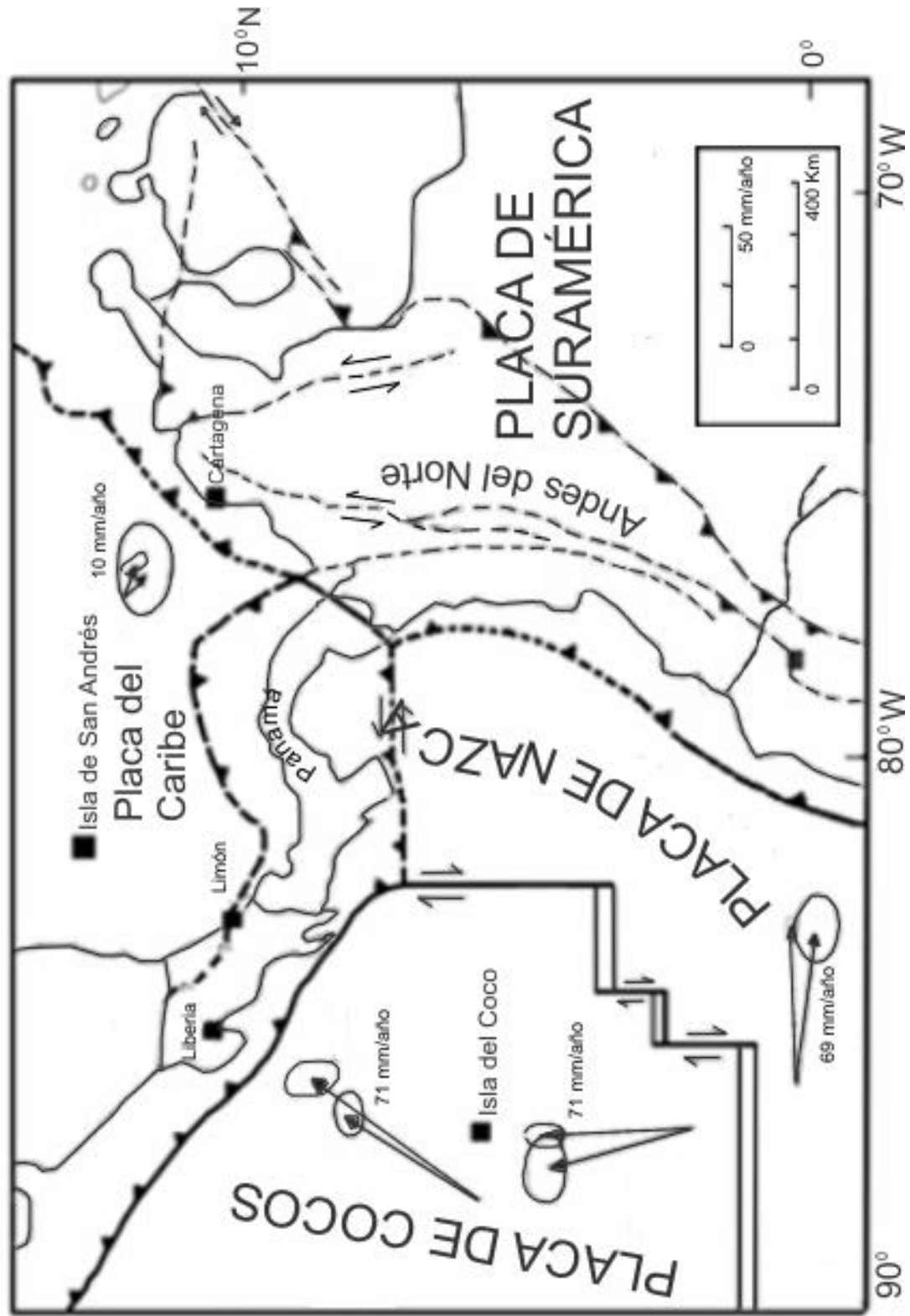
El movimiento relativo entre estas tres placas durante la Era Cenozoica ha originado el relieve y la estructura actual de nuestras cordilleras. Estos movimientos de tipo convergente han generado un contexto tectónico compresivo caracterizado por grandes fallas de cabalgamiento y fallas de rumbo. Los movimientos a lo largo de las fallas son responsables de la actividad sísmica en Colombia y están íntimamente ligados con la aparición de relieves que en algunos casos sobrepasan los 5000 m. de altura.

La placa de Nazca se desplaza a una velocidad de 7 cm/año en sentido Este con respecto a la placa de Suramérica. La placa del Caribe se desplaza a una velocidad de 1 a 2 cm/año en dirección E-SE con respecto a la placa de Suramérica.¹

¹ Estudio general de Amenaza sísmica de Colombia.

La gráfica 10, ilustra la dirección y la tasa de convergencia entre las tres placas que interactúan en los Andes del Norte.

Gráfica 10 Dirección y convergencia entre las tres placas que interactúan en los Andes del Norte.
Fuente: Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia

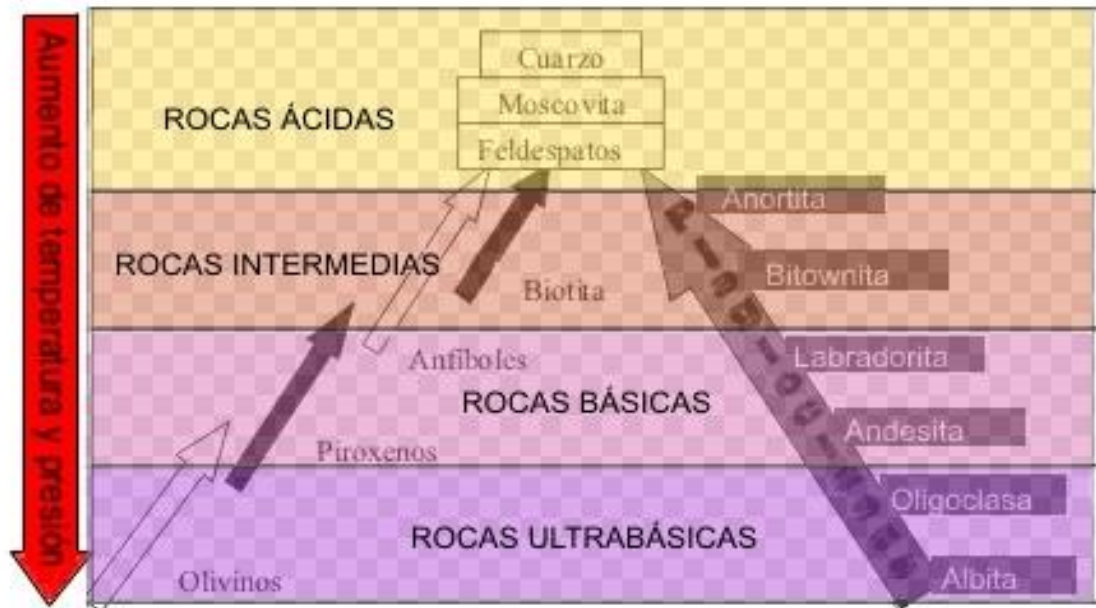


2. MINERALOGÍA

La mineralogía es la ciencia que estudia los minerales a partir de sus diferentes orígenes, estructura cristalina y sus propiedades físicas y químicas. Se conoce como mineral a toda sustancia de origen natural con una estructura cristalina definida, cuya composición química pueda ser expresada como una fórmula.

2.1 GENESIS DE LOS MINERALES

Los generadores primarios de los minerales son los magmas o lo que podríamos llamar roca fundida que se encuentra en estado fluido, estos magmas son menos densos que el medio que los rodea y tienden a ascender enfriándose y solidificando de forma lenta en profundidad o bruscamente en la superficie, como sucede con la lava expulsada por los volcanes. La profundidad de cristalización determina la composición química y mineralógica de las rocas de acuerdo con la serie de Bowen (Gráfica 11).



Gráfica 11. Series de Bowen.

Fuente: Modificado de Fundamentos de geología física

En profundidad los primeros minerales en cristalizar son los refractarios como el olivino, los piroxenos y las plagioclasas cálcicas que forman las rocas básicas y ultrabásicas, relativamente pobres en silicio. Estas rocas pueden contener cantidades anómalas de cromita, sulfuros de níquel, cobre y minerales del platino, dando lugar a yacimientos denominados ortomagmáticos. En algunos lugares de la corteza continental donde ésta se adelgaza, los magmas del manto superior

ricos en sodio (Na) y potasio (K) pueden ascender a través de fracturas profundas dando lugar a rocas ultrabásicas alcalinas muy interesantes por su contenido en tierras raras y diamantes.

Solidificadas las rocas ultrabásicas, el magma que queda es más rico en sílice y agua, su solidificación da lugar a rocas intermedias y ácidas formadas principalmente por plagioclasas más sódicas, anfíboles, biotita, moscovita, clorita, feldespato K (ortoclasa) y cuarzo.

El líquido residual de estas sucesivas cristalizaciones puede llegar a ser muy rico en agua y volátiles, dando lugar a rocas de grano grueso conocidas como pigmatitas con muy buenas cristalizaciones de turmalina, espondúmena y muchos otros minerales apreciados en joyería y colecciones.

Cuando el entorno rocoso no puede mantener el agua de los residuos magmáticos en solución, ésta se separa en un proceso de ebullición arrastrando sílice, cloruros y muchos metales en solución que precipitarán en fracturas generando filones hidrotermales o bien reaccionarán con rocas carbonatadas para formar Skarns (rocas con silicatos cálcico férricos como granates y piroxenos).

El agua meteórica que se infiltra puede ser calentada en profundidad por la aureola térmica de los magmas, una manifestación superficial son las fumarolas y fuentes termales alrededor de las cuales se puede depositar sílice, oro y azufre.

La meteorización transforma minerales en otros más estables y las rocas se disgregan. Los minerales más resistentes forman partículas de diversos tamaños que el viento y el agua en todas sus formas transportan y depositan; dando lugar a sedimentos clásticos como gravas, arenas, limos y arcillas que cuando son ricos en oro, diamantes, platino, etc son conocidos como placeres.

El resto de minerales y roca se destruyen y se transforman en otros, transformándose en componentes inorgánicos de los suelos. El interés económico durante ese proceso son los yacimientos de illita, caolín, montmorillonita y zeolitas formados a expensas de feldespatos y vidrios volcánicos o las bauxitas formadas sobre rocas ricas en aluminio. Las aguas transportan el resto de componentes de las rocas de manera disuelta y posteriormente son precipitados formando nuevos sedimentos. Esta precipitación tiene lugar en las costas, plataformas marinas, lechos de lagos - ríos y fondos oceánicos formando fangos calcáreos, las fosforitas, evaporitas de aragonito, yeso, halita y las capas de óxido de hierro o nódulos de óxido de manganeso.

Cuando estos sedimentos son cubiertos por muchas capas, la presión litostática, la temperatura y la expulsión de agua originan nuevos minerales como zeolita, illita, anhidrita, etc. Cuando la temperatura y presión son mayores se produce metamorfismo el cual origina nuevos minerales como clorita, biotita, grafito, etc.

2.2 LOS MINERALES Y SUS ASOCIACIONES

Los minerales rara vez se encuentran solos en la naturaleza. La mayoría se encuentran asociados con otros de estructura cristalina y composición química diferente. Esto permite descifrar las condiciones de temperatura y presión bajo las cuales se formó la roca.

2.3 LAS ROCAS COMO AGREGADOS DE MINERALES

Las rocas generalmente están compuestas por dos o más minerales. En las rocas ígneas y metamórficas el número de minerales tiende a ser pequeño. El basalto y su equivalente intrusivo, el gabro, consisten de plagioclasa y clinopiroxenos y menores cantidades de olivino, ortopiroxenos y óxidos de hierro y titanio. La Riolita y el granito, así como la mayoría de rocas ácidas encontradas en regiones orogénicas, están formadas de cuarzo, feldespato y plagioclasa con bajas cantidades de biotita, moscovita y hornblenda. Las rocas metamórficas como el esquisto biotítico, anfíbolita y gneiss normalmente están formadas de un pequeño número de minerales, usualmente menor que seis.

Las rocas sedimentarias, especialmente las formadas principalmente por erosión mecánica y rápida depositación, contienen la mayoría de minerales presentes en la región fuente. Si esta región contiene una gran variedad de tipos de roca, la cantidad de minerales presentes en la roca es mayor.

2.3.1 ROCAS SEDIMENTARIAS Y SUS PROCESOS

Las asociaciones minerales en las rocas sedimentarias son muy variadas y menos predecibles que en las rocas ígneas y metamórficas. En las rocas terrígenas tales como las areniscas, los procesos de equilibrio y químico no operan hasta el inicio de la recristalización. Estos procesos operan indirectamente durante la meteorización de la región fuente. La relativa estabilidad química de los minerales está relacionada con el número de enlaces fuertes Si-O en la estructura que podrían ser rotos durante la disolución. Los silicatos ferromagnesianos igual que los piroxenos y el olivino tienen baja relación Si/O y presentan baja resistencia al ataque químico; por lo tanto son minerales poco comunes en sedimentos formados como resultado de un largo proceso de meteorización y transporte. Los anfíboles (Si/O = 4:11) y micas (Si/O = 2:5) son más resistentes al ataque químico, pero menos resistentes que el cuarzo (SiO₂).

La resistencia del cuarzo a la meteorización química y física está relacionada con su baja solubilidad y ausencia de clivaje. Los feldespatos son más resistentes a la meteorización que los silicatos ferromagnesianos pero menos resistentes que el cuarzo. El feldespato a diferencia del cuarzo no sobrevive a un proceso de redepositación debido a su clivaje y a su susceptibilidad a transformarse en minerales arcillosos.

Los minerales arcillosos son depositados en ambientes de aguas tranquilas a causa de su pequeño tamaño y baja velocidad de asentamiento.

Una gran variedad de minerales con propiedades químicas y físicas similares al cuarzo contribuyen a la composición de los sedimentos detríticos.

Los minerales arcillosos con suficiente aluminio y potasio se transforman en micas (moscovita o biotita). Las rocas ricas en Fe y Si producen una variedad de silicatos de hierro como hematita, magnetita, hedenbergita, almandina, etc.

2.3.2 ROCAS METAMORFICAS Y SUS PROCESOS

Las rocas metamórficas se forman en un rango de presión y temperatura entre la diagénesis sedimentaria y los procesos ígneos. Las rocas sufren cambios texturales como aumento del tamaño de los cristales debido a la recristalización y un progresivo desarrollo de la fábrica metamórfica debido al alineamiento de los cristales durante el crecimiento. La presión y la temperatura determinan la transformación de unos minerales en otros. En condiciones de alta temperatura y presión una masa química se puede convertir en hornblenda; esta masa podría tener minerales como el zircón, esfena, apatito y granates, en condiciones de temperatura y presión menores la misma masa química se convierte en clorita y actinolita. La hornblenda a más altas condiciones de temperatura y presión se transforma en piroxenos y granates.

Los minerales producto del metamorfismo sirven para determinar el grado de éste. La clorita, epidota, actinolita y otros determinan un grado bajo de metamorfismo. La sillimanita y los clinopiroxenos son producto de un alto grado de metamorfismo.

2.3.3 ROCAS IGNEAS Y SUS PROCESOS

Las rocas ígneas se forman por solidificación del magma. Este se forma por transformación de roca sólida en líquido que luego alcanza niveles más altos en la corteza terrestre y cristaliza. En las zonas de subducción o convergentes, el magma forma los arcos volcánicos y en las zonas divergentes forma las dorsales oceánicas cuando alcanza la superficie de la corteza.

Si el magma cristaliza en el interior de la corteza el enfriamiento es más lento, los cristales más grandes y el proceso de cristalización es completo. Las primeras rocas en cristalizar (las más profundas) son ricas en olivinos, piroxenos, hornblenda y plagioclasa cálcica y las últimas ricas en cuarzo, feldespato y plagioclasa sódica.

2.4 CLASIFICACION DE LOS MINERALES

La siguiente clasificación de los minerales se hace de acuerdo a su composición química

2.4.1 LOS SILICATOS

Son los minerales más abundantes en la corteza terrestre y el manto. Los feldespatos y el cuarzo son los más abundantes y dispersos en la corteza; el olivino y los piroxenos son los más abundantes en la parte inferior del manto.

El silicato más importante es el cuarzo, que es constituyente esencial de algunas rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas. De acuerdo a las condiciones de temperatura y presión se presenta cuarzo de baja temperatura, tridimita y cristobalita.

El cuarzo nunca se encuentra asociado con nefelina ni corindón, tampoco se encuentra en basaltos, gabros y otras rocas máficas. Industrialmente es utilizado en la fabricación de vidrios. La tridimita y cristobalita son comunes en ladrillos refractarios de alta temperatura. Las variedades coloreadas como la amatista y citrina son utilizadas como gemas. El cuarzo desarrolla cristales hexagonales con dipirámides.

Los feldespatos son el grupo mineral más abundante en la corteza terrestre. Los feldespatos con calcio y/o sodio son llamados plagioclasas, de estas las más importantes son la albita ($\text{Na Si}_3 \text{AlO}_8$) y la anortita ($\text{CaSi}_3\text{AlO}_8$), ortoclasa, microclina y sanidina; que se utilizan en fabricación de porcelanas y vidrios.

Otros silicatos importantes son las micas, los piroxenos, los anfíboles y el berilo; este último debe su importancia a que es el mineral mena de las esmeraldas.

2.4.2 LOS ELEMENTOS NATIVOS

Son minerales compuestos por un solo elemento, que se presentan en estado natural en las rocas, son raros y son la mayor fuente de ciertos metales preciosos (oro y plata). Poseen características como brillo metálico, alta conductividad eléctrica y térmica y maleabilidad, especialmente los llamados metales. Algunos minerales nativos son: el oro, plata, cobre, diamante, grafito, arsénico, etc.

El oro nativo generalmente se presenta en venas hidrotermales de cuarzo en pizarras y esquistos, asociado con pirita y otros sulfuros (Fig.1). El platino ocurre en rocas ultramáficas asociado con olivino, cromita y piroxenos.



Figura 1. Muestra de oro de filón, encontrada en Vetas, Santander.

Fuente: Autor.

La plata es también un producto de soluciones hidrotermales asociado con sulfuros de hierro, cuarzo, calcita y zeolitas.

2.4.3 LOS SULFUROS

Este grupo de minerales es de gran importancia como fuente de la mayoría de metales. Algunos sulfuros son: la Esfalerita (ZnS), Calcopirita ($CuFeS_2$), Cinabrio (HgS), Bornita (Cu_5FeS_4), Galena (PbS) y la Pirita (FeS_2).

La pirita es el más abundante de los sulfuros, ocurre en un amplio rango de temperaturas y en una gran variedad de rocas; también es utilizada en la fabricación de ácido sulfúrico y su explotación no se realiza por su hierro sino por el oro y cobre frecuentemente asociados. La calcopirita se utiliza para extraer cobre y el Cinabrio es el mineral mena del mercurio.

2.4.4 LOS HALUROS

Son minerales en los cuales el elemento halógeno es un anión esencial; los más comunes son la halita y la fluorita. Ocurren principalmente en rocas sedimentarias que se forman por precipitación de agua de mar o salmueras alcalinas. Durante la formación de depósitos marinos evaporíticos la halita es uno de los primeros minerales en precipitar. La fluorita comúnmente se encuentra en venas de plomo-plata asociada con barita, cuarzo y dolomita, también como un mineral accesorio en la alteración hidrotermal de granitos; es utilizada en la fabricación de acero.

2.4.5 LOS ÓXIDOS

Son minerales que consisten de uno o más cationes metálicos unidos a aniones de oxígeno o hidróxido. Algunos óxidos son: Hematita (Fe_2O_3), Corindón (Al_2O_3), ilmenita ($FeTiO_3$) y la pirolusita (MnO_2). El corindón se encuentra en algunas rocas ígneas como mineral accesorio; se utiliza como abrasivo y piedra preciosa en sus variedades de rubí y zafiro. La hematita es un cemento en rocas

sedimentarias y es el mineral mena del hierro. Otros óxidos son la uranita (UO_2) y la cuprita (CuO_2).

2.4.6 LOS HIDRÓXIDOS

En este grupo de minerales el OH es un anión esencial, algunos ejemplos son: la Brucita y la Gibbsita que ocurren en ambientes acuosos de baja temperatura.

2.4.7 LOS CARBONATOS

Los carbonatos y nitratos incluyen los minerales que tienen CO_3^{2-} o CO_3^{3-} como parte esencial de su estructura. Los carbonatos más conocidos son la calcita y la dolomita; la calcita es el principal mineral en calizas. Otros carbonatos son la malaquita y la azurita.

2.4.8 LOS SULFATOS

Estos minerales tienen el anión (SO_4)⁻ como una parte esencial de su estructura. Los más conocidos son el yeso, la barita y la anhidrita. Se encuentran asociados con zonas oxidadas de depósitos de sulfuros.

Existen otros grupos de minerales llamados cromatos, tungtatos, molibdatos, fosfatos, nitratos y boratos.

2.5 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MINERALES

Todos los minerales tienen una estructura cristalina y una composición química que los diferencia de los demás. La identificación de un mineral en campo se realiza con base en sus propiedades físicas; en algunos casos es posible que no se pueda identificar el mineral, pero se puede identificar a que grupo pertenece. Las propiedades físicas más comunes y fáciles de observar en los minerales son:

- 1- Forma del cristal y hábito
- 2- Brillo y transparencia
- 3- Color y raya
- 4- Clivaje y fractura
- 5- Tenacidad
- 6- Densidad y gravedad específica
- 7- Dureza
- 8- Propiedades únicas

2.5.1 FORMA DEL CRISTAL Y HÁBITO

Las caras externas de un cristal son una expresión de un arreglo simétrico de sus átomos dentro de la estructura. La forma de cristalización de un mineral depende de la tasa de crecimiento y el ambiente de formación.

El término hábito es usado para describir la forma general de un cristal y agregados de cristales. Cuando los cristales se presentan parecidos a agujas se dice que el hábito es acicular; si tienen un arreglo paralelo en forma de columnas se dice que el hábito es columnar o prismático (Figs 2A y 2B). Otros tipos de hábitos son: foliado, tabular, dendrítico, reticulado, fibroso, botroidal, etc.

2.5.2 BRILLO Y TRANSPARENCIA

El brillo es una medida de la luz reflejada. Los metales y algunos sulfuros y óxidos metálicos reflejan casi toda la luz que incide sobre ellos, a esa alta reflexión de la luz se le conoce como brillo metálico. A los minerales que transmiten la luz se les conoce como *transparentes*, cuando esta propiedad es pobre se les conoce como translúcido. El brillo en los minerales transparentes o translúcidos se conoce como brillo no metálico y puede ser clasificado como: vítreo, perlado, resinoso, sedoso, grasoso, mate y adamantino.



Figura 2A. Cristales de cuarzo
Fuente: Enciclopedia Encarta Microsoft.



Figura 2B. Cristal de Pirita
Fuente: Autor.

2.5.3 COLOR Y RAYA

El color es una característica física que imparte belleza natural a un mineral. El color rojo brillante de los rubíes y el azul profundo de los zafiros les dan un preciado valor estético, pero en este caso el color no es una propiedad diagnóstica, puesto que tanto el rubí como el zafiro son variedades de un mismo mineral, el corindón. Los cristales de fluorita pueden ser marrones, amarillos, negros o incoloros, dependiendo de las capacidades absorbivas de las pequeñas cantidades de impurezas (iones). Los electrones de acuerdo a su estado

energético absorben los componentes energéticos similares de la luz blanca. El hierro ferroso (Fe^{++}) absorbe hasta el rojo del espectro visible y el remanente del espectro es transmitido; por lo tanto, los minerales que lo contienen son de color verde. El cromo actúa de manera similar, impartiendo un color verde a la esmeralda, una variedad del berilo ($\text{Al}_2\text{Si}_6\text{Be}_3\text{O}_{18}$) y a ciertas variedades de granates.

El color es diagnóstico solo para pocos minerales que no tienen otra diferencia química ni física, como por ejemplo la azurita que es siempre azul y la malaquita que es siempre verde.

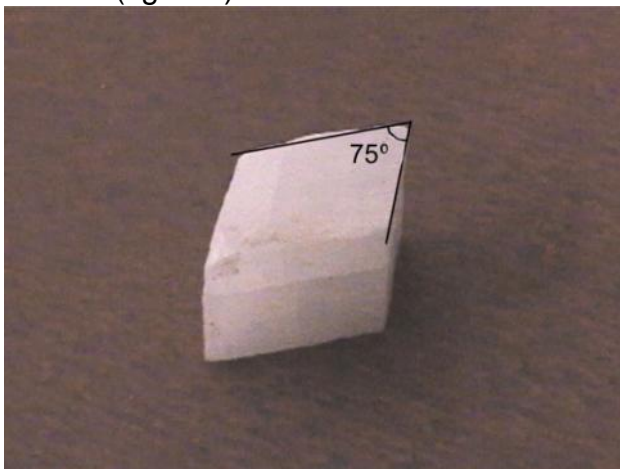
La presencia de inclusiones diseminadas de otras sustancias puede impartir el color a algún mineral, el cuarzo lechoso se encuentra lleno de minúsculos fluidos e inclusiones de gas que dispersan la luz visible. El cuarzo rosa debe su color a pequeñas cantidades de manganeso en su estructura y el cuarzo ahumado posiblemente debe su color a daño por radiación.

La raya es el color del mineral en polvo y es una propiedad mucho más diagnóstica que el color del mineral sin fragmentar. Por ejemplo el color de la hematita va de rojo a negro, pero la raya siempre es marrón rojizo.

2.5.4 CLIVAJE Y FRACTURA

El clivaje es la propiedad que tienen ciertos minerales de romperse siempre a lo largo de los mismos planos debido a que en estos planos los enlaces químicos son débiles. Los minerales pueden ser identificados gracias a las distintas superficies planas que se producen cuando se rompen.

Las micas se rompen formando finas láminas. La halita tiene dos planos de clivaje que forman ángulo de 90° y los planos de clivaje de la calcita forman ángulo de 75° (fig. 2.3). Cuando los minerales eventualmente se rompen en más de una



dirección, el clivaje es descrito por el número de planos exhibidos y los ángulos que forman entre ellos. Los minerales que no tienen clivaje se dice que tienen fractura y ésta puede ser clasificada como concoidal, fibrosa o irregular.

Figura 3. Cristal de Calcita con sus planos de clivaje.

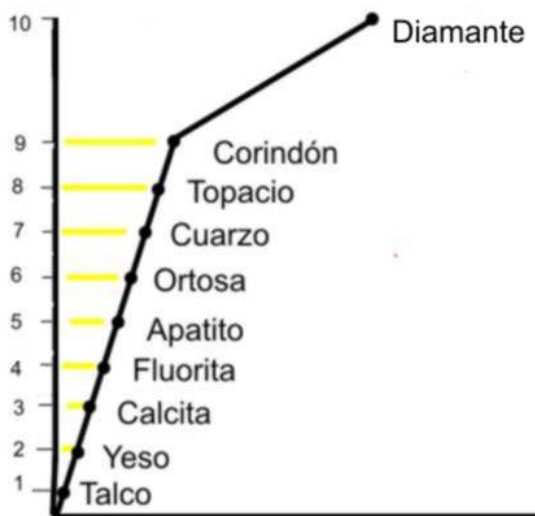
Fuente: Autor.

2.5.5 TENACIDAD

La tenacidad es una propiedad mecánica de los minerales. Aquellos que se rompen fácilmente por un golpe son conocidos como frágiles, los que pueden ser moldeados a golpes se les conoce como maleables, dúctil es aquel mineral que puede ser convertido mecánicamente en un alambre y los minerales séctiles son los que pueden ser cortados con un cuchillo.

2.5.6 LA DUREZA

La dureza es la propiedad más importante y más fácil de determinar en los minerales, consiste en la capacidad de un mineral de no dejarse rayar y depende de la fuerza de los enlaces que unen iones y átomos entre sí y la densidad de los enlaces en la estructura cristalina. En los minerales duros los enlaces fuertes están simétricamente distribuidos mientras que los minerales blandos tienen enlaces débiles confinados a ciertas direcciones específicas dentro de la estructura.



Un ejemplo es la diferencia de dureza entre el grafito y el diamante, ambos constituidos exclusivamente de carbono, pero en el grafito los enlaces débiles unen las láminas y éstas pueden ser fácilmente separadas.

En 1812 Fredrich Mohs propuso una escala de dureza basada en diez minerales (Gráf. 12). Aunque el corindón tiene dureza 9 y el diamante 10, este último es casi cinco veces más duro.

Gráfica 12. Escala de Dureza.

Fuente: Modificada de Investigations in Environmental Geology.

2.5.7 OTRAS PROPIEDADES

Los minerales poseen otras propiedades que ayudan en su identificación como la densidad, la gravedad específica y las propiedades únicas. Entre las propiedades únicas se tiene: magnetismo, piroelectricidad, piezoelectricidad, luminiscencia, fluorescencia y fosforescencia.

3. ROCAS ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS

Las rocas son los materiales que se encuentran debajo de los suelos o expuestas en la superficie donde éstos no se han generado o han desaparecido por erosión. De acuerdo al origen existen tres grupos de rocas: ígneas, metamórficas y sedimentarias, cada grupo presenta diferencias en su textura que permiten identificar a qué grupo pertenece determinada roca.

Cada tipo de roca dentro de cada uno de los grupos tiene su propia composición mineralógica, textura y características diferentes que determinan su comportamiento frente a procesos de meteorización, erosión y fenómenos de remoción en masa. Este comportamiento requiere ser analizado en la mayoría de proyectos puesto que tiene gran influencia en la duración de las obras, intensidad mitigación y remediación del impacto ambiental causado.

3.1 ROCAS ÍGNEAS

Las rocas ígneas se forman por solidificación o cristalización del magma. El magma se puede definir como roca fundida proveniente del manto y en su composición predominan los silicatos que contienen Si, O, Al, elementos alcalinos, alcalinotérreos y Fe, junto con cantidades menores de otros elementos, incluyendo los componentes volátiles de CO₂, H₂O, F, Cl, P, S, etc.

El magma puede solidificar dentro de la corteza terrestre o salir a la superficie en las zonas divergentes o como material volcánico, en este caso toma el nombre de lava. Si solidifica dentro de la corteza da lugar a la formación de rocas ígneas intrusivas o plutónicas y si lo hace fuera da origen a rocas ígneas extrusivas, con características físicas diferentes. Un tercer grupo podría ser las rocas hipoabisales o rocas que se forman por solidificación del magma cerca de la superficie, lo cual hace que éstas presenten características de intrusivas y extrusivas.

Las rocas ígneas intrusivas, como se mencionó anteriormente se forman por solidificación del magma dentro de la corteza terrestre y existen diversas clasificaciones, que tienen en cuenta la forma de los cuerpos rocosos o plutones, textura, composición química, contenido mineralógico y otras características.

3.1.1 CLASIFICACION DE LAS ROCAS IGNEAS INTRUSIVAS

Las rocas ígneas se clasifican de acuerdo a la forma de los cuerpos rocosos, textura, grado de cristalinidad y composición mineralógica, esta última clasificación es la más importante debido a que asigna un nombre específico a cada una de los diferentes tipos de rocas

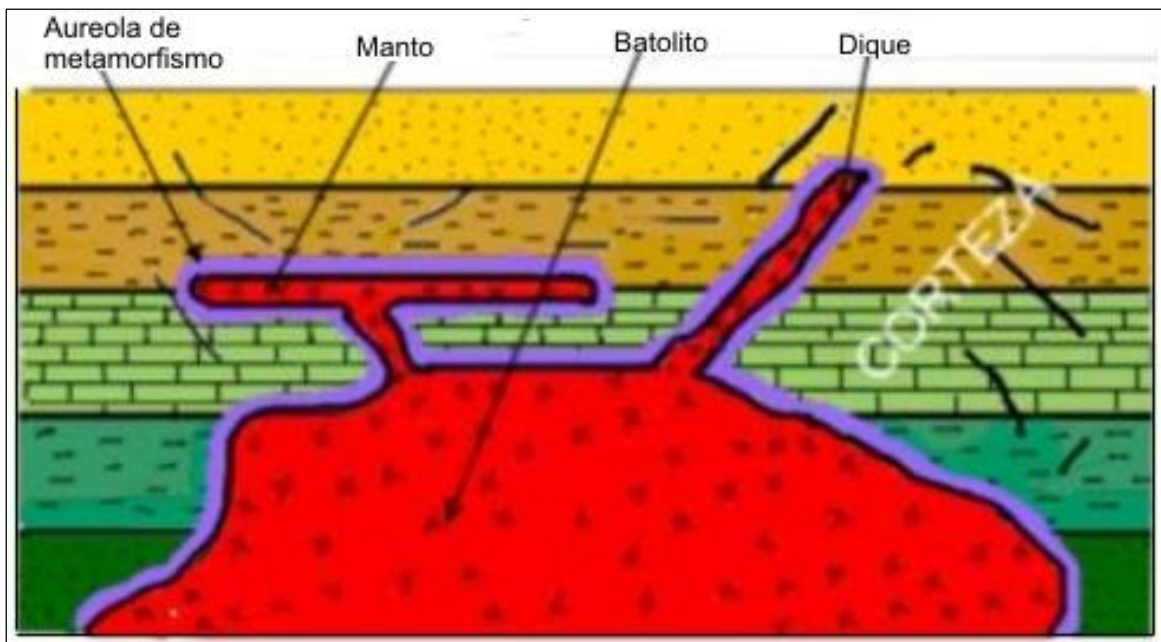
Clasificación de acuerdo a la forma de los cuerpos rocosos o plutones

Las intrusiones magmáticas al solidificar forman cuerpos rocosos con formas características que permiten clasificarlos de diferentes maneras (Gráf. 13). Algunas de las formas son:

Diques. Cuerpos rocosos ígneos de forma tabular que cortan los planos de estratificación o superficies de exfoliación (planos estructurales).

Mantos. Cuerpos ígneos de forma laminar concordantes con los planos estructurales.

Batolitos. Cuerpos ígneos amorfos y gigantes que superan los 100 km² de área; si tienen un área menor reciben el nombre de Stocks.



Gráfica 13. Algunas formas de cuerpos ígneos o plutones.

Fuente: Autor.

Clasificación con base en la textura

La textura comprende la forma, tamaño y distribución de las partículas en una roca y es una característica utilizada para clasificar rocas intrusivas y extrusivas. En el caso de las rocas ígneas las partículas reciben el nombre de cristales.

Existen diversas formas de clasificación con base en la textura, pero de acuerdo con los objetivos de la materia solo se tendrá en cuenta el tamaño de los cristales.

Rocas faneríticas. Son rocas ígneas formadas por cristales visibles a simple vista. Generalmente es una característica propia de rocas intrusivas (Fig. 4). Cuando los cristales son muy grandes y pequeños la roca recibe el nombre de porfirítica. (Fig. 5)

Rocas afaníticas. Estas rocas son formadas por cristales solo visibles a través de un microscopio. Esta característica es propia de la mayoría de rocas extrusivas o efusivas (Fig. 6).

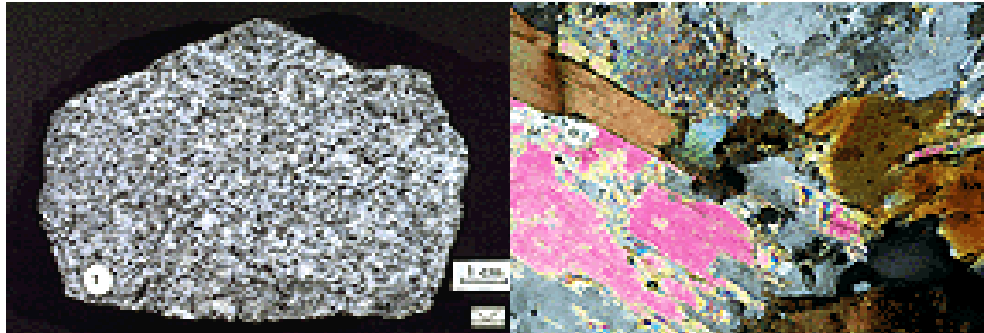


Figura 4. Roca ígnea fanerítica intrusiva llamada Granito. A la derecha sección delgada de la roca, vista a través de microscopio petrográfico.

Fuente: <http://edafologia.ugr.es>

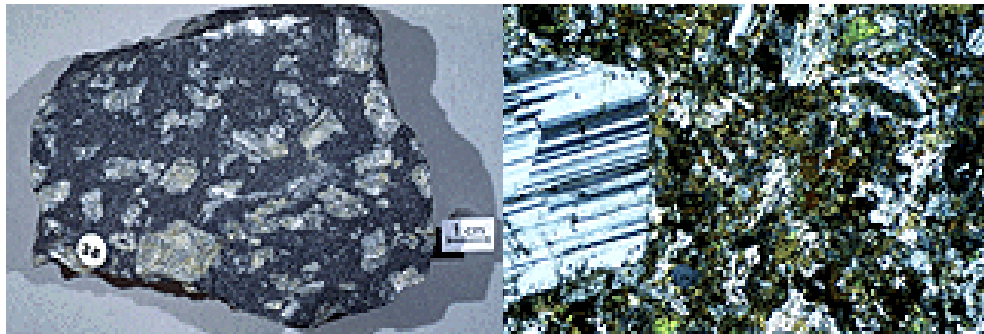


Figura 5. Roca ígnea porfirítica intrusiva llamada Diabasa. A la derecha sección delgada de la roca, vista a través de microscopio petrográfico.

Fuente: <http://edafologia.ugr.es>

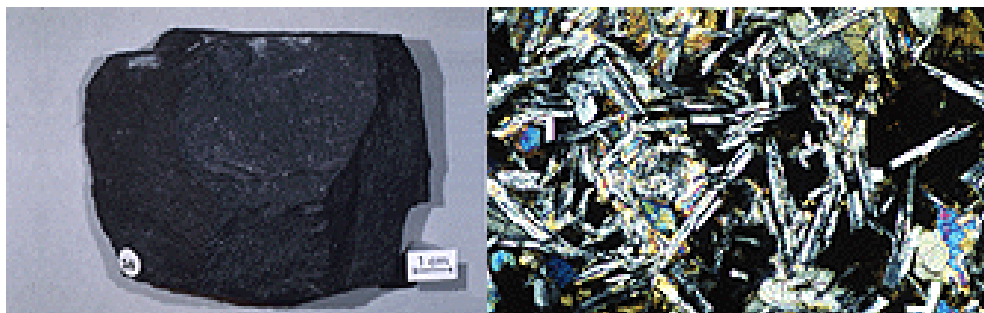


Figura 6. Roca ígnea afanítica extrusiva llamada Basalto. A la derecha sección delgada de la roca, vista a través de microscopio petrográfico.

Fuente: <http://edafologia.ugr>.

Clasificación por grado de cristalinidad

El grado de cristalinidad está relacionado con la presencia de cristales y/o vidrio en una roca. El vidrio puede tener la misma composición química de un mineral, pero la diferencia radica en que el vidrio solidifica muy rápido y no adquiere una estructura cristalina. Los vidrios son muy comunes en las rocas extrusivas. Esta clasificación también es usada para todo tipo de rocas ígneas.

Holocristalina. Es el nombre que recibe una roca ígnea totalmente conformada por cristales. Generalmente las rocas ígneas intrusivas o plutónicas reciben esta clasificación.

Hialina. Es la roca que no posee cristales y está conformada totalmente por vidrio. Un ejemplo es la obsidiana, una roca volcánica de color oscuro translúcida con una composición mineralógica similar al granito.

Hipocristalina. Comprende el grupo de rocas ígneas que presentan cristales y vidrio en su conformación. Algunas rocas hipoabisales y extrusivas tienen esta característica.

Clasificación de acuerdo con la composición mineralógica

La clasificación mineralógica de las rocas ígneas es la más importante debido a que es su composición la que determina significativamente su comportamiento frente a esfuerzos y meteorización, factores que determinan los diseños de la obras. Existen diferentes métodos de clasificación teniendo en cuenta este parámetro.

En la composición mineralógica de las rocas ígneas los minerales se denominan esenciales y accesorios. Los minerales esenciales son los que determinan el nombre de la roca. Para evitar una gran cantidad de nombres debido a ligeras variaciones mineralógicas las rocas se han agrupado en familias.

En la tabla 1, se presenta una adaptación de un modelo de clasificación. Aparecen dos nombres en cada familia, lo cual no significa variación en el contenido mineralógico, sino en el lugar de solidificación, características texturales, grado de cristalinidad, etc. Los nombres a la izquierda corresponden a rocas intrusivas (I) y los de la derecha (E) a rocas extrusivas.

3.1.2 ROCAS ÍGNEAS EXTRUSIVAS O EFUSIVAS

Las rocas ígneas extrusivas son las rocas formadas por la solidificación de la lava, es decir, aquéllas que se originan por fuera de la corteza. Se dividen en piroclásticas y lávicas.

Aunque todos los materiales expulsados por los volcanes implican una amenaza para los seres vivos, el polvo y la ceniza son los más importantes. En el capítulo correspondiente a amenazas geológicas será ampliado este tema.

Tabla 1. Clasificación de las rocas ígneas de acuerdo a su contenido mineralógico

| | FAMILIAS | CUARZO | FELDES-PATOS | PLAGIO-CLASAS | ACCESORIOS | CARACTERÍSTICAS |
|--------------|---------------------------------------|---|-------------------|--|---|---|
| ÁCIDAS | (I) (E) GRANITO -RIOLITA OTRAS | > 10% | 2/3 ↓ <<1/3 | <<1/3 ↓ >>2/3 | Circón Pirita Moscovita Apatito Piroxenos | Rocas de color claro en las que predominan los silicatos |
| INTERMEDIAS | (I) (E) SIENITA -TRAQUITA OTRAS | <10% ó no se presenta | 2/3 ↓ <<1/3 | <<1/3 ↓ >>2/3 | Anfíboles Piroxenos | Los accesorios máficos son más abundantes, esto hace que las rocas sean menos claras. Los feldespatos tienden a ser sustituidos por feldespatoides |
| BÁSICAS | (I) (E) GABRO -BASALTO | Los minerales ferromagnesianos (Anfíboles y Piroxenos) son mayoría junto con el olivino | | En estas rocas la plagioclasa es cálcica >10% | | El color de las rocas es oscuro, los minerales máficos y el olivino son los esenciales |
| ULTRABÁSICAS | PERIDOTITAS | El mineral predominante es el olivino acompañado de minerales máficos | | La cantidad de plagioclasa cálcica es menor que el 10% | | El color de las rocas tiende a ser verdoso oscuro debido a la gran cantidad de olivino. Las kimberlitas y las dunitas son las rocas más conocidas de esta familia |

Fuente: Adaptado de Foundations of Earth Science.

Las rocas Piroclásticas

Estas rocas corresponden al material expulsado violentamente durante la erupción de un volcán; se clasifican teniendo en cuenta solo su tamaño.

Ceniza. Material cuyo tamaño es mayor de 0.25 mm y menor que 4.0 mm.

Lapilli. Material de tamaño mayor de 4.0 mm y menor que 32 mm

Bombas y bloques. Material de tamaño mayor a 32 mm.

Polvo volcánico. Partículas de tamaño menor a 0.25 mm.

El material piroclástico al depositarse en la superficie puede llegar a consolidarse y dar origen a rocas conocidas como Tobas (Fig. 7) La “piedra pómez” es una de las rocas piroclásticas más conocidas.

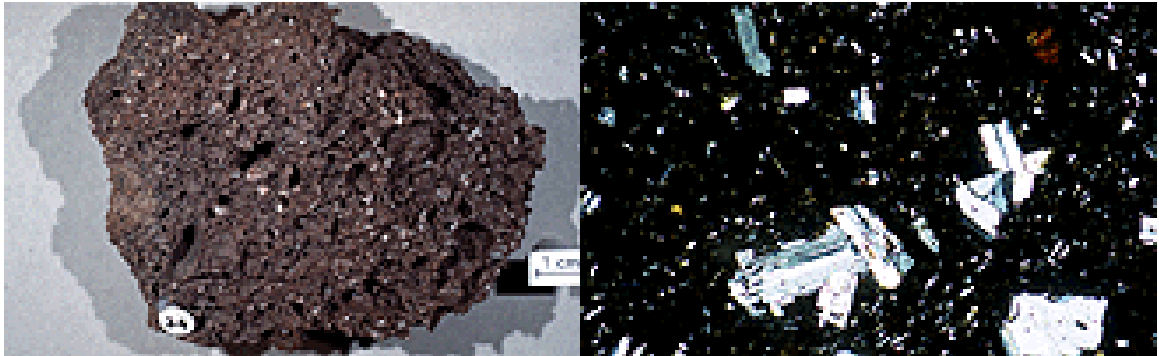


Figura 7. Toba. A la derecha sección delgada de la roca, vista a través de un microscopio petrográfico.

Fuente: <http://edafologia.ugr.es>

Las rocas Lávicas.

Las rocas lávicas son las rocas que se forman por solidificación del material que expulsan los volcanes y desciende lentamente por las laderas, o el que sale en las zonas divergentes formando el nuevo piso oceánico. La composición mineralógica de las rocas lávicas es similar a la de las intrusivas, pero la diferencia está en el tamaño de los cristales y en el grado de cristalinidad o cantidad de cristales y vidrio presente en las rocas.

3.2 ROCAS METAMORFICAS

El metamorfismo es un proceso por el cual rocas pre-existentes sufren cambios texturales y mineralógicos en estado sólido debido a factores como: la temperatura, la presión y los fluidos químicamente activos, que las convierten en rocas metamórficas.

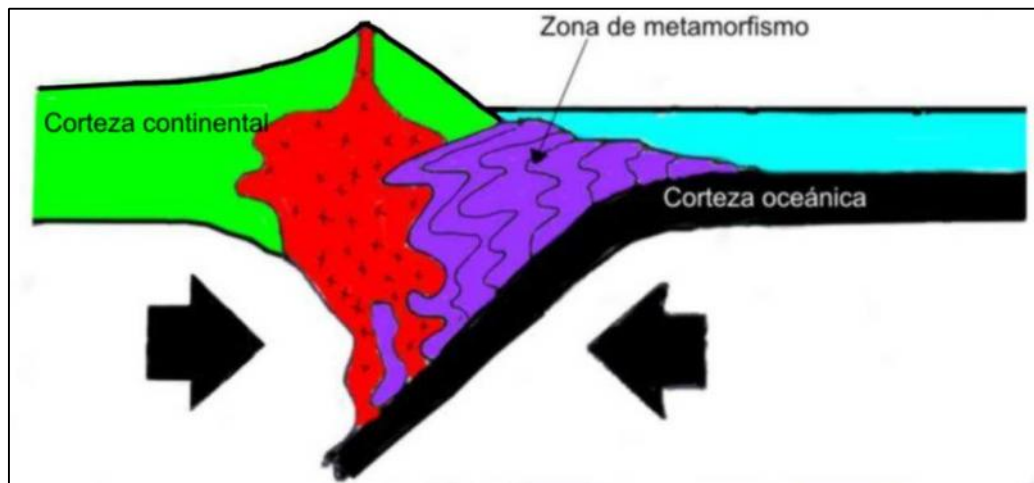
El metamorfismo se produce dentro de la corteza terrestre por debajo de la zona de intemperismo y cementación. El incremento de temperatura y presión debido al aumento en la profundidad es suficiente para iniciar un proceso de metamorfismo, también las presiones generadas por colisiones entre placas tectónicas son suficientes (Gráf. 14). Los fluidos químicamente activos son las soluciones líquidas o gaseosas que se mueven a través de las rocas.

3.3 TIPOS DE METAMORFISMO

Los tipos de metamorfismo son: metamorfismo de contacto, metamorfismo regional y existe un tercer tipo conocido como metamorfismo dinámico.

El metamorfismo regional se debe al aumento de profundidad o a esfuerzos laterales causados por el movimiento de placas tectónicas; este proceso es el que

más produce rocas metamórficas puesto que las zonas expuestas a estas condiciones son extensas.



Gráfica 14. Metamorfismo regional generado por colisión entre placas.

Fuente: Modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist.

El metamorfismo de contacto es el que se produce alrededor de las intrusiones ígneas, donde el efecto principal es causado por la temperatura y en menor grado por la presión (Fig. 8). El metamorfismo es más fuerte si soluciones y vapor remanentes del magma penetran la roca encajante.

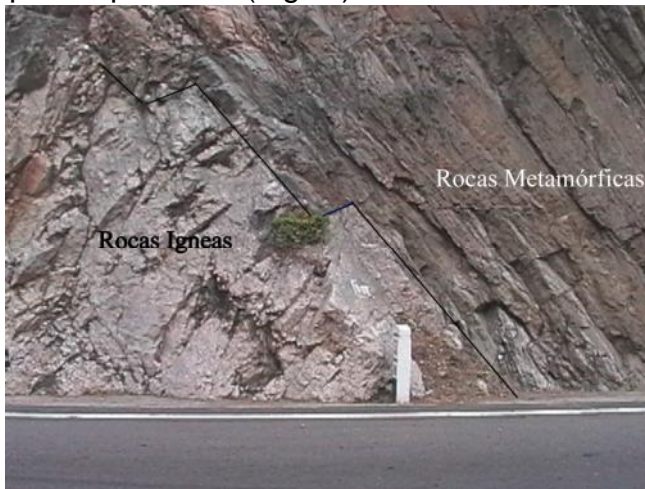


FIGURA 8. Contacto entre rocas ígneas y rocas metamórficas. Ubicado sobre la carretera Bucaramanga – San Gil cerca al puente sobre el río Chicamocha.

Fuente: Autor.

3.3 CLASIFICACION DE LAS ROCAS METAMORFICAS

En la clasificación de las rocas metamórficas, la textura tiene una importancia mayor a la composición mineralógica, especialmente en su aspecto relacionado con la disposición de las partículas (tabla 2).

Las rocas metamórficas se clasifican texturalmente como foliadas y no foliadas. Entre las rocas foliadas se encuentran las Pizarras, Esquistos y Gneiss (Fig. 9 y Fig. 10).



Figura 9. Esquisto.
Fuente: Autor.



Figura 10. Gneiss.
Fuente: Autor.

Tabla 2. Clasificación de las rocas metamórficas

| ROCA | TEXTURA | CARACTERISTICAS |
|-------------------|-------------------|---|
| PIZARRA | FOLIADA | Son rocas que presentan finas láminas muy parecido a un libro nuevo, provienen de rocas sedimentarias arcillosas. |
| ESQUISTO | | Este tipo de roca presenta capas y la unión entre éstas constituye una zona de debilidad como clivaje esquistoso. Proviene de diferentes clases de rocas. |
| GNEISS | | Los minerales en los gneiss se alinean formando bandas claras y oscuras |
| ANFIBOLITA | | También es bandeada pero su diferencia con el gneiss radica en su composición mineralógica |
| MARMOL | NO FOLIADA | Compuesta principalmente por carbonato de calcio y se diferencia de las calizas por el mayor tamaño de los cristales.- Proviene de rocas calcáreas |
| CUARCITA | | Roca de textura masiva compuesta principalmente de cuarzo. Proviene de areniscas cuarzosas |

Fuente: Autor

Las rocas metamórficas no foliadas más importantes son los Mármoles y las Cuarcitas (Figs 11 y 12), se caracterizan por ser compactas y generalmente en su composición química predomina un solo mineral. El Mármol está compuesto principalmente de carbonato de calcio y la cuarcita principalmente de cuarzo.

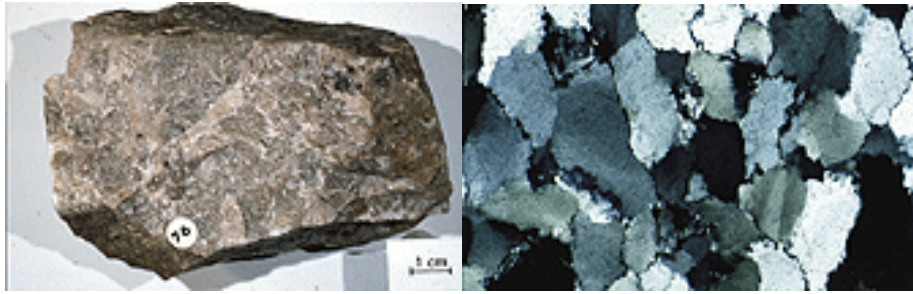


Figura 11. Cuarcita. A la derecha se observan, a través de un microscopio petrográfico, los cristales de cuarzo que conforman la roca. Fuente: <http://edafologia.ugr.es>

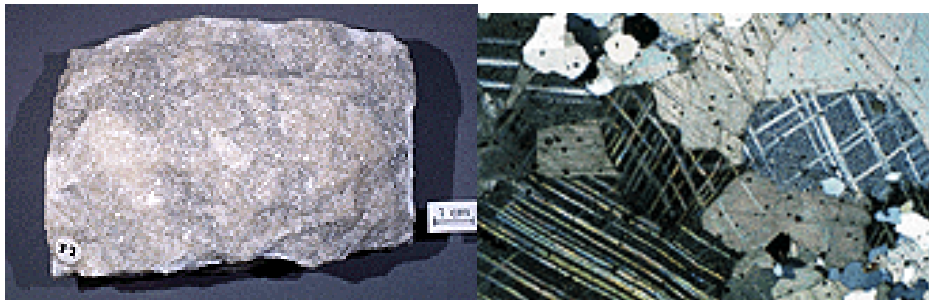


Figura 12. Mármol. A la derecha se observan, a través de un microscopio petrográfico, los cristales de calcita que conforman la roca. Fuente: <http://edafologia.ugr.es>

4. LA METEORIZACION

Las rocas y todos los materiales expuestos en la superficie de la tierra a la acción del agua, el viento, el hielo y la gravedad sufren un proceso de meteorización o intemperismo, el cual es un proceso continuo de desintegración y descomposición de las rocas en productos solubles e insolubles, algunos de los cuales se recombinan para formar minerales secundarios. Los productos de la meteorización pueden ser transportados por el agua, la gravedad, el viento y los glaciales, pero en algunos casos permanecen en sitio donde se formaron dando lugar a la formación de suelos.

La meteorización juega un importante papel en los deslizamientos y otros fenómenos de remoción en masa, en el deterioro de la roca de construcción y materiales de construcción, agregados de carreteras y en la duración de las obras civiles.

4.1 CLASES DE METEORIZACION

La meteorización se divide en dos clases dependiendo de los agentes que intervengan. Esta división no implica que actúen por separado:

4.1.1 METEORIZACIÓN MECÁNICA O FÍSICA

Es un proceso de desintegración que rompe la roca en fragmentos cada vez más pequeños haciendo que la superficie de exposición a la meteorización química sea mayor. Este proceso predomina en climas fríos y secos

- a. *Exfoliación o expansión diferencial.* Este proceso origina fracturas más o menos paralelas a la superficie de la roca, debido a la descompresión generada por la erosión de las rocas suprayacentes. (Fig. 13)
- b. *Expansión – Contracción.* Fracturamiento de la roca producido por cambios de temperaturas suficientemente rápidos y elevados.
- c. *Abrasión.* Fragmentación producida por choques entre partículas o fragmentos arrastrados por los agentes móviles.
- d. *Acción de las raíces.* Las raíces de las plantas actúan como cuñas que rompen lentamente las rocas. (Fig. 14)
- e. *Actividad de los seres vivos.* Los seres vivos producen un mezclado mecánico constante del suelo que hace a las partículas más susceptibles al intemperismo químico.

- f. *Acción de las heladas.* Este proceso requiere de fracturas preexistentes donde pueda penetrar el agua y acumularse. Al congelarse el agua, su volumen aumenta aproximadamente en un 9% y ejerce presión sobre las paredes de las fracturas, haciendo que ésta aumente su tamaño hasta romper completamente la roca. Cuando el agua se congela en los poros puede ocasionar la desintegración granular de la roca.



Figura 13. Exfoliación producida por pérdida del material suprayacente.

Fuente: Surface processes and Landforms.



Figura 14. Expansión de las fracturas de las rocas por acción de las raíces.

Fuente: Autor.

- e. *Crecimiento de cristales.* El crecimiento de cristales de sales a partir de soluciones o la expansión termal de éstas puede llegar a fracturar las rocas. La sal responsable de esta meteorización proviene del agua de mar, depósitos de sal en los desiertos, transportada como polvo y disuelta en lluvia.

4.1.2 METEORIZACIÓN QUÍMICA

Es un proceso de transformación del material original en un material totalmente diferente que ocurre porque las rocas rara vez están en equilibrio con la temperatura, presión y composición del agua de la superficie; predomina en los climas calientes y húmedos. Las rocas afectadas por la meteorización química generalmente presentan las siguientes características:

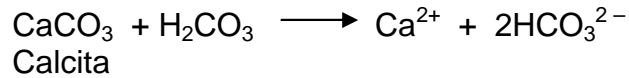
- Cambio de coloración debido a la oxidación de los minerales de hierro.
- Alteración de los minerales arcillosos originales o la presencia de nuevos.
- Presencia de óxidos de hierro o aluminio e hidróxidos recién formados.
- Los elementos químicos son más abundantes que en la roca original.

Procesos de la meteorización química

- a. *Hidratación.* Es el proceso de incorporación de moléculas de agua a la estructura molecular de un mineral.



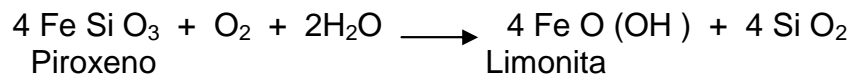
- b. *Carbonatación.* Es la reacción de los minerales al CO₂ disuelto en agua.



- c. *Hidrólisis.* Es la reacción y desintegración de las estructuras cristalinas de los minerales primarios por el ataque del ion hidrógeno del agua.



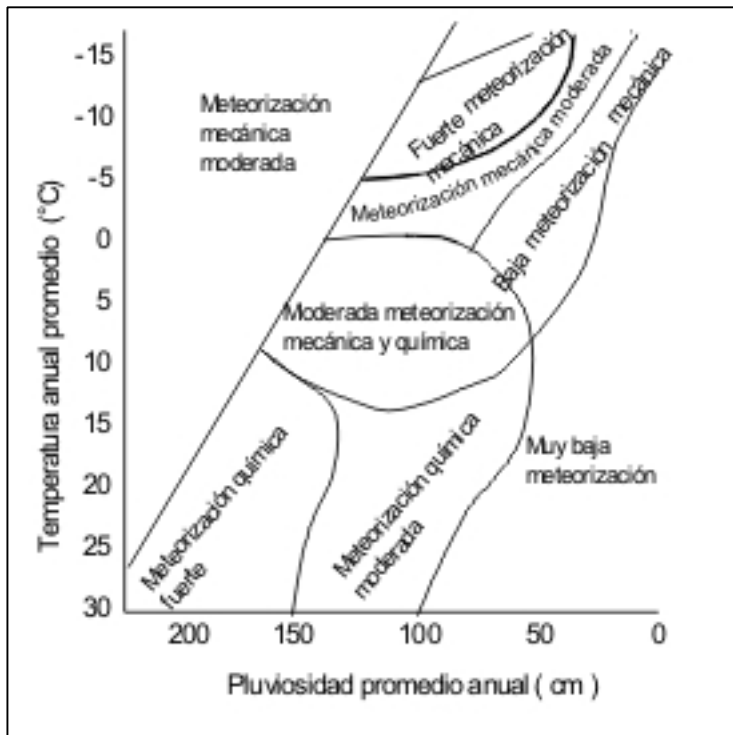
- d. *Oxidación.* Es la reacción de las rocas y materiales del suelo a altos suministros de oxígeno.



4.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA METEORIZACIÓN

La velocidad y profundidad de la meteorización dependen de la naturaleza de los materiales, el clima, la humedad, las plantas, los animales y el relieve.

- a. *La naturaleza o composición mineralógica de los materiales.* Este factor determina la resistencia a la meteorización. Los materiales más resistentes son aquellos compuestos por cuarzo y minerales arcillosos.
- b. *El clima.* Especialmente sus parámetros temperatura y humedad inciden directamente en la meteorización. Los feldspatos y la calcita son fuertemente intemperizados en climas húmedos. (gráf. 15).
- c. *Los animales y las plantas.* En sus procesos vitales producen dióxido de oxígeno, oxígeno y ciertos ácidos. Las plantas en sus raíces tienen carga negativa y están rodeadas de iones de hidrógeno que al entrar en contacto con la ortoclasa pueden cambiar de lugar con el potasio y romper su estructura cristalina.
- d. *El relieve.* Es un factor que controla el clima en una alta proporción y además determina el balance entre meteorización y erosión. Si el relieve es muy inclinado el material superficial meteorizado puede ser fácilmente removido dejando al descubierto material más profundo.

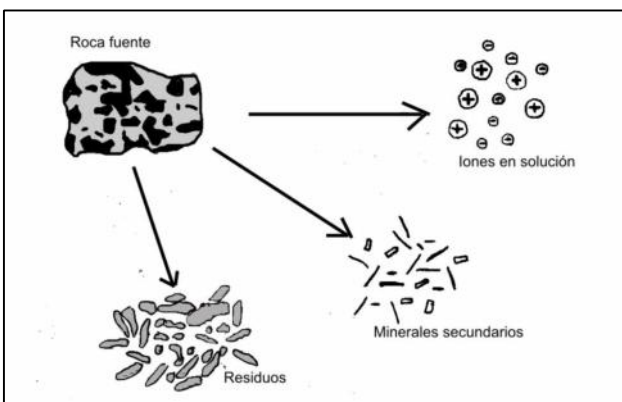


Gráfica 15. Influencia del clima sobre los procesos de meteorización.
Fuente: modificada de Geology for Engineers and environmental Scientist.

4.3 PRODUCTOS DE LA METEORIZACIÓN

Los productos de la meteorización son fragmentos de rocas o de minerales, minerales secundarios e iones en solución. Los fragmentos generalmente están compuestos de minerales resistentes a la meteorización. Los minerales secundarios más comunes son: minerales arcillosos e hidróxidos de hierro y aluminio. (Gráf. 16).

Los minerales arcillosos más comunes son silicatos hidratados de aluminio, hierro y magnesio ordenados en diferentes combinaciones de capas llamados capas de silicato o filosilicatos (montmorillonita, illita, kaolinita, vermiculita, halloysita y la clorita).



Los hidróxidos de aluminio más comunes son la bohemita y la gibsita, para su formación se requieren lixiviados ricos en SiO_2 .

Gráfica 16. Productos de la meteorización.
Fuente: Earth Systems Processes and Issues.

La gohetita es el mineral de hierro más común y se presenta en suelos bien drenados con un color café amarillento. La lepidocrita forma bandas y motas anaranjadas en suelos no calcáreos y ricos en arcilla, formados en condiciones anaeróbicas.

La hematita da el color rojizo a suelos antiguos y a suelos formados bajo condiciones de alta temperatura.

4.4 LA METEORIZACIÓN Y LAS OBRAS CIVILES

Las obras civiles, especialmente puentes y represas, son atacadas por la meteorización química que compromete su resistencia y durabilidad, poniendo en peligro vidas humanas, propiedades y el medio ambiente. También la economía de la región afectada por la destrucción o inutilización de la obra, sufre las consecuencias y éstas se notan rápida y directamente en el desarrollo social.

La carbonatación del concreto y la corrosión del refuerzo metálico producen un deterioro estructural. Debido al contenido de Ca(OH)_2 que se origina durante la hidratación del cemento, el concreto eleva la alcalinidad a valores de pH mayores de 13, creando un medio excelente para proteger el acero de la corrosión, formando una película de óxido de hierro en la superficie del metal.

La carbonatación es causada por el dióxido de carbono (CO_2) presente en el aire. El CO_2 reacciona con el Ca(OH)_2 de la pasta del cemento, haciendo descender a un valor crítico la alcalinidad. El valor del pH decrece alrededor de 9, lo cual es insuficiente para proteger el refuerzo contra la corrosión, entonces la película de óxido se quiebra.

La velocidad de carbonatación de la pasta de cemento depende de la permeabilidad, contenido de humedad, contenido de CO_2 en el aire, la humedad relativa en el medio ambiente y la cantidad inicial del concreto endurecido. La carbonatación neutraliza la naturaleza alcalina de la pasta del cemento hidratado y más fácilmente pueden ingresar la humedad y el oxígeno.

La humedad relativa del medio ambiente tiene influencia en el proceso de carbonatación. El agua bloquea los poros impidiendo la difusión del CO_2 , pero al mismo tiempo proporciona un medio para la reacción entre el CO_2 , el Ca(OH)_2 y el CaCO_3 . Por tanto existe un valor crítico de humedad relativa que origina máxima carbonatación.

4.5 PERFILES DE METEORIZACION

El perfil de meteorización es la secuencia de capas de materiales con diferentes propiedades físicas formadas en el mismo sitio donde se les encuentra y la cual yace sobre roca no meteorizada. Los rasgos estructurales y la litología de las

masas rocosas influyen decisivamente en la forma de la meteorización. El perfil se forma por meteorización mecánica y/o química.

Los perfiles pueden variar de un lugar a otro debido a: variaciones locales en el tipo y estructura de la roca, la topografía, la velocidad de erosión y las condiciones de aguas subterráneas y debidas también a las variaciones climáticas regionales particularmente en la pluviosidad.

4.5.1 PERFILES TÍPICOS DE METEORIZACIÓN PARA ROCAS METAMÓRFICAS E ÍGNEAS INTRUSIVAS

Los perfiles de meteorización comprenden la división en capas que presenta la corteza terrestre en la superficie, estas capas se pueden ver realizando perforaciones o a través de pozos hechos manualmente con una forma cuadrada y una profundidad que depende del nivel freático, del espesor del suelo y del grado de meteorización de las rocas. En el caso de las rocas ígneas intrusivas y metamórficas un perfil se puede dividir en: suelo residual, roca meteorizada y roca fresca o no meteorizada. (Gráf. 17)

Suelo residual (I)

Horizonte A o zona IA. Es el horizonte superficial definido como zona de eluviación o zona empobrecida por la infiltración de agua que transporta hacia abajo materiales en solución o suspensión. Es rico en materia orgánica y su textura es arenosa.

Horizonte B o zona IB. Es la zona donde se depositan los minerales que han sido transportados del horizonte A, es de color oscuro y rico en minerales tamaño arcilla. La eluviación lo ha despojado de sus constituyentes solubles. No existen estructuras originales de la masa rocosa y muy poca indicación de material materno. En algunos casos puede ser rico en aluminio, silicio y hierro.

Horizonte C o zona IC. En este horizonte aparecen las estructuras originales de la roca. Las estructuras heredadas de la roca incluyen diaclasas, fallas y minerales, que conservan su orientación original. Los feldspatos son convertidos en minerales arcillosos y las micas son parcialmente degradadas y alteradas, y la mayoría de minerales excepto el cuarzo están alterados. El material tiene la apariencia de roca dura pero tiene consistencia de suelo. El horizonte C es conocido como *saprolito*.

Roca meteorizada (II)


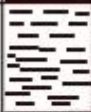




Se divide en 2 capas:

La zona de transición o zona IIA. Es la transición de saprolito a roca meteorizada. Existen núcleos de roca y materiales tipificados como suelo, los núcleos de roca se encuentran rodeados de suelo de textura arenosa mediana o gruesa. Es una zona muy permeable.

Roca parcialmente meteorizada o zona IIB. La roca presenta una notable decoloración y algo de alteración a lo largo de las diaclasas. Los feldespatos y micas muestran una alteración avanzada. La permeabilidad de la roca es mayor comparada con la de la roca fresca.

Roca no meteorizada (III)

Las diaclasas exhiben poca o ninguna oxidación que pueda ser atribuida a procesos de meteorización. Los feldespatos se presentan inalterados.

| | | | |
|------------------|-----|---|--|
| SUELO RESIDUAL | IA |  | Horizonte generalmente rico en materia orgánica y a menudo desarrolla texturas arenosas |
| | IB |  | Horizonte rico en minerales tamaño arcilla sin componentes solubles originales. No presenta alguna indicación del material parental. |
| | IC |  | Horizonte conocido como saprolito, presenta evidencias de estructuras originales del material parental. Tiene en algunos casos apariencia de roca pero su dureza es de suelo. |
| ROCA METEORIZADA | IIA |  | Esta es la zona de transición del suelo a la roca meteorizada. Se caracteriza por la presencia de materiales tipificados como suelos y otros como roca. |
| | IIB |  | La roca se encuentra parcialmente meteorizada, presentando una notable decoloración y los feldespatos y micas ya han comenzado a meteorizarse. La permeabilidad es mayor que la de la roca no meteorizada. |
| ROCA FRESCA | III |  | En esta zona la roca no presenta ningún signo de meteorización como decoloración, alteración de minerales u oxidación |

Gráfica 17. Perfil de meteorización para rocas ígneas y metamórficas.

Fuente: Modificada de Cuarto Congreso Panamericano sobre Estabilidad de Taludes

5. ROCAS SEDIMENTARIAS

5.1 ORIGEN

El origen de las rocas sedimentarias se inicia con los procesos de meteorización, erosión y transporte de los sedimentos provenientes de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias preexistentes. El cambio de partículas a rocas es un proceso llamado litificación, el cual es un proceso químico que reduce la porosidad original. En términos geológicos, la conversión de sedimentos en roca sólida se ha resumido en la frase “las calizas son recristalizadas, las areniscas son cementadas y los shales son compactados”.²

La pérdida de porosidad con el incremento de la profundidad es más un proceso químico que compresión mecánica.

5.1.1 LITIFICACIÓN

La litificación es el proceso que convierte un depósito de sedimentos en roca; se divide en compactación y cementación.

a. La compactación. Consiste en la reducción del espacio poroso en un cuerpo de sedimentos debido a la presión generada por el peso del material suprayacente o por deformación estructural. La reducción del espacio poroso reduce el volumen y obliga a la expulsión de sus aguas intersticiales.

Los sedimentos de carbonatados responden al sepultamiento más por un mecanismo de solución-precipitación que a un reajuste físico o trituración de partículas, esto se deduce a partir de los estudios de caliza antigua que demuestran que las partículas incluidas de tamaño limo no han sido deformadas.

En las areniscas los factores que influyen en la compactación son: la forma y el calibrado de las partículas y la profundidad del sepultamiento. Las partículas angulares y mal calibradas son más compresibles que las calibradas y bien redondeadas.

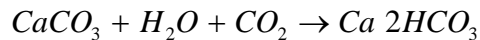
La compactación también puede ocurrir donde la roca especialmente caliza o roca de sal en contacto con agua es disuelta como resultado del aumento de la solubilidad producido por aumento de la presión. Este proceso es conocido como solución de presión.

En los shales la pérdida de la porosidad debida al aumento de la profundidad es en gran parte un proceso químico que involucra la precipitación de cemento.

² Leet and Judson en Fundamentos de geología física

b. *Cementación*. Es un proceso químico que consiste en la precipitación de sustancias cementantes en los poros de las rocas.

Cementación por calcita: en las calizas formadas por la acumulación de organismos como son los arrecifes, el carbonato de calcio es secretado por estos. Los corales secretan aragonito y las algas coralinas secretan calcita de alto magnesio. La cementación de las calizas orgánicas puede suceder en presencia de agua dulce o salada. El agua dulce generalmente es levemente ácida, por lo tanto disuelve el aragonito y forma bicarbonato de calcio de acuerdo a la ecuación:



A medida que el aragonito es disuelto, la solución se hace saturada y cuando el pH se eleva a 8, se detiene la disolución y comienza la precipitación de la calcita como un cemento entre las partículas.

En ambientes marinos la precipitación de la calcita como cemento se debe a procesos orgánicos de algas que elevan el pH, cuando el CO₂ producido por oxidación bacteriana se combina con iones de calcio presentes en el agua.

Cementación por sílice: La sílice puede cementar areniscas sobre o cerca de la superficie como también en la subsuperficie. Cerca de la superficie la sílice puede precipitar por evaporación de soluciones de sílice, evaporación o precipitación de aguas ricas en sílice. En la subsuperficie, el cemento de sílice tiende a crecer hacia fuera desde cada partícula, lo cual es conocido como sobrecrecimiento autigénico.

5.2 TEXTURA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

La textura contempla tamaño, forma y disposición de las partículas que constituyen la roca. Los elementos texturales de las rocas sedimentarias son:

- a. El armazón o fábrica. El armazón de la roca lo constituyen las partículas que soportan la roca (las más abundantes) y determinan si la roca es granosoportada, lodosoportada o intermedia. En las rocas granosoportadas se encuentran las arenosoportadas, gravosoportadas y biosoportadas (cuando las partículas son fósiles). En las lodosoportadas se encuentran las limosoportadas y las arcillosoportadas.
- b. La matriz. Está constituida por el material de menor tamaño que se concentra en los intersticios dejados por el armazón; de acuerdo al tamaño de las partículas la matriz puede ser arenolodosa, lodosa (arcillosa y/o limosa) y gravoarenolodosa.

- c. El cemento. Es el material precipitado químicamente en los intersticios dejados por el armazón puede ser calcáreo, silíceo o ferruginoso.

5.3 COMPOSICIÓN DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

Las rocas sedimentarias están compuestas de fragmentos de minerales y de rocas preexistentes. Los componentes principales son:

- a. *Cuarzo*. Compuesto de sílice y oxígeno (SiO_2), muy resistente a la meteorización y sus colores más comunes son gris, blanco y crema. Los granos de cuarzo menudo presentan una orientación paralela a la estratificación.
- b. *Fragmentos de rocas metamórficas*. Generalmente son partículas detríticas de mármol, esquistos o gneiss.
- c. *Minerales arcillosos*. Algunos ejemplos son montmorillonita, illita, caolín, etc.
- d. *Feldespatos y plagioclasas*. Son menos resistentes a la abrasión que el cuarzo, por lo cual las partículas son redondeadas.
- e. *Micas*. Se presentan las dos variedades, moscovita y biotita. Por su baja dureza y buen clivaje, la mica es difícil de redondear y fracturar por lo tanto se encuentra en forma aplanada.
- f. *Carbonatos*. Entre los principales carbonatos se encuentran la calcita, dolomita, siderita y ankerita.
- g. *Fragmentos de rocas sedimentarias*. Son muy comunes en los conglomerados, pero algunas areniscas también pueden contener fragmentos de limolitas, shales, calizas o areniscas de grano fino.
- h. *Minerales accesorios*. Estos minerales pueden ser, magnetita e ilmenita, pirita, zircón, turmalina, rutilo, apatito, hornblenda, etc.

5.4 CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

De acuerdo al origen de sus componentes principales, las rocas sedimentarias se clasifican en:

- a. *Rocas de carbonato*.
- b. *Rocas autógenas*.
- c. *Rocas carbonáceas*.
- d. *Rocas terrígenas*.

e. *Rocas piroclásticas.*

Estas cinco clases de rocas además de su origen difieren en composición mineral y química.

5.4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS DE CARBONATO

Las rocas de carbonato son aquellas que contienen más del 50% de minerales de carbonato, se dividen en calizas y dolomitas. Los constituyentes básicos de la mayoría de calizas son partículas tamaño arena. El espacio entre esas partículas es ocupado por:

- a. Una matriz lodolimsa, cuyo equivalente litificado es conocido como micrita.
- b. Un cemento de calcita o esparita.

Según Folk, las partículas reciben los siguientes nombres: intraclastos, oolitos, esqueletos completos o fragmentos de fósiles y pellets.

Las dolomias son las rocas de carbonato compuestas de mineral dolomita.

5.4.2 CLASIFICACIÓN Y NOMBRES DE LAS ROCAS AUTÍGENAS

Las rocas autígenas son química y mineralógicamente muy diversas y solo tienen en común su origen autigénico. Las más importantes son:

- Chert.
- Evaporitas.
- Rocas fosfatos.
- Rocas de magnesio.
- Minerales sedimentarios de hierro.

El chert es una roca dura y quebradiza que consta casi exclusivamente de sílice. Las variedades de chert incluyen jaspe, pedernal, porcelanita y calcedonia.

Las evaporitas son rocas originadas por evaporación. Las más comunes son los sulfatos y la halita (roca de sal). Los sulfatos son el yeso y la anhidrita.

Las rocas fosfatos o fosforita están compuestas por el mineral apatito. En depósitos antiguos, la roca fosfato puede presentarse como fragmentos de hueso, pellets (de origen fecal), ooides, pisolitos conchas fosfatizadas.

Los minerales sedimentarios de hierro son rocas sedimentarias ricas en hierro, se clasifican en:

- Depósitos pantanosos de hierro cuyo óxido más común es la gohetita.
- Rocas de hierro, el óxido más común es la hematita.

- Formaciones de hierro; los óxidos que la constituyen son la magnetita, hematita y siderita.

Las rocas de magnesio se presentan principalmente en forma de nódulos.

5.4.3 CLASIFICACIÓN Y NOMBRES DE LAS ROCAS CARBONOSAS

Las rocas carbonosas, principalmente el carbón mineral han sido clasificadas de dos maneras:

- a. Por grado (contenido de carbono y poder calorífico).
- b. Por características petrográficas.

De acuerdo al grado las clases de carbón son:

- Lignito: su contenido de carbono es bajo.
- Carbón sub-bituminoso.
- Carbón bituminoso.
- Antracita: contiene más del 95% de carbono.

Por sus características petrográficas se clasifican en:

- Vitrain: carbón de color vivo, brillante, con fractura concoidal.
- Durain: carbón opaco, sin brillo, de apariencia terrosa.
- Clarain: carbón con superficie lisa y se rompe formando ángulo recto con la estratificación.
- Fusain: madera carbonizada, mancha las manos al tacto.

5.4.4 CLASIFICACIÓN Y NOMBRES DE LAS ROCAS TERRÍGENAS

La base para la clasificación de las rocas terrígenas es el tamaño de las partículas que las componen.

Las partículas que conforman las rocas terrígenas determinan su nombre:

- Shales.
- Areniscas.
- Conglomerados y brechas sedimentarias.

Shale es el término utilizado para roca de grano fino (tamaño limo y arcilla) físil. Los términos lodolita, arcillolita y argillita se emplean para shales que carecen de fisilidad. El término físil se refiere a una serie de fracturas de la roca que le dan una apariencia cuarteada.

Tabla 3. Clasificación de partículas de acuerdo al tamaño.

| CLASIFICACIÓN DE WENTWORTH PARA ROCAS SEDIMENTARIAS | | | CLASIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA ASTM-2487 | | |
|---|------------|--------------------------------------|--|--------|--------------------|
| NOMBRE | | TAMAÑO | NOMBRE | TAMAÑO | |
| GRAVAS | Cantos | > 256 mm | BLOQUES | | |
| | Guijarros | 64 mm – 256 mm | CANTOS | | |
| | Guijos | 4 mm – 64 mm | GRAVA | Gruesa | 19.05 mm - 76.2 mm |
| | Gránulos | 2 mm – 4 mm | | Fina | 4.76 mm - 19.05 mm |
| ARENAS | Muy gruesa | 1 mm – 2 mm | ARENA | Gruesa | 2 mm - 4.76 mm |
| | Gruesa | 0.5 mm – 1 mm | | Media | 0.42 mm - 2 mm |
| | Media | 3 mm – 0.5 mm | | Fina | 0.074 mm – 0.42 mm |
| | Fina | $\frac{1}{8}$ mm - $\frac{1}{4}$ mm | | | |
| | Muy fina | $\frac{1}{16}$ mm - $\frac{1}{8}$ mm | | | |
| LIMOS | | 0.0039 mm - 9 mm | LIMOS | | |
| ARCILLAS | | < 0.0039 mm | ARCILLAS | | |
| | | | 0.002 mm - 0.074 mm | | |
| | | | < 0.002 mm | | |

Fuente: Autor

Las areniscas son rocas sedimentarias en las cuales predominan partículas de tamaño arena. (Fig. 15)

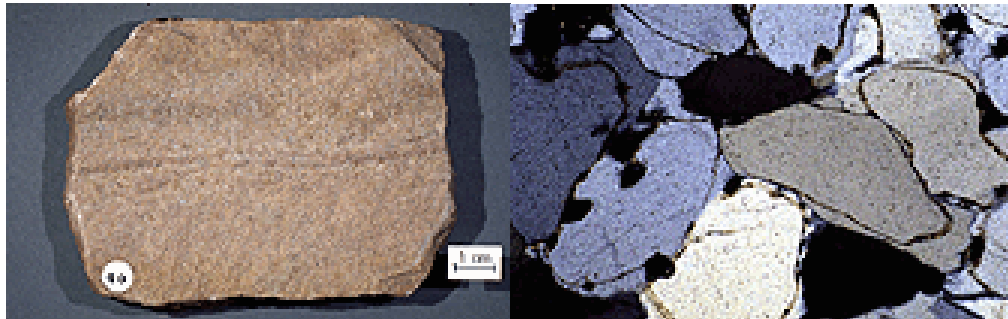


Figura 15. Arenisca. A la derecha se observan, a través de un microscopio petrográfico, los granos que componen la roca.

Fuente: <http://edafologia.ugr.es>

Los conglomerados y brechas son rocas sedimentarias donde predominan partículas de tamaño grava. Los conglomerados están conformados por partículas redondas y las brechas o aglomerados por partículas angulosas. Las morrenas son brechas de origen glaciárico.

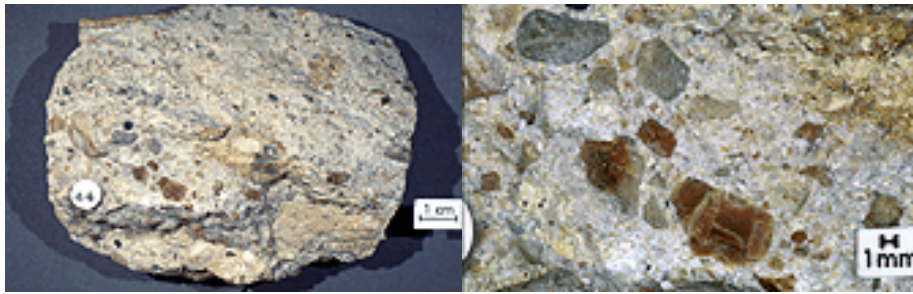


Figura 16. Conglomerado. A la derecha, un acercamiento de la foto permite observar más claramente el tamaño de los granos. Fuente: <http://edafologia.ugr.es>

5.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

Las rocas sedimentarias presentan una serie de características que permiten diferenciarlas fácilmente de los otros tipos de rocas y en algunos casos, determinar su composición, origen y ambiente formación. Estas características son: estratificación, grietas de desecación, rizaduras, nódulos, concreciones, geodas y los fósiles.

Estratificación. Las capas o estratos de rocas sedimentarias están separadas por planos de estratificación. (fig. 17)

Grietas de desecación. Esta es una característica propia de rocas con alto contenido de minerales arcillosos. Los sedimentos pierden agua durante su depositación y se encogen formando grietas que se conservan durante el proceso de litificación, generalmente estas grietas son rellenadas por material de las rocas suprayacentes.



Figura 17. Planos de estratificación, uno aparece señalado. Carretera San Gil – Socorro. Santander.
Fuente: Autor.

Rizaduras. Son pequeñas ondas formadas por el oleaje o por el aire.

Nódulos. Son cuerpos irregulares que se encuentran en las rocas sedimentarias y su composición difiere del material de la roca.

Concreción. Es una concentración local, dentro de una roca sedimentaria, de material cementante. Permite determinar el ambiente de formación.

Geodas. Son estructuras más o menos esféricas que interiormente presentan cristales que se proyectan hacia el centro.



Fósiles. Son restos de animales y plantas que han sufrido el proceso de fosilización. Esta característica permite determinar el origen, ambiente de formación y en algunos casos la edad de la roca (fig. 18)

Figura 18. Amonita, fósil muy común en rocas del periodo Cretáceo. Encontrado en el municipio de Guane, Santander.

Fuente: Autor.

6. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Es la rama de la geología que estudia la respuesta de los diversos tipos de rocas a los esfuerzos deformantes y las estructuras resultantes de la deformación, éstas estructuras son los pliegues, fallas, foliaciones, lineamientos y diaclasas cuyas características físicas dependen principalmente de la composición química y mineralogía de las rocas y del ambiente químico y físico donde se produce la deformación.

La geología estructural también establece la historia de los desplazamientos, deformaciones y esfuerzos, las velocidades de deformación, temperaturas y presiones sufridas por la corteza y la parte superior del manto (litosfera) asociado a ella.

Desde el punto de vista de la ingeniería ambiental, la geología estructural es de gran importancia debido a que las estructuras determinan, en gran medida, el comportamiento de la superficie terrestre. Durante los terremotos, la presencia de fallas, foliaciones o zonas fuertemente diaclasadas aumentan de manera significativa los daños sobre obras de infraestructura o viviendas.

6.1 RESPUESTA DE LAS ROCAS A LOS ESFUERZOS

La respuesta de un material geológico al esfuerzo varía de acuerdo a las propiedades mecánicas. Un material mecánicamente homogéneo es aquel cuyas muestras tiene todas idénticas propiedades mecánicas; si las propiedades varían en cada una de las muestras el material no es homogéneo.

La respuesta de los materiales se puede clasificar como elástica y plástica. La respuesta elástica es aquella donde el material responde instantáneamente al aplicarse o eliminarse la carga deformante (esfuerzo), es decir se deforma al aplicarse el esfuerzo y recupera su forma al suspenderse este. Cuando el material demora en recuperar su forma se considera inelástico, este comportamiento es de gran importancia en muchos problemas de mecánica de rocas asociados a los materiales, construcción de túneles y explotación de canteras.

En el caso de la respuesta plástica el material no recupera su forma original después de que el esfuerzo alcanza un valor llamado crítico. Es importante anotar que los comportamientos anteriormente mencionados suceden cuando existen grandes presiones. En el laboratorio o a presión atmosférica las rocas tienden a romperse al aplicarse un esfuerzo (comportamiento frágil).

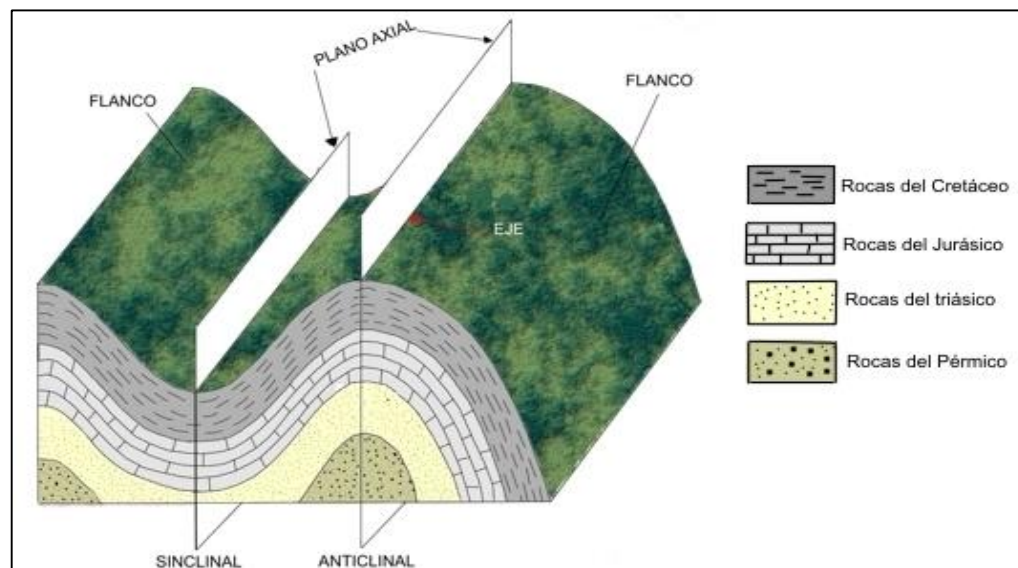
Los esfuerzos resultantes del movimiento de las placas tectónicas generan tres tipos de estructuras de gran importancia en la geología y en todas las actividades relacionadas con la corteza terrestre, puesto que determinan en alto grado la

forma y la respuesta de la superficie a los procesos naturales o a las actividades antrópicas. Estas estructuras son: pliegues, diaclasas y fallas.

6.2 PLIEGUES

Un pliegue es una estructura de superficie curva, producto de la deformación dúctil de las rocas sedimentarias. Los pliegues se clasifican estratigráficamente como anticlinales y sinclinales; en el primero las rocas más jóvenes se encuentran en la zona convexa y en los sinclinales las rocas más jóvenes se encuentran en la zona cóncava (Gráf. 18).

Los pliegues son excelentes trampas para hidrocarburos, especialmente cuando presentan capas intercaladas de materiales impermeables y permeables. Las capas impermeables son rocas arcillosas que evitan que los hidrocarburos escapen hacia arriba en busca de zonas de más baja presión.



Gráfica 18. Sinclinal y Anticlinal.

Fuente: Modificado de Fundamentos de Geología.

Los pliegues forman zonas montañosas y en algunos casos pueden dar lugar a las llamadas pendientes estructurales o laderas donde la pendiente del terreno es igual a la inclinación de los estratos. Desde el punto de vista ambiental estas zonas representan mayores riesgos de deslizamientos, que dan lugar a superficies totalmente desprovistas de suelo e imposibles de recuperar a corto o mediano plazo. La figura 19, muestra parte de un anticlinal.



Figura 19. Anticlinal ubicado en el municipio de Sáchica, Boyacá.

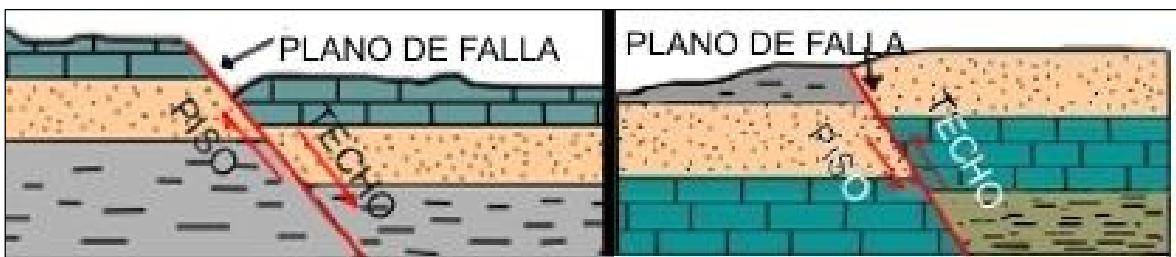
Fuente: Autor.

6.3 FALLAS

Las fallas son fracturas donde un bloque se ha desplazado con relación al otro. El desplazamiento puede ser horizontal, vertical o la combinación de ambos movimientos. Son de gran importancia en la exploración geológica debido al gran fracturamiento que generan y donde es posible que algunos minerales filonianos como el oro hayan precipitado. Causan graves problemas en las obras civiles y son generadores de movimientos sísmicos.

6.3.1 CLASIFICACIÓN DE FALLAS

Las clasificaciones de las fallas se realizan con base en la dirección del movimiento relativo de los bloques. El plano de fractura (una pendiente positiva en un bloque) recibe el nombre de piso y una pendiente negativa o contrapendiente en el otro bloque, se denomina techo. Si el techo desciende con relación al piso la falla se denomina normal (Gráf. 19) si sucede lo contrario la falla recibe el nombre de inversa (Gráf. 20). Un ejemplo de esta última es la falla de La Salina que recorre gran parte del departamento de Santander y en el municipio de San Vicente constituye el límite entre la zona montañosa y la zona plana.



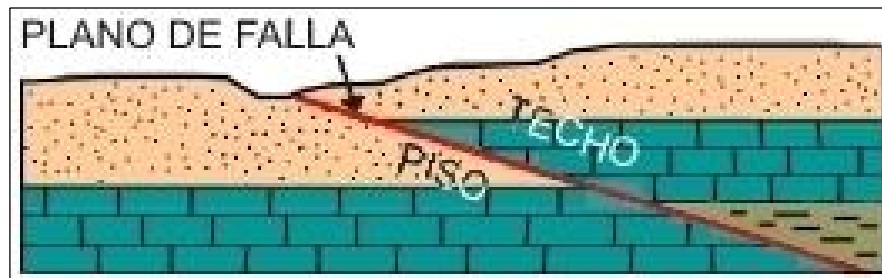
Gráfica 19. Falla Normal.

Fuente: Autor.

Gráfica 20. Falla inversa.

Fuente: Autor.

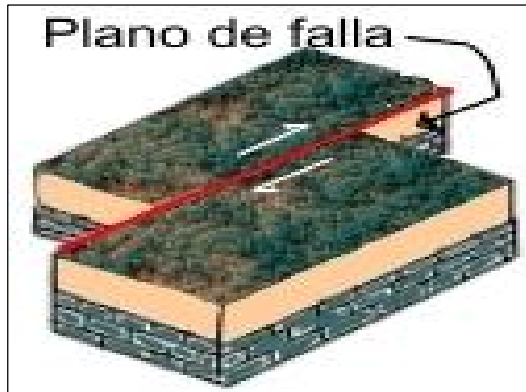
En el caso de las fallas inversas cuando son de bajo ángulo el techo tiende a pasar por encima del piso dando lugar a una falla de cabalgamiento (Gráf. 21).



Gráfica 21. Falla de Cabalgamiento.

Fuente: Autor.

Las fallas en las cuales el movimiento de los bloques es predominantemente horizontal se denominan fallas de rumbo o fallas transcurrentes (Gráf. 22). Un ejemplo a nivel regional, es la falla de Bucaramanga con un movimiento horizontal de unos 150 Km y un movimiento vertical de aproximadamente 3 Km. A nivel continental es la falla de San Andrés.



Gráfica 22. Falla de Rumbo o Transcurrente.

Fuente: Autor.

6.3.2 HORTS Y GRABENS

Los horts y los grabens son estructuras formadas por complejos sistemas de fallas. Los horts son bloques solevados que a sus lados presentan fallas normales donde los bloques adyacentes han descendido.

Los grabens consisten en una depresión debida a que un bloque rodeado de fallas normales descendió con respecto a los bloques ubicados a sus lados. Un ejemplo de graben en Colombia es el valle del río Magdalena. Cuando el graben es muy profundo y corresponde a una zona divergente recibe el nombre de Rift; un ejemplo muy conocido es el mar Rojo ubicado entre África y la península Arábiga.

El ambiente tectónico del mar Rojo es idéntico al de una dorsal oceánica, allí se observan: flujos hidrotermales, activa sismicidad, patrones anómalos de magnetismo simétricos, alta gravedad y algunas dorsales basálticas.

6.3.4 CRITERIOS PARA UBICAR FALLAS EN CAMPO

Los criterios para ubicar fallas se dividen en litológicos, geomorfológicos y estructurales.

Entre los criterios litológicos se tiene el gouge que consiste en un material arcilloso presente en el plano de falla, la brecha o material grueso y angular entre una matriz de material más fino. Otro material presente en los planos de falla son las milonitas o rocas con gran cantidad de microfracturas.

Los criterios litológicos son: alineamiento de corrientes, sillas, escarpes de falla y facetas triangulares.

Los criterios estructurales son: cambios de actitud en los estratos, trocamiento de capas, truncamiento de las estructuras (Fig. 20), presencia de zonas fuertemente fracturadas y de espejos de falla.

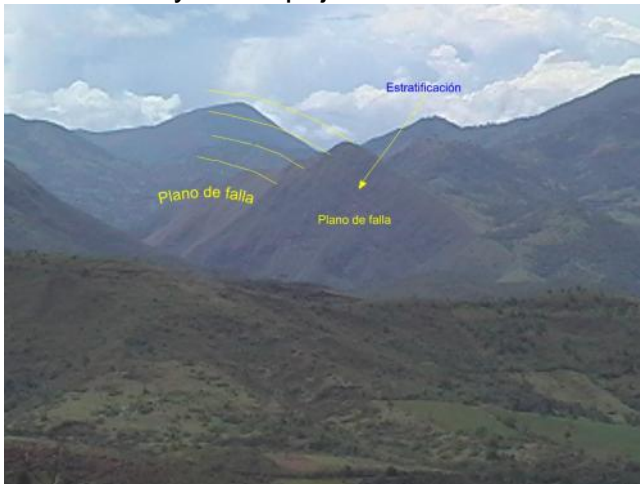


Figura 20. Anticlinal truncado. Las líneas muestran parte del resto de la estructura.

Fuente: Autor.

6.4 DIACLASAS

Las diaclasas son fracturas en las rocas en las cuales los bloques no se han movido de manera significativa. Estas fracturas pueden ser originadas por esfuerzos de compresión, de tensión y cortantes y se les conoce como diaclasas tectónicas (Fig. 21); pero si son originadas por pérdida de agua, de temperatura o de presión se les conoce como no tectónicas.

6.4.1 DIACLASAS TECTÓNICAS

El esfuerzo que originó la diaclasa tectónica puede ser determinado a partir de ciertas características que presentan éstas. Las diaclasas rectas y cerradas generalmente son producto de esfuerzos compresionales; las que presentan los bloques separados y en algunos casos rellenas con algún mineral son originadas

por esfuerzos de tensión y las que presentan un trazo curvilíneo o serpentiforme son producto de esfuerzos cortantes.

6.4.2 DIACLASAS NO TECTÓNICAS

Las diaclasas no tectónicas se producen por contracción o por descompresión. En el caso de la contracción por pérdida de agua o de calor no se tienen en cuenta las grietas que se presentan en materiales arcillosos, es decir se considera diaclasa solo a la fractura que se presenta cuando materiales no arcillosos se contraen. Las diaclasas producto de la descompresión están fuertemente relacionadas con obras civiles como túneles, carreteras, represas y otras actividades como la minería y construcción. La descompresión no solamente produce nuevas fracturas sino que expande y profundiza las ya existentes facilitando la penetración del agua o la acción de la gravedad, dando lugar a fenómenos de remoción en masa o subsidencia.



Figura 21. Diaclasas en el batolito de Pescadero. Vía Bucaramanga – San Gil.

Fuente: Autor.

Las diaclasas tienen un gran efecto sobre la topografía como resultado de su influencia sobre los procesos de meteorización. A lo largo de los planos de diaclasamiento corre el viento y el agua, penetrando las raíces, aumentando la meteorización química de estas zonas que luego son fácilmente erodadas, mientras que las zonas con pocas o ninguna diaclasa permanecen estables dando lugar a la erosión diferencial. Este tipo de erosión concentrada en las diaclasas forma en depósitos aluviales figuras columnares conocida como estoraques y en rocas duras puede formar senderos entre paredes rocosas que parecen pequeñas cordilleras y valles.

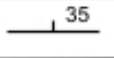

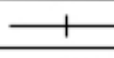
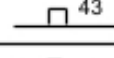



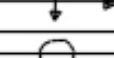
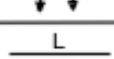
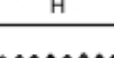
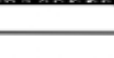
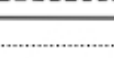
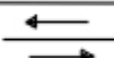
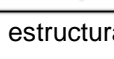
En la exploración de minerales, las zonas diaclasadas son de gran interés porque es allí donde pueden haber precipitado minerales de interés económico y en el caso de los hidrocarburos o las aguas subterráneas, rocas impermeables podrían haberse convertido en excelentes reservorios debido al intenso diaclasamiento.

Estas zonas también son importantes porque facilitan el aprovechamiento de la energía geotérmica.

6.5 SÍMBOLOS DE LAS ESTRUCTURAS EN LOS MAPAS GEOLOGICOS

La tabla 4, muestra como cada una de las estructuras y sus variaciones pueden ser representadas en un mapa geológico.

Tabla 4. Símbolos estructurales en mapas geológicos

| ESTRUCTURA | SÍMBOLO | DESCRIPCIÓN |
|---|---|---|
| Rumbo y buzamiento de los estratos |  | La línea más larga representa el rumbo de los estratos y la más corta y el número al buzamiento y los grados. |
| Rumbo y buzamiento de estratos invertidos |  | Igual al anterior, pero la línea curva indica que los estratos se encuentran invertidos. |
| Rumbo de estratos verticales |  | La línea larga representa el rumbo |
| Rumbo y buzamiento de diaclasas |  | Igual que en el caso de los estratos, pero el cuadrado indica que se trata de diaclasas |
| Rumbo de diaclasas verticales |  | Igual que el anterior |
| Diaclasas horizontales |  | |
| Sinclinal |  | La flecha más grande representa la dirección |
| Anticlinal |  | La flecha más grande representa la dirección |
| Anticlinal tumbado |  | |
| Falla |  | La letra L señala el bloque levantado y la letra H al bloque hundido |
| Falla de cabalgamiento o Límite convergente |  | Las puntas señalan el bloque de encima |
| Falla inferida |  | |
| Falla cubierta |  | |
| Falla de Rumbo o Transcurrente |  | Las flechas señalan la dirección de cada bloque |

Fuente: recopilación de símbolos estructurales en mapas geológicos.

7. SUELOS

Aunque el término suelo no está bien definido debido a la variedad de usos que se le da a este recurso, se podría decir que es el producto de la meteorización de las rocas o de los depósitos aluviales, coluviales, eólicos, etc. mezclados con materia orgánica descompuesta o en proceso de descomposición. Una definición más apropiada considera el suelo como un cuerpo natural que consiste en horizontes de minerales y/o constituyentes orgánicos de espesor variable, que difieren del material parental por sus propiedades morfológicas, físicas, químicas, mineralógicas y sus características biológicas.

Para los ingenieros que usan el suelo como soporte de construcciones, éste está constituido por el material que se puede excavar sin usar explosivos, sin tener en cuenta profundidad, origen o capacidad de soportar crecimiento de plantas y la clasificación del suelo se hace basada en: tamaño de partículas, distribución de tamaño de partículas y plasticidad del material. Estas características están estrechamente relacionadas con el comportamiento del suelo bajo la aplicación de carga.

Para los geólogos, el suelo es el material que se encuentra sobre la roca meteorizada y es importante junto con los procesos de meteorización, como indicador de las condiciones climáticas pasadas y su relación con la formación de materiales útiles que varían desde depósitos de arcilla a yacimientos minerales.

Una muestra de suelo está compuesta de partículas orgánicas o inorgánicas, asociadas con poros interconectados y la cantidad de agua y gases que ocupan los poros dependiendo de las condiciones climáticas.

7.1 PERFIL DE SUELO

El perfil de suelo es una secuencia de capas u horizontes reconocibles en un arreglo vertical hacia abajo hasta el material parental, por lo tanto el perfil es un cuerpo de dos dimensiones. El grado de desarrollo de un perfil de suelo es usado como una medida cualitativa del cambio pedológico que ha sucedido en el material parental. Un suelo muy pobremente desarrollado presenta un horizonte A y quizá un horizonte C_{OX} ; un suelo pobremente desarrollado presenta una secuencia A / B_W / C_{OX} . Las secuencias A / B_W / C_{OX} , A / E / B_t / C_{OX} o A / B_t / B_K / C_{OX} son propias de los suelos moderadamente desarrollados. Los suelos fuertemente desarrollados presentan secuencias similares a los moderados, pero su horizonte B está más desarrollado, es más grueso, más rojo y contiene más arcilla.

La descripción de los perfiles se basa en el reconocimiento de horizontes principales y las subdivisiones. La tabla 5, presenta una descripción muy general de los horizontes y la figura 22, permite observar los horizontes A y B de un suelo.

Tabla 5. Descripción general de horizontes.

| | |
|-------------|--|
| HORIZONTE O | Materia orgánica fresca o parcialmente descompuesta. |
| HORIZONTE A | Color oscuro, mezcla de minerales y materia orgánica parcialmente descompuesta llamada Humus. |
| HORIZONTE E | Es la zona de eluviación o zona empobrecida por la infiltración de agua que ha transportado los óxidos metálicos y las arcillas. A menudo es de color claro. |
| HORIZONTE B | Es la zona de iluviación o zona donde se depositan los materiales provenientes del horizonte E. Se reconocen varias subdivisiones de acuerdo a su contenido mineral. |
| HORIZONTE K | Es una capa fuertemente cementada por carbonato de calcio, corresponde a caliches y calcretas. |
| HORIZONTE C | Generalmente contiene material parental del cual se formó el suelo. |

Fuente: Autor

7.2 FACTORES EN LA FORMACION DEL SUELO

El ambiente físico, químico y biológico determina la formación del suelo. Los factores de mayor importancia en el proceso son: clima, material parental, organismos, relieve y tiempo. (Gráf. 23)

El clima es el factor que más influencia ejerce en la formación de los suelos. Los elementos del clima más importantes en la formación de suelo son la humedad y la temperatura. La humedad está relacionada con la mayoría de los procesos químicos, físicos y bioquímicos involucrados en la formación de suelos. La temperatura tiene influencia sobre la velocidad de los procesos.



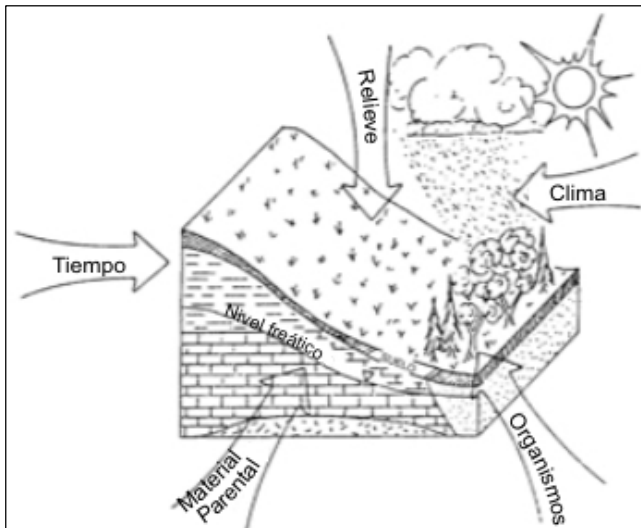
Figura 22. Horizonte A y parte del horizonte B de un suelo.

Fuente: Autor.

Inicialmente se pensaba que era el material parental el que determinaba el tipo de suelo, pero se ha comprobado que similares tipos de suelos se forman a partir de material parental diferente, en condiciones climáticas constantes. En suelos

jóvenes formados en climas medios, la influencia del material parental aumenta. Los organismos incluyen plantas y animales; los cuales juegan un papel importante cuando todos los otros factores son constantes, los suelos desarrollados bajo diferente vegetación presentan numerosas diferencias.

El relieve es un factor relacionado con la posición del suelo en una ladera, las características del suelo a corta distancia pueden variar debido a la posición, la pendiente ejerce influencia sobre los procesos de erosión y depositación; los suelos con pendiente fuerte son más delgados debido a la erosión y los suelos ubicados en la base de la ladera son más gruesos gracias a la depositación. Además de la pendiente, la posición topográfica es otro aspecto del relieve que se relaciona con la localización del suelo en una amplia zona y también influye en la formación del suelo. Por ejemplo, el nivel freático en los valles se encuentra cerca de la superficie y el agua subterránea puede ser evaporada dejando a su paso materiales que lleva en solución, cambiando de esta manera la composición del suelo.



Gráfica 23. Factores que intervienen en la formación del suelo.

Fuente: modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist.

El tiempo es determinado como el periodo en el cual actúan los otros factores cuando una roca es expuesta en la superficie de la tierra. Para la formación de un suelo se requieren miles de años, por lo tanto esta es la principal razón para evitar los procesos erosivos.

7.3 PROCESOS FORMADORES DE SUELOS

Los procesos que ocurren en el suelo corresponden a cuatro grandes denominaciones: ganancias, pérdidas, translocaciones y transformaciones. (Tabla 6)

El relieve empinado en conjunción con las altas temperaturas y la intensa precipitación, son factores que actúan de manera muy diferente en el proceso de

la remoción o pérdida de suelo, de minerales y nutrientes orgánicos. En sectores donde el relieve se suaviza el fenómeno de arrastre pierde fuerza y muchos materiales terminan por ser depositados, lo cual constituye un proceso de acumulación.

Tabla 6. Procesos formadores de suelos.

| PROCESOS | MATERIALES |
|-------------------------|---|
| Adiciones | Materia orgánica Iones y sólidos (Lluvia) Partículas (Viento) |
| Transformaciones | Descomposición de materia orgánica Meteorización de minerales primarios que forma minerales secundarios Procesos de óxido-reducción |
| Translocaciones | Iones y sólidos (agua). Eluviación e iluviación Fe, Al, Si, bases, componentes orgánicos Precipitación desales (Franja capilar alta) |
| Remociones | Erosión Fenómenos de Remoción en Masa |

Fuente. Autor

La migración mecánica de arcillas y otros componentes del suelo por efecto del agua y la gravedad en procesos conocidos como eluviación e iluviación, constituyen las formas más conocidas del proceso de translocación o transferencia. Este proceso es en sentido descendente cuando la precipitación es mayor que la evaporación y ascendente cuando la evaporación es mayor que la precipitación.

Otros ejemplos los constituyen la migración de materiales a través de las grietas que se forman en los horizontes de ciertos perfiles que tienen arcillas expansibles y la extracción de minerales y nutrientes del suelo por parte de las raíces, que a través del follaje se incorporan a los horizontes superficiales.

Las transformaciones son procesos de materiales orgánicos y minerales y la síntesis o la formación de nuevas partículas. Un ejemplo es la mineralización de la materia orgánica o su transformación en humus.

7.4. LOS COMPONENTES FUNDAMENTALES DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON EL MATERIAL PARENTAL

Los elementos esenciales del suelo del suelo son aquellos necesarios para el sustento de la vegetación. Se encuentran en una mayor cantidad el Nitrógeno, el

fósforo y el potasio, otros como el Calcio, Azufre, Magnesio, Cobre, Boro y Molibdeno son necesarios en menor cantidad, los necesarios en cantidad mínima son: Hierro, Manganeso, Zinc, Cobalto, Silicio, Yodo, Sodio, Selenio y Cloro. Estos elementos se encuentran en el suelo de diferentes formas que dependen del tipo de meteorización del material parental, del clima, Porcentaje de materia orgánica, contenido de agua, los tipos de enlaces iónicos existentes, del pH, de la estructura y el equilibrio entre algunas fracciones básicas.

A continuación se presentan algunos de estos componentes fundamentales del suelo y su relación con el material parental o roca madre.

Yodo. Es un elemento que se encuentra principalmente en rocas ígneas y muy poco en las sedimentarias debido a su alta solubilidad. Las rocas ígneas con altos contenidos de feldespatos tienden a generar suelos arcillosos, teniendo en cuenta que los feldespatos por meteorización se convierten en minerales arcillosos y en estos suelos el yodo es muy común. En los suelos cerca de las costas la presencia de yodo está relacionada con precipitaciones de origen marino.

Selenio. Este componente del suelo está relacionado con rocas metamórficas como los esquistos. La cantidad de selenio presente en un suelo depende del lavado y de otros factores como: la cantidad de materia orgánica, régimen de precipitaciones, textura y topografía.

Boro. Se encuentra en mayor proporción en los esquistos que en los granitos, en estos últimos se encuentra en gran cantidad un material llamado turmalina. Los minerales arcillosos como la vermiculita, caolinita y montmorillonita lo adsorben en mayor cantidad en las formas $B(OH)_3$ en un $pH < 7$ y $B(OH)_4^-$ en un $pH > 7$.

Manganeso. Es un elemento común en los basaltos y rocas sedimentarias como las calizas y las dolomitas. Se encuentra de las siguientes formas Mn^{3+} y Mn^{4+} , en los suelos ácidos absorbidos por la materia orgánica como Mn^{2+} . Su forma Mn^{4+} también se debe a actividad microbiana en condiciones de neutralidad o alcalinidad.

Cobalto. Es un componente de suelos provenientes de la meteorización de rocas ígneas ultrabásicas y rocas básicas con abundantes minerales ferromagnesianos, también se encuentra en suelos cuya roca madre es un esquisto. Se encuentra en formas no asimilables por las plantas y su presencia también depende de variables como: el pH, textura y contenido de agua, por lo tanto se encuentra más fácilmente en suelos ácidos, de textura arcillosa y saturado.

Zinc. Es un componente de suelos originados a partir de rocas ígneas, especialmente basaltos, rocas metamórficas como el esquisto y en rocas con minerales arcillosos. En general es la naturaleza básica o ácida de la roca madre

la que determina la concentración de zinc en el suelo, si la roca es básica la concentración de zinc es mayor.

Cobre. Este componente del suelo es común en basaltos, esquistos y en rocas que contengan minerales como carbonatos y silicatos hidratados. Su abundancia en el suelo es directamente proporcional al contenido de la roca madre.

Silicio. Este es un componente de suelos provenientes de rocas compuestas por minerales del grupo de los silicatos. Su concentración es mayor en los suelos ácidos y se encuentra formando parte de la solución del suelo, donde se encuentra accesible y fácilmente extraíble para las plantas.

Molibdeno. Es un componente común en suelos provenientes de rocas ígneas ácidas como los granitos y otras que contengan minerales como la biotita (los feldespatos). En suelos básicos se encuentra en mayor cantidad de la forma MoO_4^{2-} , cuya solubilidad es alta.

7.5 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO

Las características físicas de los suelos facilitan su identificación y ayudan a determinar propiedades químicas, grado de desarrollo, presencia de minerales y procesos que han tenido lugar durante la formación de los suelos. Algunas de estas propiedades son: textura, color, contenido de materia orgánica, estructura, retención de humedad y profundidad efectiva.

7.5.1 TEXTURA

La textura es una de las más importantes características del suelo y depende de la proporción de grava, arena, limo o arcilla presente. El tamaño arcilla es menor de 0.002mm, el tamaño limo va de 0.002mm a 0.02 mm, el tamaño arena se divide en arena fina de 0.02 a 0.2mm y arena gruesa con diámetro entre 0.2 cm. y 2.0 mm. Las partículas con diámetro mayor de 2 mm. se clasifican como grava. La textura de un suelo puede ser arenosa, arenoarcillosa, arenolimoso, arcillolimoso, etc (Gráf. 24).

Los suelos con gran área de superficie interna son químicamente más activos que los de menos área, debido a las mayores cargas electrostáticas por unidad de volumen y a su capacidad de almacenar grandes cantidades de agua por adsorción.

La textura de los suelos es importante para la ecología de los microorganismos ya que determina el área de superficie disponible como hábitat para el crecimiento de éstos.



Gráfica 24. Clasificación del suelo de acuerdo a su textura.
 Fuente: Modificada de Soils and geomorphology.

La mayor área de superficie la tienen los suelos arcillosos especialmente los que contienen montmorillonita. Los minerales arcillosos difieren en sus propiedades químicas y físicas y esta diferencia determina la cantidad y variedad de tipos de microorganismos que pueden ocupar un hábitat particular³. La capacidad de absorción del suelo determina en gran manera la interacción entre bacterias del suelo y hongos.

7.5.2 COLOR

El color del suelo es una característica importante en el reconocimiento de los horizontes en un perfil y de los procesos que han ocurrido u ocurren naturalmente en el suelo, sirve como indicador de varias características como el origen geológico, grado de intemperización, grado de oxidación y reducción, contenido de materia orgánica, lixiviación o acumulación de compuestos químicos⁴.

El color marrón oscuro a negro en horizontes cercanos a la superficie refleja la acumulación de materia orgánica humificada o no humificada, los colores oscuros también son el resultado de acumulación de MnO₂, pero este usualmente tiene un tinte azulado y generalmente no está cerca de la superficie.

Los colores blancos a gris claro pueden tener diversos orígenes, si ocurren entre el horizonte O y el A o entre el A y el horizonte B, es posible que se trate del horizonte E en el cual el agua en su movimiento vertical y lateral removi6 los

³ Pritchett 1991, citado por LEON Escobar, Milagro. Suelos, Bosques, agricultura y Medio Ambiente

⁴ Pritchett 1991, citado por LEON Escobar, Milagro. Suelos, Bosques, agricultura y Medio Ambiente

óxidos e hidróxidos de aluminio y de hierro y la materia orgánica, también puede suceder que todo ese material se encuentre en el horizonte B. En climas húmedos concentraciones locales de gibbsita pueden tener un color claro, en regiones áridas el color blanco bajo los horizontes B_w o B_t se debe a concentraciones de carbonato o yeso.

Los colores marrones a rojos generalmente denotan la presencia de hierro, la gohetita es de color café amarillento, la lepidocrita es café rojiza y la hematita es rojo a púrpura. La presencia de dos o más colores en un intrincado patrón llamado moteado se debe a la alteración de condiciones de oxidación y reducción. La intensidad del color es una medida de la cantidad de material pigmentante presente pero no es una característica precisa debido a que la textura tiene gran influencia, por ejemplo, un material de grano grueso tiene menos área superficial por unidad de volumen que un material de grano fino, por lo tanto el color es menos intenso en el material de grano grueso sin que este signifique que hay menos material pigmentante.

7.5.3 CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA

La materia orgánica se encuentra en cantidades variables en los suelos y principalmente se concentra en los horizontes superiores, la mayor parte de la materia orgánica en el suelo es humus y su formación involucra gran cantidad de CO₂. Generalmente el contenido de materia orgánica en un suelo es 1.724 veces el contenido de carbono orgánico; la relación C/N en un suelo es una medida aproximada de la cantidad de materia orgánica original descompuesta y los valores del estado de equilibrio están relacionados con el medio ambiente.

La materia orgánica incrementa en los suelos capacidad de retención de agua y de intercambio de cationes. Los ácidos orgánicos forman componentes quelantes que incrementan la solubilidad de algunos iones, el CO₂ origina abundante ácido carbónico disminuyendo el pH del suelo y aumentando la meteorización.

7.5.4 ESTRUCTURA

La estructura del suelo corresponde a un arreglo de partículas primarias del suelo (arena, limo y arcilla), incluyendo grava fina, que forman partículas secundarias llamadas agregados cuyas propiedades en conjunto son diferentes a las individuales⁵, estos agregados se clasifican de acuerdo a su forma y superficie. El tipo de estructura está asociado a los horizontes, especialmente con su contenido, la materia orgánica es importante en la formación de estructuras esferoidales y la arcilla lo es en la formación de estructuras en bloques y prismáticas columnares. Los espacios entre agregados reciben el nombre de macroporos, los cuales son

⁵ Urquiaga 1988. Citado por GOMEZ Franco, Evelio. Procesos Erosivos

importantes para el crecimiento radicular, intercambio de aire y drenaje. Dentro de los agregados, los paquetes de arcilla se agrupan formando los microagregados.

Como la estructura determina el movimiento del agua a través del suelo, influye sobre la erosión superficial. Los horizontes A aunque varían de un suelo a otro, tienden a tener poros de gran tamaño que permiten la absorción de grandes cantidades de agua en poco tiempo, reduciendo la escorrentía y la erosión superficial.

7.5.5 RETENCIÓN DE HUMEDAD

El agua se encuentra en los poros de los suelos y es sostenida por fuerzas adhesivas entre partículas orgánicas e inorgánicas y moléculas de agua y las fuerzas cohesivas entre moléculas de agua adyacentes. Las láminas delgadas de agua permanecen adheridas a las partículas y son relativamente inmóviles, mientras las láminas gruesas son más móviles y la parte superior puede migrar de partícula a partícula lateral y verticalmente, la retención de humedad y el movimiento están fuertemente relacionadas con el área de la superficie por unidad de volumen de la masa del suelo y ésta a su vez está relacionada con el contenido de arcilla y materia orgánica.

7.5.6 PROFUNDIDAD EFECTIVA

La profundidad efectiva de un suelo es la distancia vertical desde la superficie hasta el final del horizonte C o la presencia de un horizonte cementado impenetrable (horizonte K). La tabla 7, muestra la clasificación del suelo de acuerdo a su profundidad efectiva.

Tabla 7. Clasificación del suelo de acuerdo a la profundidad efectiva⁶

| DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE | NOMBRE |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| 0 – 50 cm | Superficial |
| 50 – 90 cm | Moderadamente superficial |
| Más de 90 cm | Profundo |

Fuente. Adaptada de Suelos, Bosques, Agricultura y Medio Ambiente.

7.6 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Existen diversas clasificaciones de suelos de acuerdo a los parámetros tenidos en cuenta, éstos pueden ser el origen, las propiedades físicas, químicas y mineralógicas, las condiciones climáticas, topográficas y geomorfológicas, el relieve, uso, la presencia o ausencia de determinados horizontes.

⁶ Parent 1997, citado por LEON Escobar, Milagro. Suelos, Bosques, agricultura y Medio Ambiente

7.6.1 CLASIFICACION GEOLOGICA

La clasificación geológica de los suelos se realiza teniendo en cuenta el origen. Los suelos que se encuentran encima del material que los originó o material parental reciben el nombre de suelos residuales y los que no corresponden al material subyacente se conocen como suelos transportados.

Suelos Residuales

Los suelos residuales son aquellos que se formaron a partir del material generado por la meteorización de la roca subyacente. El espesor y contacto con la roca de los suelos residuales depende principalmente del clima y el tipo de roca, en climas húmedos los suelos desarrollados a partir de rocas ígneas tienden a ser profundos y el contacto suelo – roca es gradual, es decir, no se puede determinar fácilmente donde termina el suelo y donde empieza la roca. Esto significa un problema de ingeniería cuando se trata de ubicar los cimientos de construcciones y obras civiles. En climas áridos los suelos en general tienen poco espesor y aunque en el caso de los suelos originados a partir de rocas ígneas el contacto es gradual, esto no reviste mayor problema de ingeniería debido a la poca profundidad del contacto.

Cuando el material parental es sedimentario el contacto suelo – roca es fino. En cuanto a la profundidad se debe tener en cuenta que en la disolución de la caliza se forman cavernas y huecos que se rellenan posteriormente variando esta característica. Las areniscas y las rocas de alto contenido de minerales arcillosos como los shales y las arcillolitas, forman suelos residuales de muy poco espesor debido a la resistencia de sus componentes a la meteorización. Los suelos muy arcillosos son conocidos como expansivos por su comportamiento plástico y representan graves problemas para las cimentaciones como consecuencia de su baja resistencia al corte y la expansión y contracción, relacionadas con cambios en la humedad.

Suelos transportados

Estos suelos se forman por acumulación superficial de materiales transportados por el agua, el viento o por efecto de la gravedad. Los coluviones (fig 23) son suelos transportados formados por acumulación de materiales en los piedemontes o áreas intermontanas como resultado de los fenómenos de remoción en masa, consisten en depósitos no consolidados ni estratificados conformados principalmente por bloques angulares en una matriz arcillosa. Estos depósitos en muchos casos pueden ser fácilmente desestabilizados por cortes o explosiones subterráneas con consecuencias catastróficas para los cultivos y construcciones ubicadas sobre el área afectada.



Los aluviones son depósitos formados por los ríos y de acuerdo a su posición con respecto a la corriente reciben el nombre de terrazas, vegas o sobrevegas. A diferencia de los coluviones presentan estratificación y los materiales que los componen son redondeados o subredondeados y la superficie es plana.

Figura 23. Coluvión
Fuente: Autor

Otros tipos de suelos transportados son los loess formados por depositación del viento, las morrenas y otros depósitos hechos por lo glaciares.

7.6.2 CLASIFICACIÓN PEDOGÉNICA DE LOS SUELOS

Existe una clasificación pedogénica muy general de los suelos que solo tiene en cuenta el contenido de óxidos y carbonato de calcio. Los pedalfers son suelos que contienen óxidos de hierro y aluminio y son comunes en regiones húmedas y boscosas y los pedocals son suelos con carbonato de calcio y ocurren preferencialmente en zonas áridas o semiáridas. La clasificación más detallada se realiza con base en las propiedades físicas, químicas y mineralógicas; también se tienen en cuenta las condiciones climáticas y topográficas, el contenido de materia orgánica, minerales, humedad, presencia y ausencia de horizontes (Tab. 8). En sus nombres algunas sílabas ayudan a definirlos.

7.6.3 CLASIFICACIÓN AGROLÓGICA

Esta clasificación se hace con base en las características químicas y físicas del suelo y especialmente a su posición geomorfológica y al relieve. Las principales características físicas son la profundidad efectiva, el drenaje natural y la textura, además de la presencia de cantos, nódulos de minerales en el perfil. De las características químicas sobresale el pH, la saturación de bases de cambio, la capacidad de intercambio de cationes, el porcentaje de carbono orgánico y de fósforo, la presencia o ausencia de aluminio; las cuales influyen en la fertilidad potencial del suelo.

Tabla 8. Clasificación pedogénica de los suelos.

| | |
|------------|---|
| ALFISOL | Suelo con alto contenido de arcilla o material margoso. Algunos se forman en zonas boscosas |
| ARIDISOL | Suelos característicos de zonas áridas con alta acumulación de carbonato, sílice o yeso o con un horizonte B con menos de 25 cm de profundidad de color rojizo. |
| ENTISOL | Suelo sin horizontes pedogénicos |
| HISTOSOL | Suelo formado por material con alto contenido de materia orgánica. Comunes en zonas pantanosas en climas fríos y húmedos |
| INCEPTISOL | Suelo con horizontes débilmente diferenciados que muestran material parental alterado. Pueden presentar diferentes subdivisiones del horizonte B de acuerdo a su edad |
| MOLLISOL | Suelo con horizonte A muy rico en materia orgánica, oscuro y fértil. Son propios de praderas |
| OXISOL | Suelo conformado por una mezcla de caolín, óxidos hidratados y cuarzo, presentan un horizonte B con menos de 30 cm de espesor con más del 15% de arcilla o una superficie horizontal con más del 40% de arcilla. Se forman en condiciones de alta temperatura y humedad en áreas tropicales. Alcanzan espesores hasta de 10 m. |
| SPODOSOL | Suelo que puede presentar fuertes contrastes de colores a medida que se desciende en el perfil. El horizonte E es ligeramente coloreado y sin granos de arena. El horizonte B presenta materia orgánica y aluminio con o sin hierro. Son comunes en climas fríos y húmedos con material parental arenoso o en climas tropicales también con material parental arenoso |
| ULTISOL | Suelo con un horizonte B de 7.5 a 30 cm de espesor con alto contenido de arcilla de acuerdo a los horizontes suprayacentes. |
| VERTISOL | Suelo con un contenido mayor o igual al 30% de arcilla. La superficie usualmente presenta grietas debido a los constantes procesos de expansión y contracción relacionados con cambios climáticos. |

Fuente: Autor.

Existen ocho clases agrológicas numeradas de I a VIII. La versatilidad y facilidad de manejo de los suelos va disminuyendo a partir de la primera clase, donde las condiciones son óptimas para casi toda clase de cultivos adecuados a un determinado clima, sin prácticas exigentes para el manejo y la conservación. A partir de la clase V, las limitaciones para la mayor parte de los cultivos y aún para pastos, van siendo cada vez más severas, las prácticas demasiado exigentes y costosas y los resultados muy inciertos. Las clases VII y VIII deben ser destinadas a reforestación y protección, respectivamente.

7.6.4 CLASIFICACIÓN DEL SUELO DE ACUERDO AL USO

Según esta clasificación el suelo puede ser urbano, de expansión urbana, rural y suburbano y de protección. Esta clasificación es la propuesta por la Ley 388 de 1997 o Plan de Ordenamiento Territorial.

Suelo urbano. Corresponde a aquellos suelos ocupados por las cabeceras municipales que cuentan con infraestructura vial y redes primarias de energía, acueducto y alcantarillado.

Suelo de expansión urbana. Es la porción de territorio municipal destinado a expansión urbana que cuenta con la posibilidad de dotación de infraestructura para el sistema vial, de transporte, de servicios públicos domiciliarios, áreas libres, parques y equipamiento colectivo de interés público o social.

Suelo rural. A esta clasificación corresponden los terrenos no aptos para el uso urbano, por razones de oportunidad, o por su destinación a usos agrícolas, ganaderos, forestales de explotación de recursos naturales y actividades análogas.

Suelo suburbano. Comprende las áreas ubicadas dentro del suelo rural en las que se mezclan los usos del suelo y las formas de vida del campo y la ciudad, diferentes a las clasificadas como área de expansión urbana. Pueden ser objeto de desarrollo con restricciones de uso, de intensidad y de densidad, garantizándole autoabastecimiento de servicios públicos domiciliarios.

Suelos de protección. Estas áreas pueden estar localizadas dentro de cualquiera de las clases anteriores, que por sus características geográficas, paisajísticas o ambientales, o por formar parte de las zonas de utilidad pública para la ubicación de infraestructuras para la provisión de servicios públicos domiciliarios o de las áreas de amenazas y riesgo no mitigable para la localización de asentamiento humano, tiene restringida la posibilidad de urbanizarse.

7.6.5 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS PARA INGENIEROS

Los suelos desde el punto de vista de los ingenieros se dividen en: suelos de grano grueso o suelos no cohesivos y suelos de grano fino o suelos cohesivos.

La clasificación de los suelos da a cada tipo de suelo dos letras. Para suelos de grano grueso, la primera letra significa el tamaño de partícula dominante en el suelo: **G**, grava; **S**, arena. La segunda letra se refiere a la calidad de gradación o presencia de material fino: **W**, bien gradado; **P**, pobremente gradado; **M**, más del 12% de limo; **C**, más del 12% de arcilla. Para los suelos de grano fino, la primera letra define el tamaño de partícula dominante: **M**, limo; **C**, arcilla. La segunda letra define la plasticidad: **H**, alta plasticidad; **L**, baja Plasticidad. La tabla 9, muestra la clasificación de los suelos para la ingeniería.

7.7 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS

Las propiedades mecánicas de los suelos juegan un papel muy importante en el diseño de la obra que se vaya a construir sobre ellos y dependen del tamaño de las partículas que los conforman. Los suelos formados principalmente por partículas gruesas conocidos como no cohesivos presentan las siguientes propiedades indicativas: distribución del tamaño de grano, forma de las partículas, contenido de arcilla, densidad in situ y densidad relativa. Las propiedades

mecánicas de los suelos cohesivos son: consistencia, contenido de agua y límites de Atterberg, tipo y cantidad de arcilla y sensibilidad.

7.7.1 DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS PARA SUELOS NO COHESIVOS

Distribución del tamaño de grano. Esta propiedad está relacionada con la diversidad de tamaños de partículas presentes en un suelo. Se considera a un suelo bien gradado cuando éste contiene varios tamaños de partículas y pobremente gradado cuando el tamaño de partículas presenta pocas variaciones.

Forma de la partícula. Las formas pueden ser redondeadas, subredondeadas, angulares, y subangulares.

Tabla 9. Clasificación de los suelos para ingenieros

| CLASIFICACION | | | SIMBOLOS | CONTENIDO DE LOS SUELOS |
|--|--|--------------------------|---|--|
| SUELOS NO COHESIVOS Más del 50% son retenidos en la malla N° 200 | GRAVAS 50% o más del material es retenido en la malla N° 4 | Gravas limpias | GW | Gravas bien gradadas y mezclas de gravas y arenas, poco o ningún material fino |
| | | | GP | Gravas pobremente gradadas y mezclas de gravas y arenas, poco o ningún material fino |
| | | Gravas con material fino | GM | Gravas limosas, mezcla de grava, arena y limo |
| | | | GC | Gravas arcillosas y mezclas grava, arena y arcilla |
| | ARENAS Menos del 50% del material pasa la malla N° 4 | Arenas limpias | SW | Arenas bien gradadas y arenas gravosas, poco o ningún material fino |
| | | | SP | Arenas pobremente gradadas y mezclas de arenas y gravas, poco o ningún material fino |
| | | Arenas con material fino | SM | Arenas limosas y mezclas de arenas y limos |
| | | | SC | Arenas arcillosas y mezclas de arenas y arcillas |
| SUELOS COHESIVOS 50% o más pasa la malla N° 200 | Limos y arcillas, límite líquido del 50% o menor | ML | Limos inorgánicos, arenas muy finas y arenas finas arcillosas o limosas | |
| | | CL | Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas gravosas, arenosas o limosas | |
| | | OL | Limos orgánicos o arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad | |
| | Limos y arcillas, límite líquido mayor del 50% | MH | Limos inorgánicos, micáceos o arena fina o limos diatomeáceos, limos elásticos | |
| | | CH | Arcillas inorgánicas de alta plasticidad | |
| | | OH | Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad | |
| SUELOS FUERTEMENTE ORGANICOS | | | Pt | Suelos pantanosos y otros suelos fuertemente orgánicos |

Fuente: modificada de Geology for Engineers and environmental Scientist.

Densidad In situ. Es la densidad del suelo a una profundidad determinada, se mide pesando una muestra seca tomada de un volumen conocido.

Densidad Relativa. Es la relación entre la densidad in situ y la máxima densidad posible (densidad de una muestra removida).

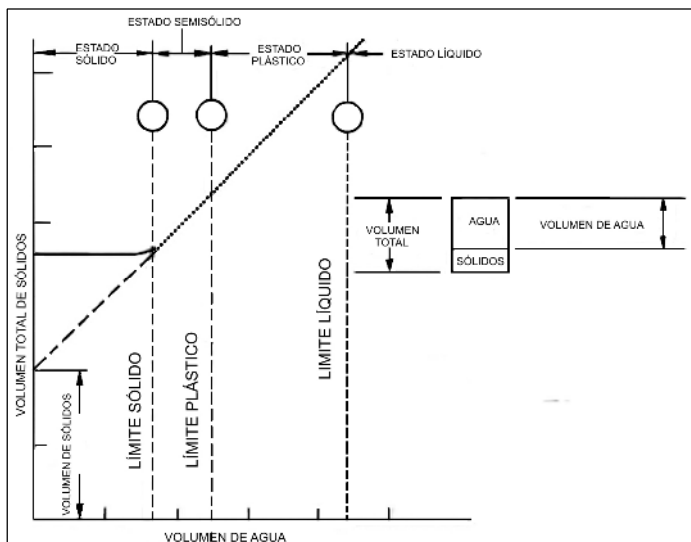
7.7.2 DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS PARA SUELOS COHESIVOS

Consistencia. Es la propiedad más importante de los suelos cohesivos, se refiere a la fortaleza y resistencia a la penetración que tiene un suelo in situ. Está determinada por el arreglo de las partículas o fábrica.

Sensitividad. Es la relación entre la resistencia a la compresión de un suelo en estado natural y un suelo removido.

$$S = \frac{\text{Resistencia a la compresión en estado natural}}{\text{Resistencia a la compresión de un suelo removido}}$$

Contenido de agua y límites de Atterberg. El contenido de agua determina la variación en el comportamiento de un suelo bajo carga. Esta variación va de sólido, pasando por plástico hasta líquido, tal y como lo muestra la gráfica 25. Por ejemplo, el límite líquido lo determina el contenido de agua y es el momento donde la mezcla suelo – agua deja de comportarse como un material plástico para comportarse como un líquido. El límite de encogimiento se define como el punto donde el volumen es casi constante a pesar del decrecimiento del contenido de agua.



Gráfica 25. Límites de Atterberg.
Fuente: modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist.

7.8 RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO

La resistencia al corte es la capacidad de un suelo de soportar carga de una estructura o permanecer estable sobre una superficie inclinada y depende de las ligaduras o fuerzas atractivas entre las partículas o de la fricción entre las mismas, en los suelos no cohesivos la resistencia al corte depende solo de la fricción entre las partículas. La resistencia al corte en suelos cohesivos es más complicada debido al papel que juega el agua; las pruebas que miden ésta resistencia requieren de más tiempo y otras condiciones; las cuales dan como resultado la resistencia al corte por *cohesión* y es controlada por la *consistencia*.

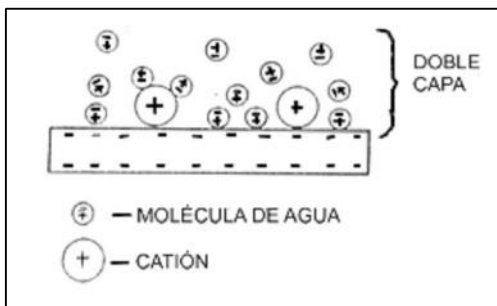
7.9 ASENTAMIENTO Y CONSOLIDACIÓN DEL SUELO

Asentamiento es un término aplicado a la subsidencia vertical de las estructuras cuando el suelo es comprimido. Si la subsidencia es excesiva y mal distribuida puede causar serios daños a las estructuras.

La consolidación es el decrecimiento del volumen de un suelo bajo una carga, el volumen disminuye a medida que la relación de poros (e) se hace menor. En un suelo arcilloso saturado la consolidación es un proceso lento debido a la baja permeabilidad y pueden pasar años para que una estructura complete el asentamiento.

7.10 MINERALES ARCILLOSOS

La presencia de minerales arcillosos es muy importante en la ingeniería del suelo debido a que hay que tener especial cuidado con sus propiedades, en estos minerales la energía superficial controla su comportamiento. En la mayoría de condiciones la superficie de las partículas arcillosas tiene carga negativa que atrae los cationes en solución acuosa de los poros y las moléculas de agua, esto se conoce como capa difusa doble (Gráf. 26). El lado positivo de las moléculas de



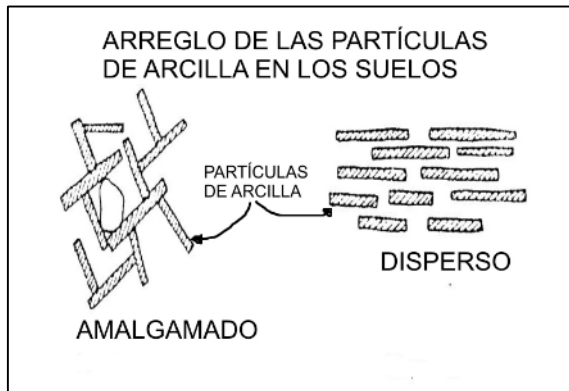
agua causa repulsión con respecto a la capa difusa doble de la partícula adyacente.

Gráfica 26. Atracción de cationes y moléculas de agua hacia la superficie de la arcilla.

Fuente: modificado de Geology for Engineers.

El predominio de las fuerzas atractivas o de las repulsivas determina la fábrica o arreglo de las partículas. En los suelos generados a partir de un ambiente marino el arreglo es amalgamado y en los provenientes de ambientes lacustres el arreglo

es disperso. Las arcillas de arreglo disperso (Gráf. 27) son conocidas como arcillas erosionables y se caracterizan por presentar principalmente cationes de sodio (Na). Por lo tanto los suelos que tienen estos tipos de arcillas son más susceptibles a erosionarse. En las arcillas de arreglo amalgamado predominan los cationes de calcio y magnesio



Gráfica 27. Clases de arreglo de las partículas de arcilla en el suelo.

Fuente: modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist.

7.11 AMENAZAS DE LOS SUELOS

Las amenazas de los suelos debidos a las cargas impuestas por las estructuras están relacionadas con la interacción del suelo y la roca, el sistema de agua subterránea, el clima y la vegetación dárea.

7.11.1 EXPANSIÓN DE LOS SUELOS O SUELOS EXPANSIVOS

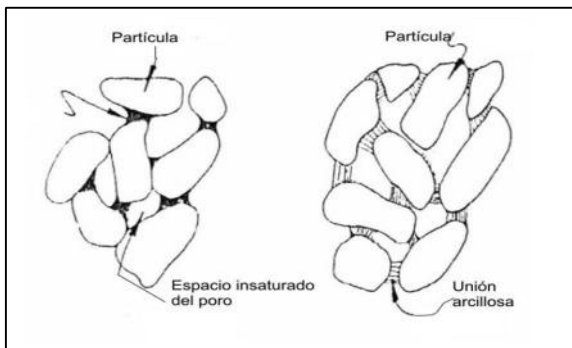
Los suelos pueden hincharse o expandirse debido a un desbalance electrostático de las cargas en la superficie de las partículas, determinado por las moléculas de agua entre las placas arcillosas que las obliga a separarse. Otro factor de hinchamiento es la excesiva atracción de cationes por la superficie de las partículas arcillosas; pequeños poros pueden tener una mayor concentración de cationes y menor concentración de moléculas de agua que los poros más grandes, por ósmosis el agua se mueve de zonas de mayor concentración a zonas de menor concentración, lo que en suelos expansivos significa que el agua se mueve de zonas de baja concentración de cationes a zonas de alta concentración de cationes, este flujo de agua ejerce presión que agranda los poros y causa la expansión de las arcillas.

Bajo condiciones de aridez, la evaporación remueve agua que está cerca de la superficie del suelo; el efecto de succión ejercido hace que las moléculas de agua que no se encuentran fuertemente sujetas se desplacen hacia arriba a reemplazar el agua evaporada dando origen a un proceso contrario a la expansión llamado contracción.

La expansión y contracción de los suelos puede suceder donde hay cambios en el contenido de agua. Los daños potenciales en los suelos expansivos están limitados a la zona superior donde las estaciones cambian el contenido de humedad; esta zona es llamada zona de humedad activa y bajo esta zona el contenido de agua es constante y no se presenta expansión ni contracción.

7.11.2 HIDROCOMPACTACIÓN

Ciertos suelos en regiones áridas tienden a hacerse más compactos en presencia de una carga y agua, este problema generalmente se presenta en suelos desarrollados a partir de sedimentos depositados por agua o aire, donde predominan granos de limo y arena con empaquetamiento muy abierto y un estado insaturado, los poros están conectados y parcialmente llenos de agua, las partículas están unidas por fuerzas de tensión ejercidas por el agua y temporalmente cementadas por arcilla y yeso (Gráf. 28).



Gráfica 28. Estructura del suelo insaturado sostenida por el agua de los poros y ligaduras de arcilla.

Fuente: modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist.

El suelo se hace más denso porque el agua satura los poros más cercanos a la superficie y hace más pesada esta zona, que de manera similar a una construcción ejerce una carga sobre las capas inferiores.

7.11.3 LICUACIÓN

Es un fenómeno que se presenta cuando suelos arenosos o limosos saturados superan el límite líquido rápidamente bajo los efectos de esfuerzos rápidos o cíclicos, causados por terremotos o explosiones.



Figura 24. Efecto de la licuación sobre las construcciones.

Fuente: Geology for Engineers and environmental Scientist.

Los esfuerzos obligan a las partículas a unirse pero si la presión del agua del poro es suficiente para mantener las partículas en suspensión se produce una pérdida total de la resistencia al corte y el suelo se comporta como un fluido.

7.11.4 SUBSIDENCIA DE SUELOS

La subsidencia es el hundimiento del suelo súbita o lentamente. Las causas pueden ser: la remoción de fluidos subterráneos que comprende la extracción de grandes cantidades de agua subterránea en depósitos no consolidados, la descomposición de la materia orgánica, unida a una compactación física producida por la remoción de algunos fluidos, genera subsidencia de la superficie del suelo, el colapso de los techos de las cavernas naturales formadas por la disolución de rocas calcáreas que en algunos casos dan lugar a depresiones redondeadas en la superficie, llamadas relieves karsticos. Otras causas de la subsidencia de los suelos son la minería, especialmente de carbón, el tectonismo, cargas externas y la compactación.

7.12 USO DEL SUELO EN ESTUDIOS AMBIENTALES

Los suelos juegan un papel importante en diferentes estudios ambientales para humedales, geoquímica, cambio climático global, lluvia ácida y proyectos de ingeniería y de recursos.

Los humedales son zonas donde el nivel freático está en la superficie o cerca de ella. Para definir un humedal se requieren tres condiciones: (1) las especies vegetales están adaptadas a suelos con condiciones anaeróbicas; (2) el suelo tiene propiedades asociadas a un ambiente químico reductor y (3) el área permanece o periódicamente está inundada o el suelo es saturado hasta la superficie durante todo el año. La mayoría de Histosoles se forman a partir de humedales.

En los estudios geoquímicos son importantes los procesos relacionados con la génesis del suelo como los que determinan la movilidad o inmovilidad de iones en ambientes acuosos; algunos de esos iones son adsorbidos entre las partículas del suelo y por lo tanto es importante conocer los minerales arcillosos y su capacidad asociada de intercambio de cationes, que es muy importante para una valoración ambiental de un perfil puesto que esas propiedades varían con la profundidad.

Los suelos neutralizan la lluvia ácida con procesos como la meteorización de la calcita. La capacidad de neutralización de un suelo determina el pH de los cuerpos de agua en las cuencas.

8. EROSION

La erosión natural o geológica es el proceso de desgaste normal de la superficie de la tierra sin la intervención del hombre por acción del agua y del viento en todas sus manifestaciones; depende de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los materiales, pero también intervienen el relieve, la vegetación y la longitud del terreno expuesto. La erosión acelerada o antrópica es producida por el hombre al romper el equilibrio entre materiales geológicos, vegetación y el agua o el viento.

8.1 EROSIÓN NATURAL

La erosión es un proceso que ha operado por millones de años sobre la tierra, prueba de ello son las capas de rocas sedimentarias en la zona superficial de la corteza terrestre. La erosión natural afecta a zonas cuyas condiciones ambientales no han sido alteradas, bajo este tipo de erosión las propiedades del suelo y los perfiles se desarrollan hasta alcanzar un equilibrio. La erosión puede aumentar como respuesta a eventos naturales tales como: incendios forestales o muerte de la vegetación, tormentas extraordinarias o aglomeración de vida salvaje que altera la vegetación y compacta el suelo.

8.2 EROSIÓN ACELERADA

La erosión acelerada también es conocida como erosión antrópica. La alteración de las condiciones ambientales acelera la erosión hídrica o la eólica, esa alteración es el resultado de actividades humanas que afectan la cobertura vegetal, exponen suelos e incrementan la pendiente de las laderas. Por lo tanto la erosión acelerada y sus consecuencias pueden ser evitadas o mitigadas con un apropiado planeamiento y una previa programación para la alteración de la superficie, implementación de prácticas de control durante las actividades y cuidados del suelo después de la alteración.

Horizontes B o C expuestos son evidencia de la ocurrencia de la erosión, la superficie es disectada por surcos y cárcavas y los estratos rocosos o masas de roca son expuestas en la superficie. La vegetación natural decrece rápidamente y los sedimentos son transportados a represas, lagos o reservorios o acumulados en canales para ser transportados por fuertes flujos. Los químicos agrícolas son absorbidos y transportados en los sedimentos, llegando a alcanzar altas concentraciones que pueden afectar adversamente la flora y fauna acuática

8.3 EROSION POR AGUA

La erosión por agua es el tipo de erosión que más arranca materiales de la superficie y se hace mucho más efectiva cuando ésta ha sido alterada de su estado natural, especialmente en las zonas dedicadas a la agricultura. La

capacidad de transporte de la escorrentía está relacionada con los esfuerzos cortantes aplicados a la superficie del suelo y a la transportabilidad de los sedimentos, la cual está relacionada con el tamaño, densidad y forma de éstos.

El proceso erosivo inicia con el desprendimiento de partículas del suelo causado por el impacto de las gotas de agua lluvia, esta capacidad de desprendimiento depende de la energía cinética de la gota y la intensidad crítica de la lluvia.

El agua lluvia que cae inicialmente es absorbida por el suelo, cuya capacidad de absorción depende de la textura, vegetación y pendiente. Después de que el suelo se satura, el agua comienza a correr sobre y bajo la superficie iniciándose un flujo de agua superficial (escorrentía), una serie de corrientes subterráneas y una corriente semivertical hacia el nivel freático. La erosión en surcos consiste en



un flujo canalizado con mayor capacidad de transporte que va aumentando progresivamente la profundidad y la densidad por área, hasta convertirse en cárcavas (Fig. 25). La cabeza de la cárcava se hace más alta y avanza rápidamente pendiente arriba dejando la tierra no apta para la agricultura. (Fig. 26)

Figura 25. Proceso erosivo en surcos y cárcavas. Municipio de Curití. Santander
Fuente: Autor



Figura 26. Proceso de erosión avanzado. Municipio de Sutamarchán. Boyacá
Fuente: Autor

8.3.1 VARIABLES DE LA EROSIÓN POR AGUA

En la erosión del suelo debido a la acción del agua intervienen las siguientes variables y sus características, tal como lo muestra la tabla 10.

Tabla 10. Variables que intervienen en la erosión por agua

| VARIABLE | CARACTERÍSTICAS |
|-------------------|---|
| LLUVIAS | INTENSIDAD DURACIÓN |
| SUELO | POROSIDAD PERMEABILIDAD CONTENIDO DE HUMEDAD TEXTURA |
| TOPOGRAFÍA | ORIENTACIÓN DE LAS PENDIENTES ÁNGULO DE LAS PENDIENTES LONGITUD DE LAS PENDIENTES |
| VEGETACION | TIPO Y DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN SOBRE LAS LADERAS |

Fuente: Adaptada de Geology for Engineers and environmental Scientist.

El proceso erosivo extrae del suelo nutrientes y partículas originando una merma en el espesor y la capacidad productiva del suelo, pero también extrae pesticidas, herbicidas o agentes químicos contaminantes que luego deposita en lagos, lagunas o represas convirtiendo el agua en no apta para el consumo humano, eliminando especies animales y vegetales o produciendo en algunos casos el fenómeno de eutrofización, el cual disminuye los niveles de oxígeno en las aguas produciendo la desaparición de especies.

8.3.2 EROSIÓN POR RÍOS

En los ríos y quebradas la erosión se manifiesta como ampliación o profundización del cauce y depende de las características geotécnicas de los materiales del fondo y los taludes, su geometría y características del flujo de agua. Los ríos desde su nacimiento hasta su desembocadura presentan diferencias en la morfología de su cauce, que junto con los procesos erosivos serán explicados en la parte correspondiente a geomorfología.

8.3.3 EROSIÓN POR LAGOS

En los lagos naturales y en los artificiales (embalses) la erosión en las orillas es producida por las olas y el tamaño y fuerza de éstas depende de la longitud de agua expuesta al viento. El descenso y ascenso del nivel de agua también erosiona debido a que destruye la vegetación dejando expuesto el suelo forma una terraza de erosión.

8.3.4 EROSIÓN SUBTERRÁNEA

El agua que se infiltra causa otro tipo de erosión llamada subterránea que deja a su paso cavernas que posteriormente pueden generar subsidencia. La combinación de procesos de erosión superficial y la erosión subterránea muy avanzados da origen a un paisaje conocido geomorfológicamente como “tierras malas”.

La erosión subterránea se debe al transporte de partículas a través de conductos en solución, suspensión o arrastre. Cuando el techo de los conductos colapsa da lugar a la formación de cárcavas.

Según Jaime Suárez⁷, los factores que pueden iniciar la erosión subterránea son:

- a) Presencia de rellenos no compactados.
- b) El agrietamiento por cambios de humedad.
- c) La desaparición de la cobertura vegetal.
- d) La presencia de capas impermeables dentro del perfil del suelo.
- e) Los gradientes hidráulicos internos muy altos.
- f) La presencia de fracturas de geotectónica o estructuras heredadas de un suelo residual.
- g) La dispersibilidad o la solubilidad de un suelo.

8.4 EROSION EOLICA

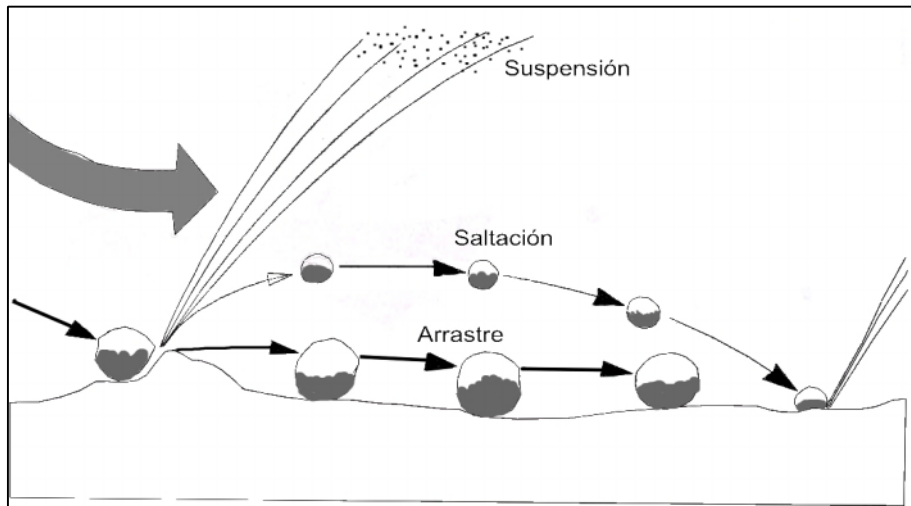
La erosión eólica es causada por el viento y actúa de manera similar al agua, aunque no es tan efectiva debido a la baja densidad del aire. Este tipo de erosión se inicia con un proceso llamado abrasión, que consiste en el arranque de partículas como resultado del impacto de partículas transportadas por el viento contra la superficie expuesta. Las variables que intervienen en la erosión eólica son: duración, velocidad del viento, longitud y forma de la superficie del área expuesta. Otras variables que intervienen están relacionadas con las propiedades del suelo como la textura, contenido de agua y vegetación.

8.4.1 PROPIEDADES DEL SUELO Y LA EROSIÓN EÓLICA

La textura del suelo comprende el tamaño, forma y distribución de las partículas. El tamaño de las partículas juega un papel importante en la erosión, debido a que entre más grande sea la partícula, mayor es la fuerza necesaria para arrastrarla o levantarla, en la gráfica 29, se muestra como el viento transporta las partículas. Las partículas finas promueven la formación de agregados y esto dificulta este tipo de erosión. Las partículas de diámetro entre 0.1 y 0.15 mm son las más

⁷ Manual de Ingeniería para el control de la erosión

susceptibles a ser llevadas por el viento, para el resto de tamaños de partículas la tabla 11 presenta la relación entre tamaño de la partícula y la velocidad del viento.



Gráfica 29. Transporte de partículas por el viento.

Fuente: modificado de Soil erosion: processes, prediction, measurement and control.

La distribución de las partículas en un suelo interviene en el proceso erosivo eólico, puesto que a medida que las partículas pequeñas son transportadas se va produciendo una concentración de partículas más grandes en la superficie, que posteriormente va a actuar como una capa protectora.

Tabla 11. Relación entre la velocidad del viento y el tamaño de las partículas que pueden ser levantadas

| TAMAÑO MÁXIMO DE LAS PARTÍCULAS | VELOCIDAD DEL VIENTO |
|---------------------------------|----------------------|
| 0.25 mm | 16 – 24 Km/h |
| 0.5 mm | 24 – 30 Km/h |
| 0.75 mm | 30 – 35 Km/h |
| 1.0 mm | 35 – 40 Km/h |
| 1.5 mm | 40 – 45 Km/h |

Fuente: Surface processes and Landforms.

La forma de las partículas determina la facilidad de rodamiento que puedan tener. Una partícula redondeada que no pueda ser levantada o arrastrada, podría ser transportada rodando, lo cual no sucedería fácilmente con una partícula de forma angulosa.

El contenido de agua o la humedad del suelo cambian las condiciones respecto al tamaño y la facilidad de transporte por el viento. El agua genera adherencia entre las partículas, especialmente cuando éstas son de tamaño limo o arcilla, dificultando de esta manera el proceso erosivo eólico.

La vegetación provee una protección física al suelo, mantiene la humedad y aumenta la rugosidad y agrega agentes orgánicos que cubren el suelo.

8.5 CONTROL DE LA EROSIÓN

El uso de métodos de control de la erosión se ha venido incrementando en todo el mundo. En la agricultura se utilizan diversos métodos como por ejemplo: cultivos en franjas, cultivos intercalados y terraceo.

Los cultivos en franjas se realizan siguiendo las curvas de nivel de la ladera, con lo cual se interrumpe el flujo de agua ladera abajo evitando la erosión laminar y en surcos.

Los cultivos intercalados consisten en la intercalación de franjas de cultivos que facilitan la acción erosiva y franjas que la dificulten. Un ejemplo podría ser intercalar cultivos de yuca o papa con franjas de hierba, puesto que de la yuca y la papa se aprovechan sus raíces y su extracción predispone el suelo a la erosión y las franjas de hierba retienen el suelo procedente del cultivo e incrementan la infiltración de agua. La cantidad y el espesor de las franjas dependen de la pendiente del suelo.

El terraceo es un método de control de la erosión que requiere de la construcción de terraplenes y terrazas en la ladera.

Las áreas urbanas a pesar de ser muy pequeñas comparadas con las dedicadas a la agricultura, producen sedimentos en una cantidad 100 o más veces mayor que los producidos en zonas rurales. Los sedimentos de las ciudades pueden bloquear autopistas, zanjas y alcantarillados obligando a costosas operaciones de limpieza. El incremento de sedimentos en los ríos mata los peces, incrementa las inundaciones y acorta el tiempo de vida útil de las represas. Los contaminantes químicos, incluyendo pesticidas y herbicidas, a menudo son adsorbidos por las partículas del suelo y llevados por la erosión a ríos y lagos.

Las nuevas construcciones en áreas urbanas incrementan la erosión y la sedimentación, pero este incremento puede ser reducido aplicando principios fundamentales de hidrología y geomorfología. Otra manera de reducir los problemas durante las nuevas construcciones es planearlas para épocas secas, dividiendo el sitio de construcción de manera que solo pequeñas áreas sean descapotadas por periodos y cubriendo los arrumes de suelo y las áreas expuestas, con una cubierta vegetal el mayor tiempo posible.

Otras maneras para disminuir la erosión son los colectores, muros de contención y cuencas de acumulación. Los colectores son canales y caballetes designados para conducir el agua de escorrentía hacia áreas que puedan ser protegidas de la erosión y la sedimentación o hacia las cuencas de acumulación (Fig 27). Los

muros de contención reducen la longitud de la pendiente con lo cual se disminuye la erosión.



Figura 27. Colector de aguas lluvias.

Fuente: Autor.

La vegetación juega un importante papel en la erosión eólica, puesto que provee una protección física al suelo, mantiene la humedad, incrementa la rugosidad de la superficie y agrega agentes orgánicos que unen las partículas.

La erosión eólica puede ser reducida utilizando cinturones de protección que consisten en hileras de árboles u otras especies vegetales, ubicadas perpendicularmente a la dirección del viento dominante, para reducir la velocidad del viento y la longitud del área expuesta. Otros métodos utilizados en la agricultura son: la intercalación de cultivos y la protección de los suelos después de las cosechas.

9. AMENAZAS GEOLÓGICAS

Las amenazas geológicas son fenómenos naturales producidos como consecuencia de los movimientos de las placas tectónicas y no dependen de factores externos. Estas amenazas son: terremotos, Fenómenos de remoción en masa (FRM) y los volcanes.

Los Fenómenos de remoción en masa, a diferencia de las otras dos amenazas tienen alguna relación con factores externos, especialmente con el clima y actividades antrópicas que actúan como acelerantes, pero su ocurrencia no depende necesariamente de estos factores.

9.1 LOS TERREMOTOS

Los terremotos son causados principalmente por la ruptura de rocas a lo largo de fallas de la corteza terrestre. La mayoría ocurre cerca de los límites de las placas tectónicas (gráf. 30), los que ocurren lejos están asociados con fallas profundas no visibles en la superficie.



Gráfica 30. Nido sísmico asociado a la falla de San Andrés. Límite transformante entre las placas de Norteamérica y del Pacífico.

Fuente: modificado de Earthquakes Geology.

9.1.1 TEORIA DEL REBOTE ELASTICO

Durante los terremotos, bloques de roca de lados opuestos de la falla se mueven horizontal y verticalmente el uno contra el otro. Según la teoría del rebote elástico, las rocas se deforman elásticamente hasta que sucede la fractura, liberando abruptamente la fuerza elástica acumulada. La energía es liberada en forma de ondas sísmicas que se dirigen en todas las direcciones a partir de un hipocentro o punto de ruptura.

Aunque la teoría del rebote elástico explica satisfactoriamente la ruptura de rocas frágiles cerca de la superficie de la tierra, tiene problemas para explicar los terremotos producidos a grandes profundidades donde la presión ejercida por la roca suprayacente induce un comportamiento elástico diferente.

9.1.2 DETECCION Y REGISTRO DE TERREMOTOS

El instrumento diseñado para medir y registrar las características de las ondas sísmicas es llamado sismógrafo; consiste en un peso suspendido de una cuerda o un alambre que actúa como un péndulo conectado mecánica o eléctricamente a un lapicero, que en contacto con un tambor rotativo y un gráfico genera un registro de las vibraciones de las ondas llamado sismograma. El péndulo de un sismógrafo solo se mueve en una dirección, por lo tanto una estación sismográfica debe tener tres sismógrafos.

Los acelerógrafos son instrumentos utilizados para medir los más fuertes movimientos de la superficie durante los terremotos y solo registran esto, mientras los sismógrafos registran las ondas sísmicas continuamente.

9.1.3 MAGNITUD E INTENSIDAD

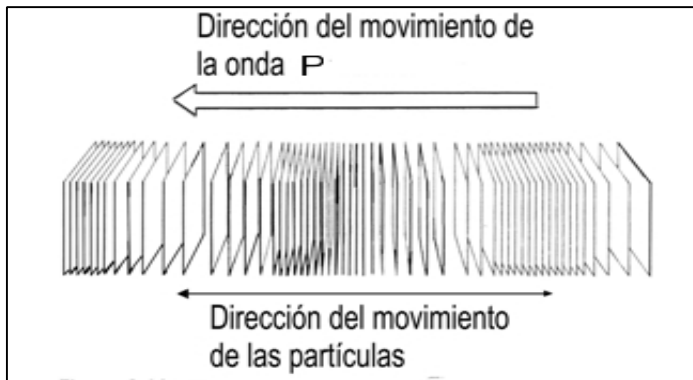
Los terremotos son usualmente más fuertes cerca del epicentro o sea en el sitio de la superficie ubicado directamente encima del hipocentro. Los esfuerzos y efectos de los terremotos son evaluados de dos maneras: la magnitud e intensidad. La magnitud es la medida cuantitativa de la energía liberada por un terremoto, se define como el logaritmo de la amplitud de la onda sísmica más grande producida por el trazo de un sismógrafo localizado aproximadamente a 100 kilómetros del epicentro y se obtiene de los registros de los sismógrafos de acuerdo al método desarrollado por Richter. La escala de Richter tiene 12 divisiones y un terremoto de cualquier grado de magnitud produce diez veces más amplitud de onda que uno de un grado menor. Por ejemplo, en un terremoto de 7 grados en la escala de Richter la amplitud de la onda es 10 veces más grande que la de uno de grado 6.

La intensidad es una medida subjetiva, determinada por los efectos del terremoto sobre las estructuras y por entrevistas a las personas que experimentaron el evento, la escala de intensidad más usada es la de Mércalli que tiene 12 divisiones.

9.1.4 CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS SISMICAS

Las ondas generadas por un terremoto se clasifican en dos categorías de acuerdo al sitio de origen: ondas internas y ondas superficiales. Las ondas internas se producen en el hipocentro y viajan por el interior de la tierra a partir de éste y las

superficiales viajan por la superficie y se originan cuando las ondas internas alcanzan la superficie en el epicentro.

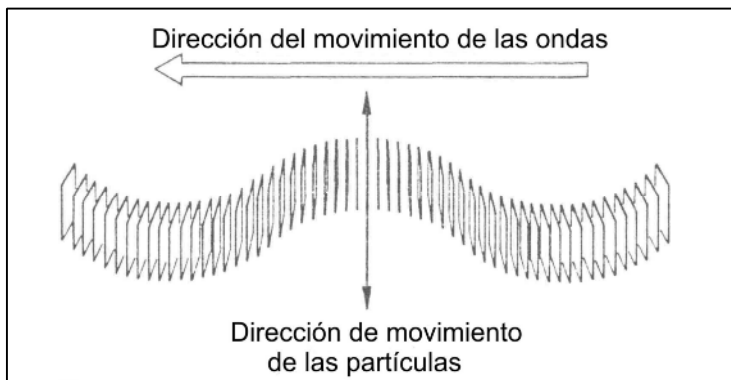


Las ondas internas son las P (primarias) y las S (secundarias). Las ondas P son conocidas como compresionales porque viajan como compresiones y expansiones alternas paralelas a la dirección del movimiento de la onda. (Gráf. 31)

Gráfica 31. Movimiento de las ondas P.
Fuente: modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist

Las ondas S viajan como ondas perpendiculares a la dirección del movimiento y no se transmiten en medios líquidos (Gráf. 32). El descubrimiento de que las ondas S no atraviesan el núcleo externo de la tierra, es la principal evidencia de que esa parte de la tierra es líquida. Las ondas S viajan más lentamente que las ondas P, por lo cual estas últimas son las primeras ondas percibidas por las estaciones sismográficas.

Las ondas superficiales son las L (Love) y las R (Rayleigh) con periodos de 10 a 20 segundos y longitudes de onda de 20 y 80 kilómetros. Las ondas L se originan de las ondas S que alcanzan la superficie en el epicentro y producen movimientos horizontales. Las ondas R imitan el movimiento de las olas.

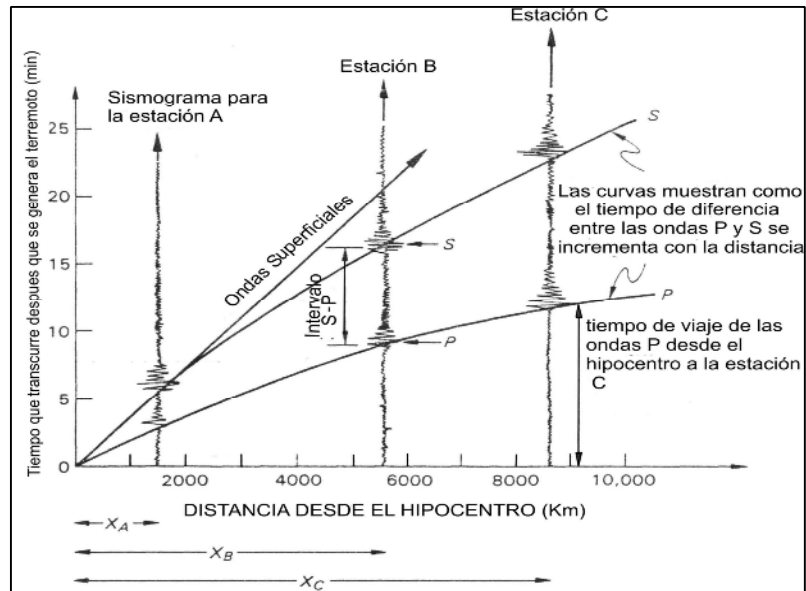


Gráfica 32. Movimiento de las ondas S.
Fuente: modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist.

9.1.5 RELACIONES TIEMPO – DISTANCIA

La diferencia de velocidad entre las ondas P y S determina el tiempo que transcurre desde la llegada de las ondas P hasta el arribo de las ondas S (Gráf. 33). Este tiempo se incrementa con la distancia del sitio a la fuente del terremoto;

así el tiempo de diferencia se convierte en una referencia de la distancia de la estación sismográfica al epicentro.



Gráfica 33. Relación Tiempo – Distancia entre las ondas S y P
Fuente: modificado de Geology for Engineers and environmental.Scientist.

9.1.6 RIESGOS DE LOS TERREMOTOS

El movimiento de fallas generalmente produce terremotos pero en algunos casos son los terremotos los que activan fallas. También suele suceder que las fallas se muevan sin generar ondas sísmicas, este movimiento es llamado deslizamiento asísmico y puede llegar a romper líneas de servicios y pozos, dañar vías y otras estructuras.

Los terremotos incluyen fallamiento de la superficie, sacudidas violentas y fallamiento del suelo. El fallamiento de la superficie produce desplazamientos verticales y horizontales, las estructuras ubicadas encima o muy cerca de la falla son fuertemente dañadas o destruidas en su totalidad. Un mapeo de las fallas susceptibles a activarse durante un terremoto evita que sobre ellas se construya.

Las violentas sacudidas del suelo durante un terremoto constituyen la mayor amenaza para las construcciones y vidas humanas. El pico de aceleración alcanzado por una estructura multiplicado por su masa define la fuerza dinámica aplicada a la estructura. La aceleración del suelo depende de la distancia al epicentro, profundidad del hipocentro y las características de la superficie (suelo o roca).

La falla del suelo involucra una variedad de procesos, entre los cuales se destacan: la licuefacción de suelos saturados y movimientos de remoción en masa como deslizamientos, desplomes, flujos y avalanchas que podrían generar represamiento de corrientes, con graves consecuencias para los asentamientos humanos ubicados cerca.

Un riesgo de los terremotos bastante temido en las zonas costeras son los tsunamis o gigantescas olas generadas por terremotos con epicentro en el piso oceánico.

9.1.7 RIESGO SISMICO Y PLANEAMIENTO DEL USO DEL SUELO

La valoración del riesgo sísmico en un área es un procedimiento complejo que involucra la historia de los eventos sísmicos, la ubicación de fallas activas, la respuesta regional y local a los sismos y las características sísmicas de los materiales geológicos superficiales. La evaluación de los anteriores factores indica la gravedad potencial de los daños producidos por un terremoto. Las medidas que se pueden tomar para mitigar los daños potenciales incluyen la planeación del uso del suelo y exigentes códigos de construcción.

Se considera que por cada 100 kilómetros de longitud de una falla, un kilómetro a cada uno de sus lados está en alto riesgo sísmico.

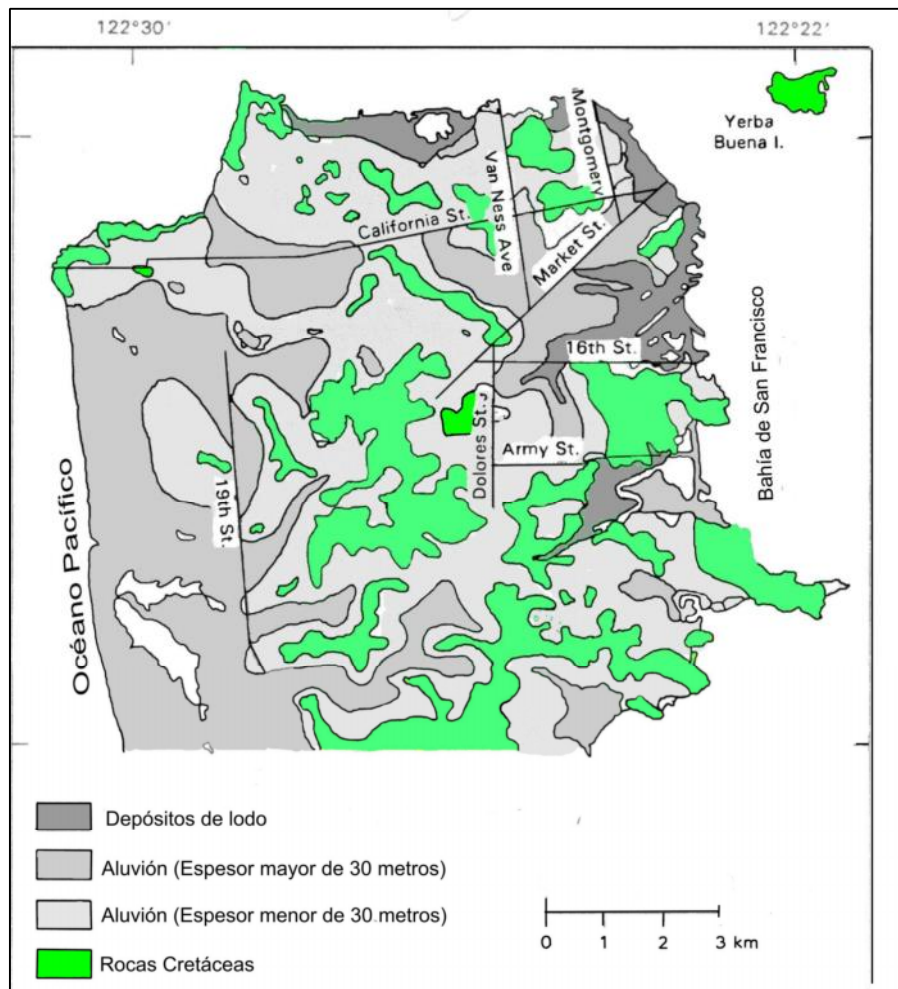
9.1.8 LOCALIZACION DE FUENTES DE TERREMOTOS

Las áreas sísmicamente activas pueden ser determinadas con los registros de epicentros de terremotos durante cierto periodo de tiempo. También estos registros ayudan a ubicar fallas activas.

Los sitios de las fallas activas donde se generan terremotos reciben el nombre de nidos sísmicos. En estos sitios durante un periodo de tiempo no se observa ninguna actividad, lo cual significa que allí la falla se halla bloqueada y es posible que esté acumulando gran cantidad de esfuerzos elásticos. La figura 1, al iniciar este capítulo, representa una sección de la falla de San Andrés desde el norte al centro de California, en ella se presentan tres nidos sísmicos: el de la península de San Francisco, el de las montañas de Santa Cruz y el de Parkfield. En estos nidos fue poca la actividad sísmica desde enero de 1969 hasta julio de 1989. En la parte inferior aparece el registro sísmico del nido de las montañas Santa Cruz después del terremoto de Loma Prieta en octubre de 1989 en el cual se observa el impresionante aumento de la actividad sísmica producida por el terremoto y sus réplicas.

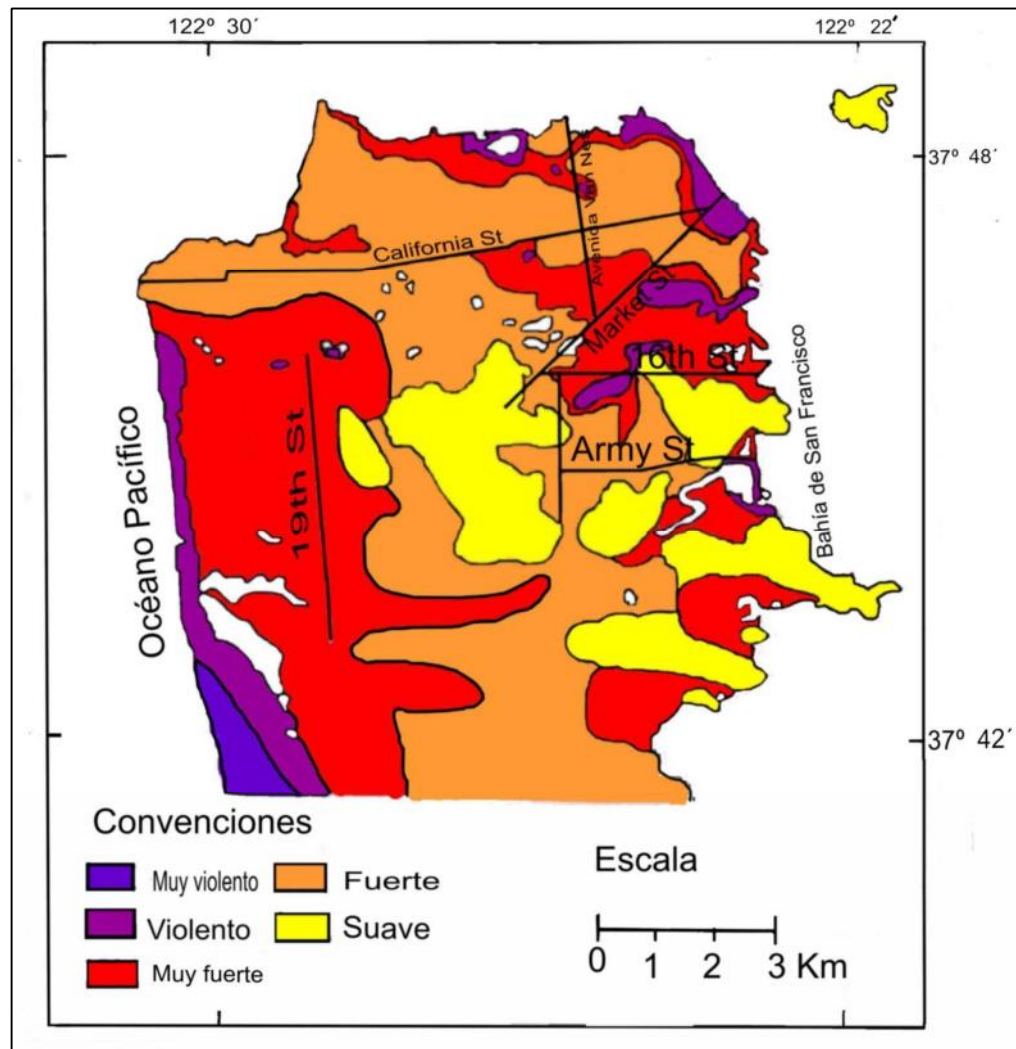
9.1.9 MOVIMIENTO DEL SUELO

La respuesta de la corteza terrestre durante un terremoto varía local y regionalmente, por lo cual se presenta un decrecimiento de las ondas sísmicas del epicentro hacia fuera, conocido como atenuación sísmica. La intensidad del movimiento del suelo depende principalmente de la geología superficial, los suelos blandos tienden a vibrar más fuertemente que los suelos duros o las rocas. Esta relación se ilustra claramente en las gráficas 34 y 35 que muestran la geología general de San Francisco y la intensidad relativa del terremoto de 1906, respectivamente. En el mapa geológico, los colores grises corresponden a depósitos cuaternarios (aluviones), que se caracterizan por una poca consolidación. En el mapa de intensidad relativa, los colores más oscuros corresponden a las zonas donde se sintió con más fuerza el terremoto. Observando los dos mapas, se puede determinar que las zonas de roca y baja intensidad relativa del terremoto coinciden.



Gráfica 34. Mapa geológico del área de San Francisco (EE. UU).

Fuente: modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist.



Gráfica 35. Mapa de intensidad relativa del terremoto ocurrido en San Francisco, EE UU en 1906.

Fuente: modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist.

9.1.10 RELACION ENTRE TERREMOTOS Y SUELOS

Los efectos de un terremoto sobre una edificio están determinados por la relación e interacción entre las características de las ondas sísmicas que alcanzan el sitio, la respuesta de los materiales bajo el edificio y el diseño y construcción del edificio mismo. Un factor importante en el daño producido por un terremoto es la relación entre el periodo de vibración de una estructura y el periodo del material geológico sobre el cual está construida. El periodo de vibración de los materiales geológicos varía de un segundo para lechos rocosos y suelos rígidos hasta varios segundos para suelos blandos. El periodo de vibración de un edificio varía con su altura; los edificios altos tienen largos periodos, mientras los edificios bajos tienen cortos

periodos. Cuando los periodos de los edificios y el suelo son similares (resonancia) ocurre una situación altamente riesgosa que se traduce en sacudidas violentas y los más graves daños.

El diseño y los materiales de construcción juegan un importante papel en el comportamiento de un edificio durante un terremoto; las pequeñas construcciones con estructuras de madera son las más seguras siempre y cuando estén bien aseguradas a las bases. La tabla 12 presenta la susceptibilidad al daño por terremoto de los tipos de construcciones más comunes. Existen algunas variables en las construcciones como diseño interior, vigas, orientación y frecuencia de respuesta, que pueden hacer cambiar el comportamiento de la edificación frente a un movimiento sísmico.

Los efectos de los terremotos sobre las líneas de servicios como electricidad, agua, alcantarillado y gas, aumentan las dificultades durante los eventos sísmicos

Tabla 12. Tipo de construcciones y susceptibilidad al daño por terremotos.

| DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE CONSTRUCCIONES | Susceptibilidad al daño |
|---|---|
| Construcciones con estructura de madera | 1 |
| Edificios unifamiliares o multifamiliares con estructura de acero. Paredes, pisos y techo de concreto | 1,5 |
| Edificios unifamiliares o multifamiliares con estructura de concreto reforzado. Paredes, pisos y techo de concreto | 2 |
| Construcciones de gran área con estructura de madera | 3 - 4 |
| Edificios unifamiliares o multifamiliares con estructura de acero. Paredes exteriores no reforzadas. Pisos y techo de concreto | 4 |
| Edificios unifamiliares o multifamiliares con estructura de concreto reforzado. Paredes exteriores no reforzadas. Pisos y techo de concreto | 5 |
| Construcciones con paredes de armazón en concreto reforzado, con techos y pisos soportados en otros materiales (usualmente madera) | 5 |
| Edificios construidos con ladrillo y cemento no reforzados, con techos y pisos soportados en otros materiales (usualmente madera) | > 7 |
| Construcciones en adobe, tapia pisada o baldosas de arcilla, no reforzadas | Riesgo de colapsar en un movimiento suave |

Fuente: Adaptada de The Geology of Earthquakes.

9.1.11 PREDICCIÓN DE TERREMOTOS

Teóricamente son posibles dos formas de predecir un terremoto, la primera es un pronóstico longitud–periodo en el cual la probabilidad de que un terremoto suceda en un segmento particular de una falla en un intervalo de tiempo, se calcula estudiando los segmentos sísmicos y los registros históricos de terremotos sucedidos en el segmento. La otra forma es la capacidad de predecir en un corto espacio de tiempo analizando los precursores observados durante terremotos pasados. Estos precursores son fenómenos físicos y químicos como cambios en velocidad de las ondas sísmicas, resistividad de las rocas, frecuencia de sismos preliminares; deformación de la superficie de la tierra, cambios en el nivel o composición química del agua de los pozos del área.

Algunos de estos precursores pueden ser explicados por el modelo de dilatación, bajo esta hipótesis las rocas sometidas a esfuerzos a lo largo de fallas presentan una dilatación significativa o aumento de la porosidad antes de la ruptura; el aumento de la porosidad se debe a las microfracturas que sufren las rocas que a su vez permite el flujo de agua subterránea dentro de las rocas fuertemente tensionadas; los cambios en la densidad y el contenido de agua afectan la capacidad de las rocas de transmitir las ondas sísmicas y de conducir la electricidad.

Otra forma de predecir los terremotos es el comportamiento extraño de algunos animales antes de un terremoto, lo cual ha sido reconocido por siglos.

9.1.12 EFECTOS SECUNDARIOS DE LOS TERREMOTOS

Los efectos secundarios de los terremotos son los procesos superficiales no tectónicos directamente relacionados con los terremotos, su importancia se debe a que causan muchas pérdidas de vidas y propiedades. Los efectos más comunes son los fenómenos de remoción en masa (FRM) y la licuefacción.

Los tipos de FRM comúnmente generados por los terremotos son: caídas de rocas y suelos alterados, deslizamientos traslacionales de rocas; los menos comunes son el deslizamiento de suelos, rocas y avalanchas de suelo y aún menos comunes las caídas de suelos, flujos de suelo en estado líquido, deslizamientos rotacionales de rocas.

Los flujos en estado plástico, deslizamientos de masas rocosas y avalanchas de rocas son relativamente poco asociados con terremotos.

La abundancia de los diferentes tipos de fenómenos de remoción en masa depende de la magnitud del terremoto⁸. La magnitud mínima para que se

⁸ Keefer, en Geología de los Terremotos.

produzcan estos fenómenos es de 4.0, los terremotos de esta magnitud menor tienden a producir caídas de rocas, de suelo, deslizamientos traslacionales de rocas y suelos alterados. Los deslizamientos rotacionales de suelo requieren terremotos de magnitud mínima de 4.5. Los deslizamientos rotacionales de rocas, traslaciones de masas rocosas, flujos de suelos en estado plástico y licuefacción de suelos se presentan con terremotos de magnitud mínima de 5.0. Para las avalanchas de rocas, la magnitud mínima es de 6.0 y para las de suelo es de 6.5.

La tabla 13, presenta una relación entre las características de los fenómenos de remoción en masa producidos por terremotos. El término suelo se refiere a material no consolidado con poca o total ausencia de materia orgánica, el término rocas incluye material suelto o diaclasado y masa rocosa se refiere a material rocoso compacto.

9.1.13 LOS TERREMOTOS Y LA SOCIEDAD

Los terremotos producen diversos efectos indeseables para una sociedad como lo son las muertes, lesiones, desórdenes y traumas sociales y psicológicos, así como pérdidas y destrucciones materiales inmediatas y variadamente percibidas.

Los daños sociales, culturales y humanos son muy difíciles de estimar desde un punto de vista económico, dado su carácter, muchas veces irreparable. Sin embargo, estos daños tienen implicaciones económicas que van más allá de una comprobación instantánea, pues plantean el problema de la reposición o del reemplazo que puede ser difícil, lento y costoso. Un ejemplo es la desaparición o la incapacitación de personal en la producción, otro es la redistribución forzosa y violenta de cargas y responsabilidades familiares y un tercer ejemplo es la destrucción total o parcial de monumentos de valor histórico o arqueológico.

La destrucción física tiene implicaciones económicas; en efecto, la destrucción parcial o total significa en primer término, la pérdida de valor o depreciación brusca de las estructuras físicas que plantea su reparación o reposición, con costos y plazos fuera de servicio, de importancia variable y en un momento en que no está previsto afrontarlos. En segundo término, esa destrucción puede afectar a infraestructuras, instalaciones o equipos productivos en diferente medida, es decir, paralizando totalmente, amortiguando o reduciendo el ritmo de actividades o bien generando efectos como desorganización, desabastecimientos y otros fenómenos. Se trata de daños o pérdidas que reducen la productividad. Más aún, pérdidas o destrucción localizadas en un sector, una industria o una planta específica inducen paralización o reducción del ritmo de funcionamiento en actividades eslabonadas, incluso si se encuentran fuera de la región afectada o muy distante de ella.

Tabla 13. Características de los fenómenos de remoción en masa producidos por terremotos.

| NOMBRE | | MATERIAL | | TIPO DE MOVIMIENTO | VELOCIDAD |
|-----------------|-----------------|---|---------------|--|---|
| CAIDAS | | ROCAS | | Saltación, rodamiento o caída libre | Extremadamente rápida |
| | | SUELO | | | |
| DESPLAZAMIENTOS | ROTACIONALES | ROCAS | | Deslizamiento sobre una superficie de corte curva | Lenta a rápida |
| | | SUELO | | | |
| | TRANSLACIONALES | ROCAS | SUELTAS | Deslizamiento sobre una superficie de corte recta | Rápida a extremadamente rápida |
| | | | MASAS ROCOSAS | | Lenta a rápida |
| SUELO | | Deslizamiento sobre una superficie de corte recta o sobre una zona de arcilla poco compacta | | Moderada a rápida | |
| AVALANCHAS | | ROCAS | | Complejo, deslizamiento y/o flujo | Extremadamente rápida |
| | | SUELO | | Deslizamiento transicional con flujos subsidiarios | Muy rápida a extremadamente rápida |
| FLUJOS | | SUELO SECO (Estado plástico) | | Deslizamiento sobre una superficie de corte con algunos flujos internos repentinos | Muy lenta a moderada con algunos flujos rápidos |
| | | SUELO HÚMEDO (Estado líquido) | | Flujo | Muy rápida a extremadamente rápida |

Fuente: Autor.

El fenómeno de efectos en cadena compromete por tanto áreas importantes y en las etapas inmediatas a la ocurrencia del evento sísmico destructor, provoca una reasignación de recursos, tanto para asegurar la actividad impostergable de socorro como la alteración de las prioridades de inversión y provisión de servicios. En este sentido hay efectos económicos directos e indirectos más amplios que los inmediatamente perceptibles y que operan a más largo plazo.

Por otra parte los daños consecutivos a un sismo generan una demanda de inversiones destinadas a la reconstrucción o al desarrollo de las zonas afectadas, lo cual induce una aceleración de las industrias productoras de materiales, insumos o equipos necesarios (dentro o fuera de la región o del país), además, movilizan fondos de inversión que en proporción importante (en el caso de los

países en desarrollo o tercermundistas) no son provenientes de ahorros propios, lo cual genera un flujo de capital proveniente del exterior en condiciones particulares y en breve plazo. Igualmente se abren posibilidades de reorientar y acelerar el proceso de desarrollo, por el hecho de que se deciden en forma conjunta, o por lo menos contemporánea, inversiones cuyo monto y contenido resultan fundamentales.

Se pueden reconocer efectos negativos y positivos sobre la economía en el corto y mediano plazo, lo cual no puede llevar en ningún caso a convertir en deseable la destrucción⁹.

⁹ Máximo Vega- Centeno en Centro Regional de Sismología para América del Sur.

9.2 LOS FENOMENOS DE REMOCION EN MASA (FRM)

Los fenómenos de remoción en masa constituyen un riesgo geológico que consiste en el desplazamiento de masas de suelo y/o roca pendiente abajo por incidencia de la gravedad y movimientos sísmicos, estos desplazamientos suceden cuando la fuerza gravitacional excede la resistencia al corte del material involucrado o la presencia de agua dentro del material varía las propiedades físicas.

El ángulo de la pendiente juega un papel muy importante puesto que determina la magnitud de la fuerza que actúa sobre el material ubicado sobre el plano de deslizamiento, contrario a esta fuerza u oponiéndose al movimiento se encuentra la fuerza de rozamiento que depende de las propiedades físicas de los materiales.

9.2.1 FACTORES QUE FAVORECEN LOS FENOMENOS DE REMOCION EN MASA (FRM)

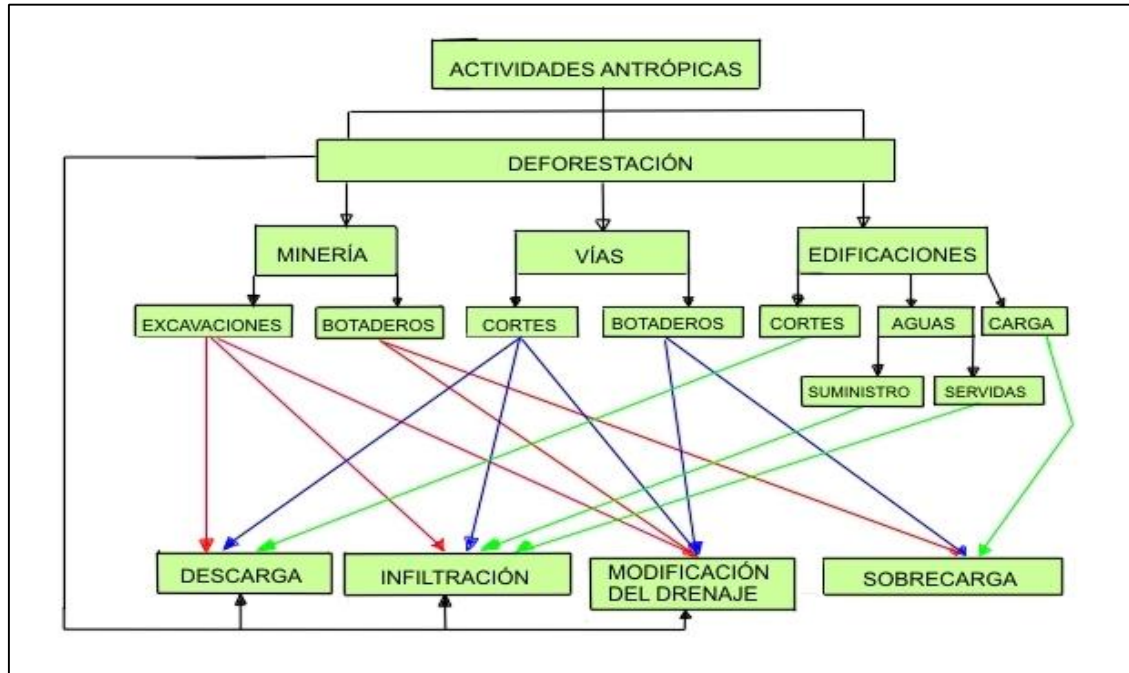
Entre los factores que favorecen los FRM se encuentran los climáticos, los topográficos, los biológicos y los relacionados con la condición de humedad de los materiales y la naturaleza de éstos. Los factores climáticos que actúan fuertemente en estos movimientos son la precipitación y la temperatura; las lluvias saturan los materiales haciéndolos más pesados y aumentando la fuerza gravitacional actuante y los cambios bruscos de temperatura expanden y contraen los suelos formando grietas que permiten la entrada de agua de escorrentía que se suma a la que normalmente se filtra.

La topografía determina el relieve, cuya inclinación influye en la velocidad de los FRM. Los movimientos más o menos lentos están asociados a pendientes inferiores a 30°; cuando la pendiente es mayor los movimientos tienden a ser rápidos y si es vertical a subvertical puede presentarse caída libre de materiales.

Dentro de los factores biológicos aparecen las plantas con raíces superficiales, los animales excavadores y las actividades antrópicas como las agropecuarias, mineras, petroleras, construcción de obras civiles, deforestación, inadecuado uso y manejo del suelo, deficiente manejo de aguas, prácticas constructivas inadecuadas e inadecuado manejo y disposición de sobrantes. (gráf 36).

9.2.2 CLASIFICACION DE LOS FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

La clasificación de los Fenómenos de Remoción en Masa se hace con base en el tipo de movimiento pero se involucra el contenido de agua, la velocidad del movimiento y la clase de materiales. (Tabla 14).

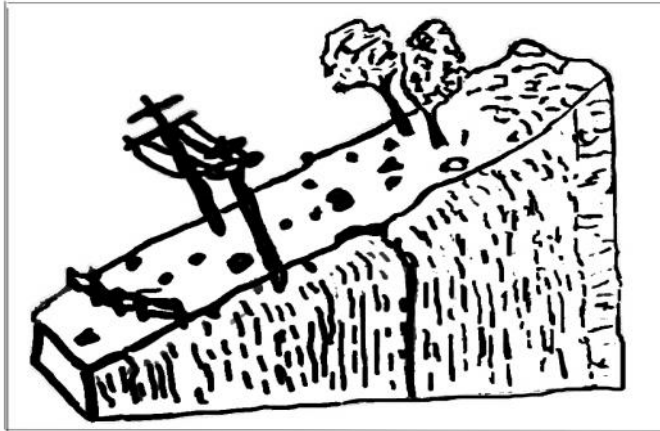


Gráfica 36. Actividades antrópicas y su influencia en los FRM.
 Fuente: Modificada de III Simposio Latinoamericano de deslizamientos.

Tabla 14. Clasificación de los Fenómenos de Remoción en Masa.

| MOVIMIENTO | | MATERIAL | |
|-----------------------|----------------|--|--|
| | | ROCAS | SUELOS |
| REPTACION | | | Movimiento superficial, lento y continuo de suelo |
| FLUJOS | | Flujo de fragmentos de roca | Flujo de materiales gruesos o finos según el tipo de suelo |
| DESLIZAMIENTOS | Rotacionales | Desplazamiento de rocas sobre un plano curvo o semicurvo | Desplazamiento de suelo sobre un plano curvo o semicurvo |
| | Traslacionales | Desplazamiento de rocas sobre un plano recto | Desplazamiento de suelo sobre un plano recto |
| CAIDAS | | Caída de rocas | Caída de suelos |
| VOLCAMIENTOS | | Volcamientos de rocas | |
| MOVIMIENTOS COMPLEJOS | | Formados por dos o más tipos de movimientos | |

Fuente: Autor.



9.2.2.1 REPTACIÓN

Es un movimiento amplio, abierto y muy lento, casi imperceptible, y superficial de partículas de suelo y detritos finos (en capas de algunos centímetros o decímetros de espesor) sobre pendientes relativamente fuertes y convexas o rectas. (Gráf. 37)

Gráfica 37. Reptación

Fuente: Fundamentos de Geología.

En este movimiento intervienen además de la gravedad otros factores como el cambio en el volumen de arcillas por variaciones de temperatura y humedad, saltación de partículas por erosión pluvial, caída de árboles, laboreo del suelo y englobe de partículas durante las heladas.

Puede ser fácilmente detectado porque inclina en la dirección de la pendiente árboles, cercas y postes.

9.2.2.2 FLUJOS

Son desplazamientos lentos o rápidos de materiales cuesta abajo por acción de la gravedad y la saturación, aunque esta última no es un pre-requisito para su ocurrencia puesto que en ocasiones se presentan flujos de materiales secos. Los flujos de suelo pueden ser en estado plástico y en estado líquido. Dentro de los flujos en estado plástico se encuentran:

Soliflucción Plástica. Este fenómeno ocurre en laderas formadas por materiales compresibles, homogéneos y bastante plásticos con pendientes de 25 a 50%, se caracteriza porque la superficie se hunde bajo el peso de edificaciones, bloques rocosos o de una cobertura de árboles, el borde inferior se abomba y la topografía toma un aspecto irregular; con la formación de contrapendientes transversales de configuración arqueada, que favorecen el estancamiento e infiltración del agua.

Patatas de vaca y terracetas, son fenómenos comunes en terrenos homogéneos y poco plásticos con pendientes entre 55 a 80% o mayores que por efecto del constante pisoteo del ganado, gravedad y agua del suelo dan lugar a una microtopografía de peldaños transversales a la pendiente general del terreno. Se clasifica como patas de vaca (Fig 28) cuando los pequeños taludes no muestran

ruptura entre los peldaños y cuando los peldaños se encuentran separados por taludes de alrededor de 1 m de altura reciben el nombre de Terracetas.



Figura 28. Solifluxión plástica (patas de vaca).
Fuente: Autor.

Los flujos en estado líquido tienen un desplazamiento más rápido que los de estado plástico, suceden cuando los materiales superan el límite líquido y se desplazan pendiente abajo dejando cicatrices en la zona de despegue y formas específicas en la zona de acumulación que permiten clasificarlos como lupias y golpes de cuchara (Fig. 29).

Cuando el flujo Líquido alcanza volúmenes de materiales y se presenta en pendientes pronunciadas y confinadas recibe el nombre de *flujos de lodo o lahares* (Gráf. 38.), que adquieren suficiente poder de arrastre como para remover materiales sueltos, bloques de roca, troncos de árboles, animales, construcciones, etc. presentes a lo largo de valles y transportarlos cuesta abajo en flujos turbulentos a menudo catastróficos.

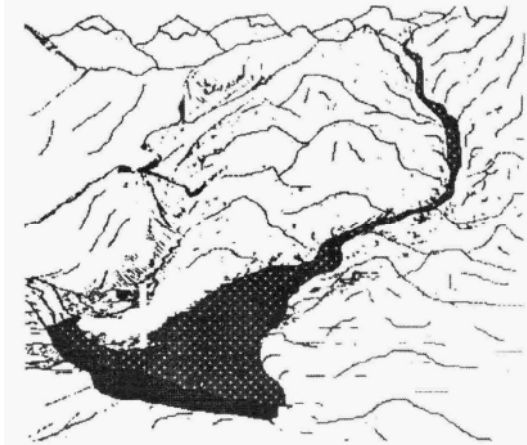


Figura 29. Flujo en estado líquido conocido como Golpe de cuchara.
Municipio de Curití. Santander.
Fuente: Autor.

Mecanismos de formación de avalanchas de lodo (lahares)

Existen diferentes procesos que generan avalanchas de lodo:

Deslizamientos de tierra generalizados por lluvias intensas. Es la forma más común y están relacionados con la ocurrencia de lluvias excepcionales.



Gráfica 38. Avalancha de lodo o Lahar

Fuente: Foundations of Earth Science

En ambientes tropicales el régimen de lluvias típico presenta unos valores normales promedio con unas anomalías extraordinarias y es por esta razón que las zonas tropicales son las más propensas a sufrir grandes avalanchas. . Estas anomalías son generalmente atribuidas a los fenómenos del Niño y La Niña. Los Andes tropicales por su situación climática, topográfica y geológica son una de las zonas del mundo más propensa a la ocurrencia de avalanchas.

Represamiento de cauces de agua. Un deslizamiento de tierra puede represar un canal de drenaje, una cañada o un río produciendo una gran acumulación de agua, que al desbordarse puede generar una avalancha de grandes proporciones. La figura 30 muestra una pequeña avalancha producida por un deslizamiento que represó una quebrada afluente del río Mogoticos en el municipio de Mogotes, Santander.



Figura 30. Avalancha de lodo debido al represamiento de la quebrada.

Municipio de mogotes. Santander.

Fuente: Autor.

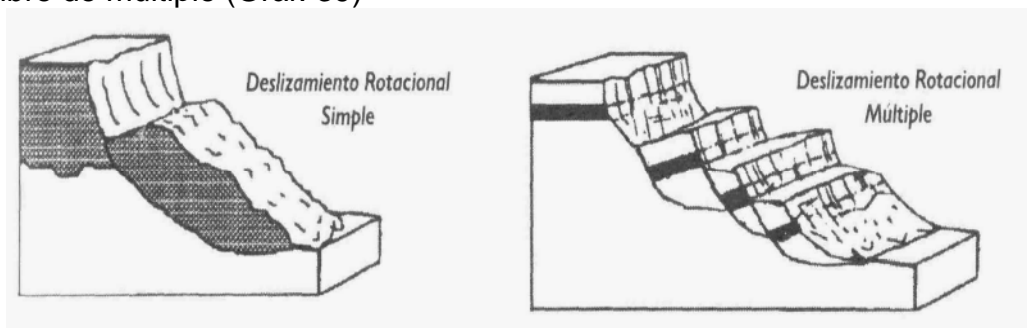
Eventos sísmicos. La ocurrencia de un sismo de poca profundidad de foco y gran magnitud genera gran cantidad de deslizamientos cosísmicos que pueden convertirse en avalanchas dependiendo de la susceptibilidad de las laderas a deslizamientos y de la coincidencia o no con periodos de lluvia. Para la ocurrencia de grandes avalanchas generalmente se requiere un sismo de magnitud superior a 6.0 (escala de Richter).

Flujos Piroclásticos. Las erupciones volcánicas causan avalanchas a veces acompañadas de flujos piroclásticos. Las intrusiones magmáticas deforman y fracturan las rocas que forman el cono volcánico al empujar hacia arriba y hacia fuera, induciendo aumento de fuerzas cortantes y disminución de la resistencia al corte de la masa¹⁰. Los volcanes son muy susceptibles a originar avalanchas de tierra debido a sus pendientes empinadas y la estructura de capas inclinadas en la dirección de la pendiente topográfica, además de que las rocas en los conos volcánicos tienden a ser débiles por la meteorización. El deshielo de nevados por erupciones volcánicas puede generar avalanchas de gran magnitud

9.2.2.3 DESLIZAMIENTOS

Estos movimientos pueden desarrollar una o varias superficies de ruptura, una zona de desplazamiento y una zona de acumulación del material desplazado bien definidas, ocurren en pendientes desde suaves a fuertes, en cualquier tipo de material (suelos o rocas) y se clasifican principalmente por la geometría de su plano de deslizamiento, también por la dirección en que avanzan y por la profundidad del plano de deslizamiento.

Deslizamiento rotacional. Tiene una superficie de deslizamiento curva o semicurva y cóncava hacia arriba. Si presenta una sola superficie de ruptura se conoce como simple, pero si presenta varias superficies de ruptura recibe el nombre de múltiple (Gráf. 39)



Gráfica 39. Deslizamientos rotacionales.
Fuente: Fundamentos de geología.

¹⁰ García, 1986. En III simposio panamericano de deslizamientos

Deslizamiento translacional. Es un movimiento en el cual la superficie de deslizamiento coincide con un plano estructural, un plano de falla geológica, un plano de estratificación, un plano de foliación, una diaclasa, etc. Por la geometría de su plano de deslizamiento se pueden llamar planares, aunque algunos autores¹¹ dejan este término para aquellos cuya superficie de ruptura sigue un plano de discontinuidad litológica como el contacto suelo – roca, roca meteorizada – roca fresca, etc. (Fig. 31)



Figura 31. Deslizamiento planar ocasionado por la ampliación de la vía Cimitarra – Landázuri. Santander.

Fuente: Autor.

Por la dirección en que avanzan los deslizamientos se clasifican como:

Deslizamiento retrogresivo. Es el deslizamiento cuyo sentido de avance es en dirección contraria al movimiento (pendiente arriba). En la figura 32 se puede apreciar la nueva corona que se ha formado en la parte superior



Figura 32. Deslizamiento retrogresivo.

Fuente: Autor.

¹¹ VARGAS Cuervo Germán. Guía técnica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa

Deslizamiento sucesivo. En este caso el deslizamiento avanza en el mismo sentido del movimiento.

Por la profundidad de la superficie de falla los deslizamientos se clasifican como profundos y superficiales. Los deslizamientos profundos tienden a ser bastante lentos ya que su mecanismo de acción está fuertemente asociado a la circulación profunda de aguas subterráneas y sus efectos más severos se observan tardíamente; una vez hacen su aparición grandes grietas el proceso se acelera por el desequilibrio de los materiales y acumulación de agua en las fracturas o en los poros del material expuesto, que hace mucho más pesado al material que se está desplazando.

Cuando los deslizamientos solo incluyen suelo; es decir son superficiales, se deben especialmente a precipitaciones fuertes y constantes que en el caso de suelos arcillosos los saturan rápidamente aumentando el nivel de agua y su peso, que a su vez aumentan la fuerza gravitacional actuante y producen el movimiento poco tiempo después de que el mecanismo de activación haya actuado.

Dinámica de los deslizamientos

Los deslizamientos suelen suceder por etapas, la primera etapa es conocida como de pre-fallamiento y se caracteriza por una superficie de falla sobre la cual los esfuerzos cortantes alcanzan los máximos valores, en la segunda etapa denominada fallamiento los esfuerzos cortantes comienzan a exceder la resistencia al corte en zonas aisladas; cuando estas zonas comienzan a crecer más y más la superficie de falla se activa y la masa de suelo se mueve pendiente abajo con grandes desplazamientos; este es el momento en que sucede el primer deslizamiento y podría ser por un corto o largo periodo de tiempo, dependiendo de la velocidad del fenómeno de movilización de los esfuerzos cortantes. En la tercera etapa o de post-fallamiento las masas de suelo deslizantes continúan su movimiento, en algunos casos aún con cierta velocidad; durante esta etapa los valores de los esfuerzos cortantes decrecen, una vez se alcanza la etapa de equilibrio el movimiento se detiene.

9.2.3 IMPACTOS AMBIENTALES DE LOS FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

Los Fenómenos de Remoción en Masa (FRM) afectan los siguientes aspectos del medio ambiente: Topografía y morfología, ríos, valles, vegetación, grasslands y los hábitats de la fauna nativa.

9.2.3.1 EFECTOS SOBRE LA TOPOGRAFÍA Y LA MORFOLOGÍA

La topografía y la morfología de la superficie terrestre están siendo continuamente modificadas por los fenómenos de remoción en masa. Los más grandes deslizamientos generalmente son causados por terremotos y volcanes, aunque una pluviosidad regional muy fuerte también puede originar FRM. La mayoría de FRM están relacionados con actividades humanas, especialmente la construcción de obras civiles como carreteras y represas.

Un gran deslizamiento puede estar conformado por cientos de pequeños deslizamientos que modifican la topografía haciéndola más abrupta y exponiendo superficies a la acción de la erosión.

9.2.3.2 EFECTOS SOBRE LOS LECHOS DE LOS RÍOS

Los principales FRM que afectan los lechos son los flujos de detritos, los cuales pueden seguir canales por cientos de kilómetros, transportando gran cantidad de sedimentos de las laderas a los valles aluviales siendo así un factor importante en la acumulación de sedimentos en la cuenca de drenaje¹², además los flujos de detritos afectan espacial y temporalmente la distribución de sedimentos en los valles, debido a que parte del sedimento se queda en los canales o son una fuente de transporte acelerado de sedimento a zonas lejanas corriente abajo. Los deslizamientos rotacionales y los flujos de tierra contribuyen levemente y a largo plazo a los lechos de los ríos con sedimento y material leñoso, bloqueos parciales o constricción local donde el deslizamiento penetra y cambios en la configuración del lecho. Las avalanchas y los flujos de detritos causan gran incremento de sedimentos y material leñoso a corto plazo; adelgazamiento de los canales, redistribución a gran escala de materiales de la carga de fondo que represan y adelgazan los lechos, erosión acelerada de los lechos, cortes en las orillas y alteración de la forma del lecho por obstrucción del flujo. Los flujos de detritos causados por el terremoto de Páez (1994) en el río Páez y sus mayores tributarios los ríos San Vicente y Moras, formaron sobre el río Magdalena a unos 120 Km corriente abajo, nuevas terrazas aluviales de 10 a 40 m de altura encima del nivel del río antes del terremoto.

9.2.3.3 EFECTOS DE LAS REPRESAS POR FRM SOBRE LOS LECHOS Y LOS VALLES

Las represas por FRM se forman en una amplia variedad de marcos fisiográficos, que varían desde avalanchas de rocas en cañones de laderas verticales, valles estrechos hasta fallas en arcillas sensitivas en valles planos. Esas represas naturales varían en altura desde 1m hasta 600 m y sus efectos sobre los lechos y los valles son:

¹² Benda and Dunne, 1987 en III Simposio panamericano de deslizamientos

- Depositación de sedimentos lacustres, aluviales y deltaicos en el lago formado por la represa que varían el gradiente del lecho y la morfología del piso corriente abajo, a partir de la represa.
- Formación de diversos canales corriente abajo a partir de la represa por la introducción de altas cargas de sedimentos por erosión y/o rompimiento de la masa de la represa.
- Deslizamientos secundarios a lo largo de las orillas del lago formado debido al llenado del reservorio o al rápido vaciado cuando la represa natural falla.

El lecho corriente abajo a partir de la represa puede ser impactado por la erosión o por la depositación. Las represas atrapan un altísimo porcentaje de los sedimentos; el agua limpia es liberada en la zona de flujos cargados de sedimentos que existían antes de que se formara la represa. La combinación de agua limpia y un cambiante régimen de flujo causa la erosión del lecho corriente abajo a partir de la represa y una disminución y degradación del fondo del lecho.

Cuando la represa falla, una mayor depositación de sedimentos se deriva de la misma masa de la represa y en ciertos trechos del lecho podría ocurrir erosión.

9.2.3.4 IMPACTOS DE LOS FRM SOBRE LA COBERTURA VEGETAL

Especialmente en las áreas tropicales se ha observado amplia denudación de cobertura boscosa y selvática por FRM inducidos por terremotos. En el caso de Colombia, el terremoto de Páez fue seguido de un largo periodo de lluvias, que saturó los suelos residuales sobre las pendientes fuertes que fallaron como finos deslizamientos y rápidamente se transformaron en flujos de detritos que arrasaron suelo y vegetación en un área de unos 250 Km² de las laderas del valle.

9.2.3.5 IMPACTOS DE LOS FRM SOBRE LA FAUNA SALVAJE

Aunque la mayoría de las especies de la fauna salvaje son capaces de retroceder o de huir lo suficientemente rápido para prevenir daños por los FRM, todas están expuestas a que sus hábitats sean dañados o destruidos. Los peces son quizá los más afectados debido a que ellos dependen de los accesos a las corrientes y de la calidad del agua para su supervivencia y éstas son a menudo afectadas por los FRM. Los peces que viven en los mares pero que ingresan a los ríos a desovar son los más susceptibles porque los FRM pueden obstruir su ingreso.

8.2.6 EJEMPLOS DE FRM EN COLOMBIA

Debido al alto régimen anual de lluvias, la alta topografía y los frecuentes sismos y eventos volcánicos, Colombia tiene una larga historia de Fenómenos de Remoción en Masa. Los siguientes cuatro casos son los más conocidos:

Avenida Torrencial en el nevado del Ruiz

En noviembre de 1985, el volcán Nevado del Ruiz hizo erupción causando un flujo de detritos y lodo (Lahar) que mató a más de 22000 personas. La relativamente pequeña erupción expulsó material que fundió parte de la capa de hielo ubicada en la cima del volcán, generando un lahar que descendió a través del inclinado y estrecho cañón del río a una velocidad aproximada de 50 Km/h.

El flujo principal descendió por el lado oeste del volcán hacia el valle del río Lagunillas destruyendo la población de Armero, departamento del Tolima, más de 20000 personas perecieron y 5000 fueron heridas. El otro lahar descendió por el estrecho cañón del río Chinchiná destruyendo 400 viviendas y causando cerca de 1800 muertes cerca de la población de Chinchiná. Además de las muertes, los lahares destruyeron 5000 viviendas, 343 establecimientos comerciales, 58 fábricas, 50 escuelas, 2 hospitales y enterró 3400 Ha de tierra apta para la agricultura.

La erupción del volcán no fue sorpresa, un año antes la actividad precursora de la erupción alertó a los científicos, que semanas antes de la tragedia habían preparado un mapa de la zona de amenaza que predijo de una manera muy precisa los efectos de la erupción. Las muertes y gran parte de las pérdidas económicas se debieron a negligencia de las autoridades locales y regionales para planear y llevar a cabo un adecuado programa de respuesta a la emergencia.

Deslizamiento en Villa Tina, Medellín

En septiembre de 1987, un pequeño pero sorpresivo y desastroso deslizamiento ocurrió en una zona de riesgo invadida en el sector de Villa Tina, de la ciudad de Medellín. Aunque la superficie de falla estaba solo a 1.0 y 1.5 m de profundidad y el volumen total de material deslizado fue solo de aproximadamente 20000 m³, 80 viviendas fueron destruidas y perdieron la vida 217 personas.

Este deslizamiento fue causado por una ruptura en la red de suministro de agua potable ubicada en la parte superior del deslizamiento.

Deslizamientos Causados por el terremoto de Páez

En junio de 1994, un terremoto de magnitud 6.4 afectó la cuenca del río Páez al occidente del país. Varios poblados a lo largo del río Páez y sus afluentes fueron destruidos por el mismo terremoto o por los deslizamientos que ocasionó; 271 personas murieron, 156 fueron heridas y alrededor de 1700 fueron reportadas como desaparecidas. Además 6 puentes y 100 Km de carreteras fueron destruidos por los flujos de detritos. El terremoto originó deslizamientos por un área de 250 Km² en la cuenca del río Páez, la mayoría de esos eventos se originaron como finos deslizamientos traslacionales (1 a 2 m de espesor) en

suelos residuales y en laderas empinadas ($> 30^\circ$) que se transformaron en flujos de detritos o flujos de suelo que se movieron rápidamente hacia zonas planas dentro del río Páez y sus afluentes, localmente más del 50% de las laderas fueron denudadas. Esos flujos causaron la mayoría de los daños y pérdidas relacionadas con el terremoto.

Deslizamiento en el relleno sanitario Doña Juana, Bogotá, Colombia.

El relleno Doña Juana atiende a la ciudad de Bogotá y en la actualidad recibe del orden de 5000 toneladas diarias de desechos sólidos, se ubica en el municipio de Usme a aproximadamente a 12 Km en línea recta hacia el SW del centro de la ciudad. El 27 de septiembre de 1997, ocurrió un deslizamiento que involucró cerca de 800000 m^3 de basuras de la denominada zona II del relleno, causado por el aumento de las presiones de gas debido al volumen de lixiviado inyectado por recirculación, el cual encontró unos drenajes deficientes e incremento su presión en la base facilitando la falla inicial en el bloque. Las causas de este deslizamiento se clasifican como: causas intrínsecas, causas contribuyentes y causas detonantes.

Una de las causas intrínsecas son la biodegradabilidad de las basuras que consiste en la degradación de la materia orgánica que conduce a su desaparición, a la creación permanente de más vacíos que terminan por colocar al relleno en una condición metaestable, es decir, en una estabilidad no permanente y casi impredecible de un sistema. Otra de las causas es la producción de gas, en donde el gas atrapado se calienta y al no poder salir se presuriza; el relleno queda así inflado como si se tratara de un globo con una burbuja de gas en su interior. En la liberación de agua, la humedad de la basura se libera por la acción bacteriana, parte del agua se aprovecha para las reacciones y el resto queda libre y puede abandonar la estructura sólida de los desechos.

Las causas Contribuyentes son: la recirculación de lixiviados que produce una aceleración de la degradación bioquímica de las basuras y contribuye a generalizar la saturación en el interior del medio poroso, disminuyendo los esfuerzos efectivos. Otra de las causas es la insuficiencia o falla de los drenajes e insuficiencia o falla del sistema de extracción de gases.

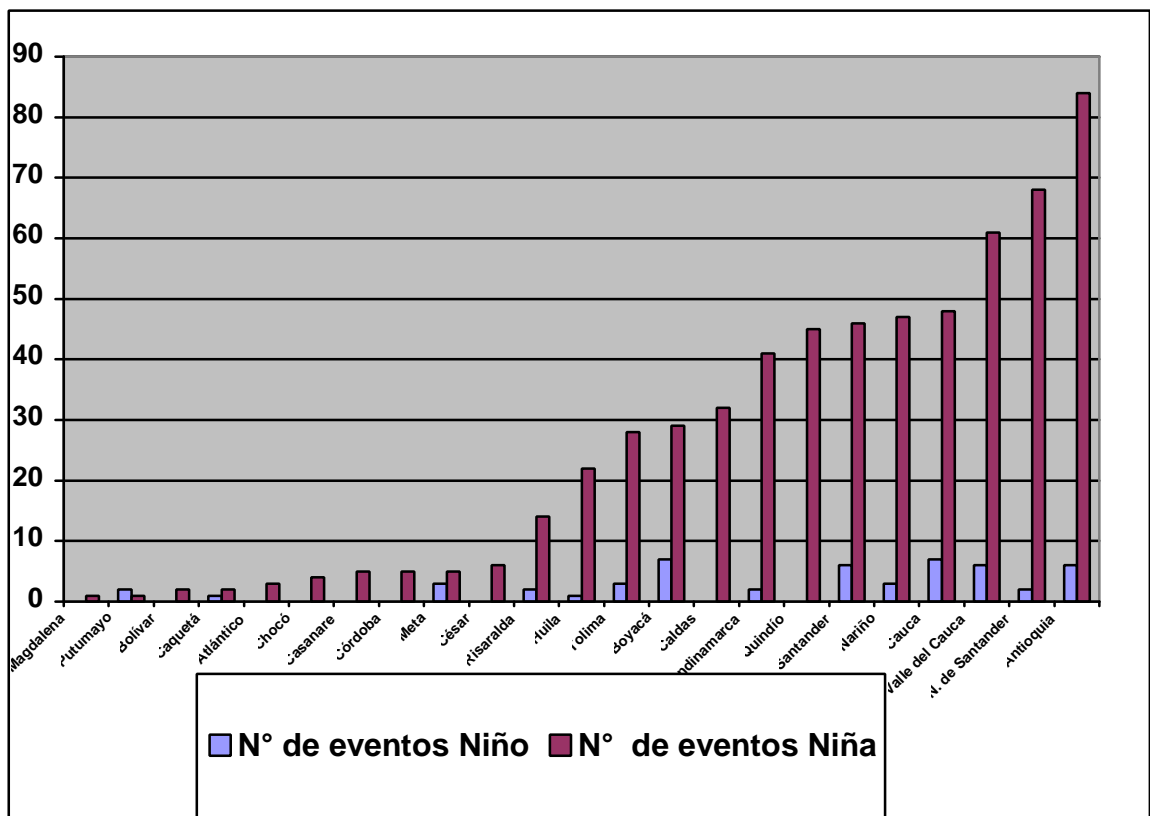
Las causas Detonantes son los excesos de presión de biogas y la recirculación de lixiviados a presión.

9.2.7 LOS FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA Y EL CLIMA EN COLOMBIA

Para establecer esta relación de una manera general se toman como referencia los fenómenos de El Niño y La Niña del Pacífico, estos fenómenos climáticos se

deben a los cambios en la temperatura de las aguas marinas y de los vientos del Océano Pacífico Ecuatorial y producen alteraciones climáticas a nivel local, regional y global. El fenómeno de El Niño se manifiesta en Colombia con un incremento de la temperatura de la superficie del Mar en la zona contigua a la costa sobre el océano Pacífico y un déficit acumulado de la precipitación durante el transcurso del evento ocasionando reducción de la humedad del suelo en todo el territorio nacional, por el contrario el fenómeno de La Niña se manifiesta como una disminución de la temperatura de la superficie del mar y un exceso acumulado de precipitación que aumenta la humedad del suelo.

La gráfica 40, muestra como influyen los cambios climáticos debidos a los fenómenos del Niño y La niña en la intensidad de los FRM, en Colombia



Gráfica 40. Distribución por departamentos de los FRM ocurridos en Colombia durante los fenómenos de El Niño (1997 – 1998) y La Niña (1998 – 2000) del Pacífico.
Fuente: Tomada de III Simposio Panamericano de deslizamientos.

9.3 VOLCANES

Los volcanes son otro tipo de amenaza geológica, en la cual el magma fluye hacia la superficie causando muerte y destrucción. Las erupciones volcánicas pueden ser explosivas o relativamente tranquilas, las primeras se caracterizan por la expulsión violenta de gases y materiales piroclásticos a velocidades muy altas, el otro tipo de erupción consiste en la emisión de lavas incandescentes que se deslizan lentamente, quemando y destruyendo todo lo que encuentran a su paso. Uno de los productos volcánicos más peligroso para los seres humanos son las nubes ardientes o columnas de ceniza, que pueden alcanzar decenas de kilómetros de altura y al colapsar descienden sobre la superficie a velocidades superiores a los 200 Km/h.

9.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS VOLCANES

La clasificación de los volcanes es en cierta manera un elemento primario de predicción de la capacidad destructiva de éstos. Con base en la clasificación se pueden elaborar mapas preliminares de riesgo y diseñar planes de contingencia en caso de erupción, que pueden salvar vidas y propiedades. La clasificación se realiza de acuerdo a la actividad, la forma del volcán y los tipos de erupciones.

9.3.1.1 CLASIFICACIÓN POR ACTIVIDAD

De acuerdo al grado de actividad los volcanes se clasifican como activos, dormidos y extintos.

Volcanes activos. Son los que actualmente se encuentran activos o se tienen registros históricos de actividad.

Volcanes dormidos. Son volcanes que actualmente no presentan actividad ni se posee registro histórico de ésta, pero existen evidencias de actividad en tiempo geológico reciente. Este tipo de volcanes son los más peligrosos ya que se pueden reactivar en cualquier momento y no se tiene una idea clara de su comportamiento.

Volcanes extintos. Son aquellos de los cuales no existen evidencias de actividad en tiempo geológico reciente.

9.3.1.2 CLASIFICACIÓN POR LA FORMA DEL VOLCÁN

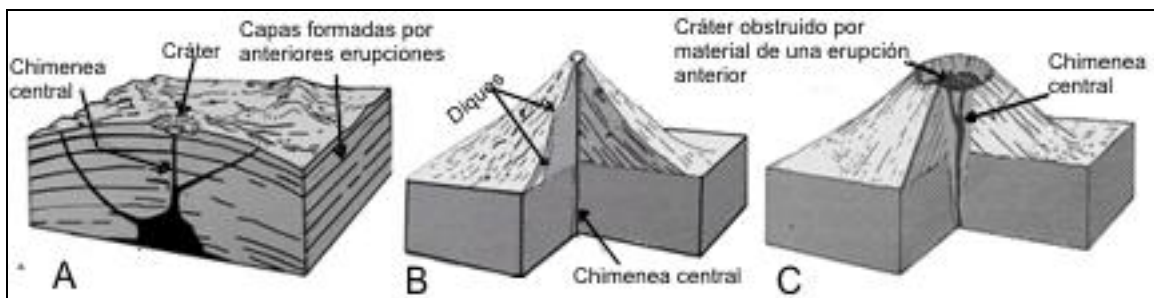
La forma del volcán es el resultado del tipo de erupciones y clasifican así:

Volcán Hawaiano o de escudo (Gráf. 41A). Este tipo de volcán se caracteriza por sus pendientes relativamente suaves y su poca altura, generalmente la lava es

basáltica y fluye lentamente por sus laderas. Un ejemplo son los volcanes de Hawai.

Volcán compuesto (Gráf. 41B). La altura del cono y la pendiente son mayores que las de los hawaianos y lanzan material compuesto de lava y fragmentos piroclásticos. Son muy comunes en las zonas de subducción o zonas convergentes.

Volcán de cono (Gráf. 41C). La alta viscosidad de la lava no le permite fluir muy lejos de la chimenea y solidifica alrededor de ésta como un domo, usualmente con una cima muy irregular con un cráter muy diferente a otros conos volcánicos.



Gráfica 41. Clasificación de los volcanes por la forma. A: Volcán de escudo, B: Volcán compuesto, C: volcán de cono.

Fuente: Las iras de la tierra.

9.3.1.3 CLASIFICACIÓN POR EL TIPO DE ERUPCIÓN

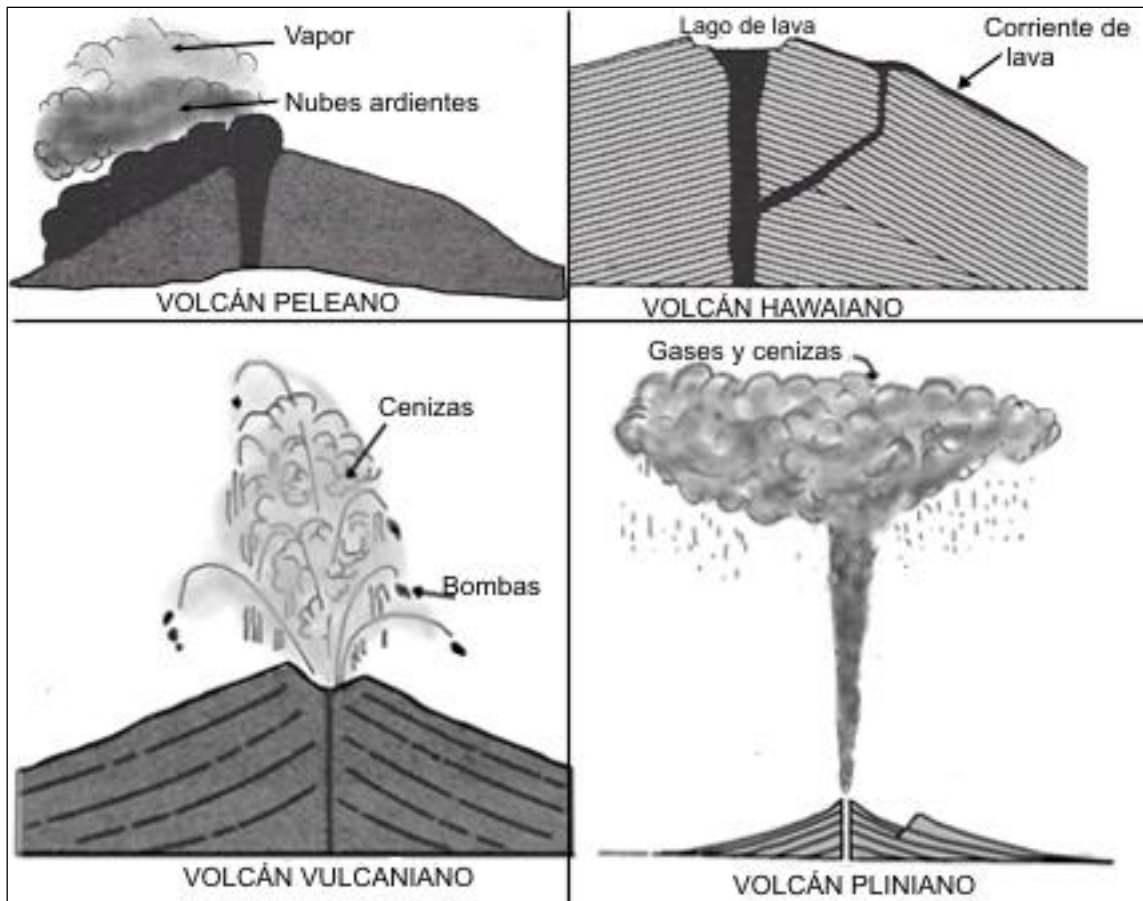
Esta clasificación se realiza con base en la explosividad y el tipo de material eruptado:

Volcán Hawaiano. La lava es de tipo basáltica y sale con relativa tranquilidad a través de fisuras de pocos kilómetros o por una chimenea central, los gases son liberados sin violencia. En algunos casos cuando el magma se pone en contacto con el agua, la capa freática o más raramente el océano, se producen poderosas explosiones como la sucedida en 1964 en Islandia, cuando el volcán Surtsey inició una erupción que se preveía tranquila pero cuando el agua del mar penetró en el depósito de magma, se produjo una terrible explosión que construyó una isla con una morfología semejante a la de muchos volcanes explosivos.

Volcán tipo Stromboliano. La erupción en este tipo de volcán es explosiva de baja a media intensidad, lanza al aire lava incandescente y fragmentos de corteza terrestre debido a que después de cada erupción la chimenea central se tapona.

Volcán tipo Vulcaniano. Después de cada erupción la chimenea central se tapona, haciendo que las erupciones sean menos frecuentes, pero cuando la presión

magmática aumenta se produce una poderosa explosión que lanza fragmentos del cráter principal, junto con escoria, pumita, cenizas y bombas.



Gráfica 42. Clasificación de volcanes de acuerdo al tipo de erupción.
Fuente: Las iras de la tierra.

Volcán tipo Pliniano. Su erupción es explosiva y forma una inmensa columna de gas y material piroclástico que puede alcanzar los 50 y 60 Km de altura. El colapso de esta columna forma flujos piroclásticos que descienden a velocidades mayores a 200 Km/h y destruyen o calcinan todo a su paso. Un ejemplo muy conocido de este tipo de erupción es la que en el año 79 de nuestra era, destruyó y sepultó las ciudades de Pompeya y Herculano, junto con muchos de sus habitantes.

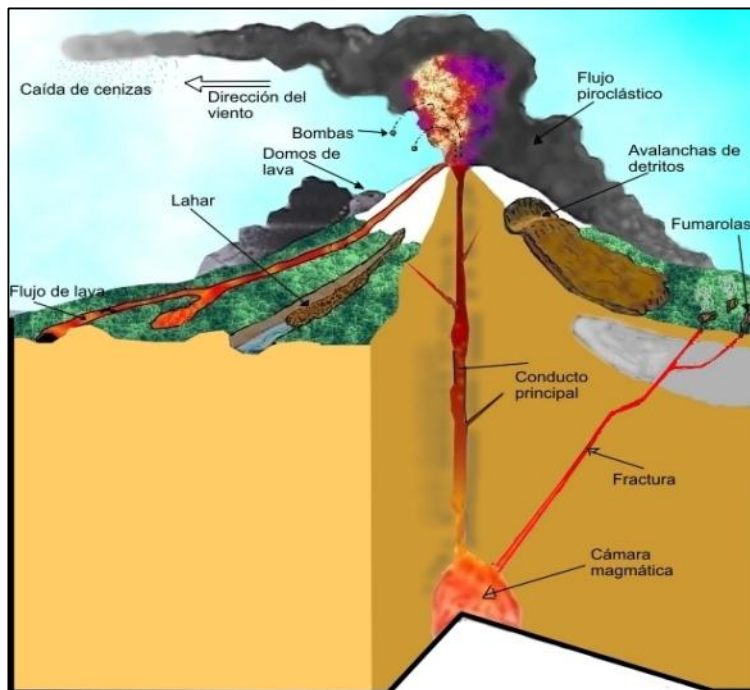
Volcán tipo Peleano. Toma su nombre del volcán ubicado en la isla de Martinica, que en 1902 con sus nubes de ceniza ardiente y flujos piroclásticos destruyó la ciudad de Sant Pierre, matando a más de 29000 personas.

Volcán tipo Krakatoano. Es el tipo de volcán más explosivo, lanza grandes cantidades de ceniza y fragmentos de la corteza terrestre dejando un inmenso cráter. Toma su nombre del volcán Krakatoa de Indonesia, que en 1883 hizo

erupción en una formidable explosión que destruyó la isla que había formado. Un ejemplo más cercano en el tiempo es el volcán Santa Helena en Estados Unidos, que hizo erupción en 1980, después de 120 años de inactividad y a pesar de todas las previsiones los flujos piroclásticos, flujos de lodo e inundaciones mataron a 64 personas, destruyeron 100 casas y ocasionaron daños por 3000 millones de dólares. Las violentas erupciones de estos dos volcanes estuvieron relacionadas con el contacto de agua con los depósitos magmáticos.

9.3.2 PRODUCTOS VOLCÁNICOS Y SUS AMENAZAS

Se entiende por productos volcánicos no solamente a los materiales expulsados por el cráter o las fumarolas, sino también a los fenómenos que causan las erupciones tales como lahars, inundaciones y deslizamientos. (Gráf. 43)



Gráfica 43. Volcán y sus productos.

Fuente: modificado de Investigations in environmental geology.

Avalanchas de detritos. Se producen por falla de las zonas altas de las laderas del volcán, a veces suceden sin necesidad de una erupción, en laderas de fuerte pendiente compuestas de rocas débiles o alteradas termalmente. Grandes deslizamientos se han extendido hasta 45 Km valle abajo.

Flujos piroclásticos. Suceden directamente por la erupción de fragmentos de roca caliente o por la explosión o colapso de flujos de lava o domos. Fragmentos de ceniza transportados en nubes ricas en gases descienden sobre la superficie con velocidades que pueden superar los 200 Km/h. Los efectos se pueden extender 40 Km ladera abajo y hasta 65 Km en los valles. Muchos Kilómetros de áreas adyacentes podrían ser afectados por nubes de ceniza ardiente.

Explosiones laterales y fuentes piroclásticas. Eyecciones explosivas de roca en un costado débil del volcán moverían detritos a velocidades de cientos de Km/h.

Flujos de lava. En las erupciones no explosivas la lava ardiente fluye lentamente ladera abajo a velocidades que no superan la velocidad de una persona caminando. Los flujos de lava son orientados por la topografía y llegan no más allá de los 10 Km del cráter.

Domos de lava. Resultan de acumulaciones de lava muy viscosa no explosiva que se acumula encima de las chimeneas.

Lahares. Se producen por la erupción de materiales calientes sobre hielo y nieve o en ríos, por erupción de lagos volcánicos o por caída de fuertes lluvias sobre recién expulsados materiales piroclásticos. Se desplazan por valles o cuencas que limitan con volcanes y pueden alcanzar sitios a decenas de kilómetros como lo sucedido en el municipio de Armero – Colombia.

Inundaciones. Tienen un origen similar al de los lahares, aunque se desplazan mucho más lejos y a mayor velocidad.

Caída de cenizas. Se producen por efecto del viento que arrastra nubes de materiales piroclásticos y gases, por grandes distancias. Pueden impactar áreas cercanas y lejanas del volcán dependiendo del volumen de la erupción, altura, velocidad y dirección del viento.

Gases. Son producidos en toda clase de erupción, normalmente contienen sulfuros y dióxido de carbono y otros compuestos perjudiciales. Cerca al volcán su impacto consiste en olor y neblina, pero pueden ser arrastrados a cientos de km por el viento y en muy grandes cantidades podrían alterar el clima global.

9.3.3 PREDICCIÓN DE ERUPCIONES VOLCÁNICAS

La predicción de erupciones volcánicas aún no es muy precisa, aunque existen diversos eventos físicos observables que preceden a una erupción. Los siguientes fenómenos normalmente pueden ser observados antes de una erupción:

Actividad sísmica. Las erupciones volcánicas a menudo son precedidas de sismos, a veces hasta cientos por semana, producidas por el ascenso del magma hacia la superficie, éste inicialmente se almacena en ciertos lugares creando las cámaras magmáticas, cuando estas burbujas alcanzan diámetros de alrededor de un kilómetro comienzan a abrirse camino a la fuerza; fracturando las rocas y precipitándose hacia los espacios creados, separando los bordes y ensanchando las fisuras, creando fisuras nuevas.

Los sismos más interesantes para la predicción de erupciones son los llamados tremors o vibraciones armónicas, cuyos trazos en el sismograma difieren de los demás y son los eventos sísmicos que normalmente preceden a las erupciones. Los tremors son vibraciones casi periódicas con frecuencia única y constante que se producen durante 10 a 30 minutos, incluso hasta más y se detienen con brusquedad.

Deformación de la superficie. El acercamiento del magma a la superficie produce movimientos del suelo, presentándose abultamientos y hundimientos de la superficie del volcán. Esta técnica de previsión de erupciones necesita practicarse durante mucho tiempo, en periodos de calma para saber si el volcán se deforma por si mismo o debido a empujes profundos.

Cambios en la actividad térmica y las propiedades magnéticas, eléctricas y gravitacionales. El ascenso del magma hasta rocas cercanas a la superficie hace que estas se calienten y se incremente la actividad de las fumarolas y el cráter principal y varíen las propiedades eléctricas y magnéticas. El reemplazamiento de rocas por el ascendente y menos denso magma causa un ligero pero detectable cambio en la medida del campo gravitacional.

Cambios en la cantidad y composición química de los gases. Los gases emitidos por un volcán pueden mostrar cambios en cantidad de burbujas de gas emitida por las fumarolas y cambios en las cantidades de dióxido de carbono y dióxido de sulfuro, cuando la erupción es inminente.

10. GEOMORFOLOGIA

La Geomorfología es el estudio de los rasgos superficiales de la corteza terrestre o geoformas producto de procesos físicos y químicos, que operan cerca o sobre la superficie. De la misma manera que otras ciencias, la geomorfología depende de la aplicación de los principios básicos de la química, física y la biología y se apoya en otras ciencias como la hidrología, climatología, glaciología, estadística, geografía, edafología, etc.

La topografía terrestre es una mezcla de geoformas que se están formando o se formaron en el pasado, por lo cual la geomorfología incluye la investigación tanto de los mecanismos de los procesos modernos como de la influencia del tiempo geológico. El origen de las geoformas puede estar relacionado con un proceso geológico particular o a un conjunto de procesos y de esta manera es posible que las geoformas actuales pasaran por una secuencia de formas de características diferentes, en etapas sucesivas¹³

La mayor parte de los procesos que intervienen en el origen y evolución de las geoformas son considerados amenazas geológicas y naturales, como por ejemplo lo son los terremotos, volcanes, deslizamientos, erosión, inundaciones. Por esta razón, la geomorfología juega un papel importante en la ciencia ambiental, puesto que la correcta identificación de las geoformas de un área determinada suministra información necesaria para la prevención de desastres que puedan afectar poblaciones. También la información se puede utilizar para determinar el correcto uso del suelo, ubicación y diseño de acueductos, carreteras, alcantarillados y todas las obras de infraestructura que tiendan a mejorar el nivel de vida de los seres humanos.

10.1 PROCESOS QUE INTERVIENEN EN LAS FORMAS DEL RELIEVE

Las formas del relieve tienen su origen en el constante accionar de procesos endógenos y exógenos sobre la superficie terrestre.

10.1.1 PROCESOS ENDOGENOS

Se consideran procesos endógenos a los eventos tectónicos o volcánicos que originan escarpes de falla, pliegues, conos volcánicos, además de otras geoformas.

- a. La orogénesis o conjuntos de procesos que da origen a cordilleras, plegamientos y/o fracturación de masas rocosas, solevantamiento, hundimiento, etc.

¹³ Davis, 1909, en Surface processes and Landforms

- b. Fragmentación y tectónica de placas.
- c. Expansión de los fondos oceánicos a partir de los “rifts”.
- d. El volcanismo.
- e. Los movimientos sísmicos o terremotos.
- f. Metamorfismo de las rocas.

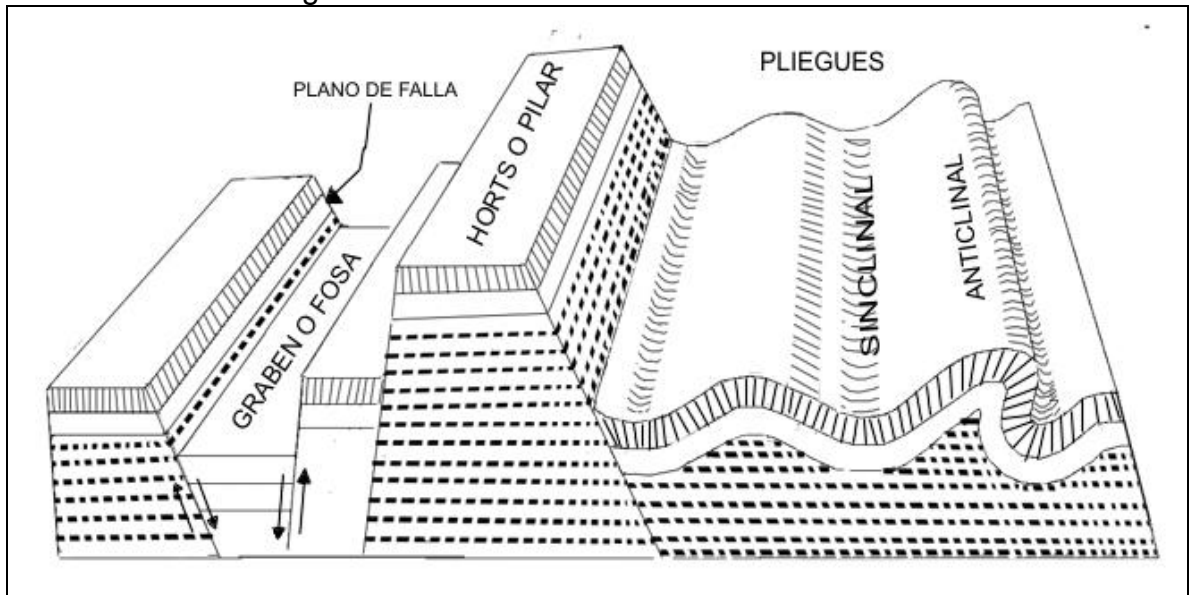
10.1.2 PROCESOS EXOGENOS

Los procesos exógenos son aquellos que dependen principalmente de los factores atmosféricos.

- a. Meteorización de las rocas.
- b. Fenómenos de Remoción en masa.
- c. La erosión.

10.2 GEOFORMAS PRIMARIAS

A este grupo de geoformas corresponden aquellas directamente relacionadas con procesos endógenos como los pliegues, escarpes de falla, horts, graben y otros como los muestra la gráfica 44.



Gráfica 44. Geoformas originadas por procesos endógenos.

Fuente: modificada de Geomorfología Aplicada.

10.3 GEOFORMAS ORIGINADAS POR EROSIÓN FLUVIAL O ALUVIAL

La erosión fluvial o erosión de corrientes produce muchos tipos de formas de valles; la mayoría de los cuales exhibe aspectos topográficos que revelan la litología, estructura geológica, erosión y la historia geomorfológica. Las formas de los valles más conocidas son:

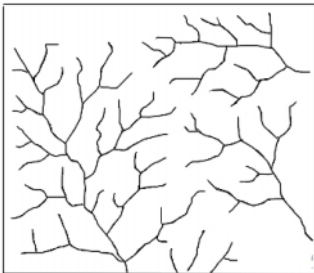
Valles en forma de “cuna o comedor”. Valles amplios, suavemente empinados y poco profundos, donde la escorrentía se concentra en un solo cauce y cualquier fuerza erosional es baja o la proporción de acumulación es más grande que la proporción de degradación.

Valles en forma de “V”. En la forma lisa, presenta erosión vertical a lo largo de las pendientes del valle principal y la acumulación al fondo de las pendientes del valle es o ha sido considerable. Este tipo de valle puede desarrollar formas asimétricas o simétricas. La asimetría puede ser causada por diferentes tipos de rocas y/o la estructura de la roca en cualquier lado del valle, también puede ser causada por la influencia de la erosión diferencial sobre los estratos verticalizados y la exposición hacia el sol o la dirección del viento dominante y movimientos tectónicos. La forma simétrica se desarrolla si las causas anteriores son insignificantes o tienen influencia igual en ambos lados del valle.

Valles en forma de “U”. Esta forma se presenta debido a una pausa después de un periodo de erosión vertical fuerte debido a que el río ha seguido una fractura desconectada o se ha detenido al alcanzar roca dura, reduciendo la proporción de erosión vertical. Normalmente la forma U está en parte rellena con sedimento.

10.3.1 PATRONES DE DRENAJE

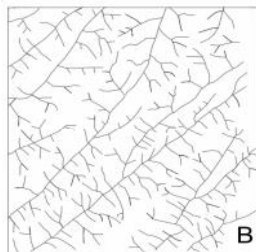
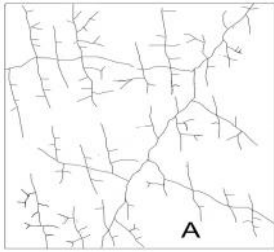
El patrón de drenaje es un agregado de formas del drenaje en un área, caracterizado con base en parámetros morfométricos. El sistema de drenaje en un área es controlado por la inclinación principal del terreno, tipo y estructura geológica de la roca subyacente, el tipo y densidad de la vegetación y las condiciones climáticas. Las corrientes que forman los sistemas de drenaje según el método de Horton modificado por Strahler (1952), se clasifican de la siguiente manera: las corrientes de primer orden son las más pequeñas y no tienen ningún tributario, las de segundo orden son las formadas por la unión de las de primer orden y así sucesivamente hasta llegar a la corriente principal. Los siguientes patrones de drenaje son los más comunes.



Dendrítico. Este patrón de drenaje indica homogeneidad en la roca subyacente y la ausencia de control estructural, generalmente se forma sobre rocas sedimentarias de estratificación horizontal o rocas ígneas o metamórficas masivas. Se caracteriza por las corrientes ramificadas en ángulos agudos semejantes a las ramificaciones de un árbol.

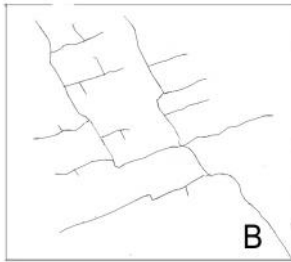
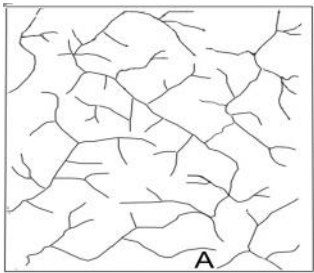


Paralelo. Formado por corrientes casi paralelas, cuyo curso es usualmente controlado por algún tipo de pendiente regional o por rasgos topográficos paralelos o subparalelos. Generalmente indica pendientes moderadas a fuertes pero también se puede encontrar en áreas de geoformas paralelas y elongadas. Es posible una transición entre este patrón, los dendríticos y trellis.



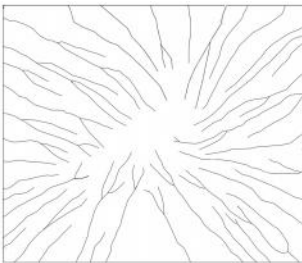
Trellis de diaclasas (A), Trellis de fallas (B). Se forma sobre rocas sedimentarias, volcánicas y metasedimentarias de bajo grado inclinadas o plegadas, áreas de fracturas paralelas, pisos lacustres o marinos surcados por barras de playa. Puede convertirse en un drenaje paralelo. Este patrón se reconoce porque cada

uno de los pequeños tributarios es más o menos del mismo tamaño que el del lado opuesto a lo largo de las corrientes paralelas subsecuentes.



Rectangular (A) y Angular (B). Este patrón de drenaje es un buen indicador de sistemas de fracturas en rocas, usualmente se forma sobre rocas ígneas diaclasadas, sobre rocas sedimentarias horizontales con un sistema de diaclasas bien desarrollado o sobre

fallas que se interceptan. No son repetitivos como los patrones trellis, las corrientes y divisorias no presentan continuidad regional.



Radial. Consiste en corrientes que fluyen desde un área central en todas las direcciones, usualmente se forman sobre superficies altas y recién formadas como conos volcánicos y domos estructurales o intrusivos.

10.4 GEOFORMAS PRODUCTO DE PROCESOS DE SEDIMENTACION

Los procesos de sedimentación son procesos agradacionales o constructivos, en los cuales las corrientes depositan materiales en zonas depresionales y planas.

Las fuentes de estos materiales son los detritos y solutos proporcionados por los procesos de pendiente, los sedimentos desprendidos del propio lecho del río, los derrubios y material vegetal producidos por la erosión y la remoción en masa de las bancas u orillas de su cauce, los depósitos retrabajados de terrazas y planos inundables, los detritos producidos por acción glacial, la carga de desechos minerales y orgánicos que el hombre arroja a las corrientes y los materiales eólicos que caen directamente sobre las corrientes.

Los anteriores productos comprenden: bloques de roca, cantos rodados, gravas, arenas, limos, arcillas, material vegetal, coloides orgánicos, cenizas y solutos.

Durante el transporte estos materiales no solo pierden tamaño y se modifican, sino que también son sorteados por tamaño, forma y densidad. La carga de sedimentos en una corriente es acarreada en diferentes formas:

- a. Flotación: materiales de baja densidad.
- b. Solución: Sales.
- c. Suspensión: Limo, arcilla.
- d. Saltación: Arenas.
- e. Tracción y rodamiento: arenas, gravas, cantos carga de lecho.

La naturaleza de la sedimentación fluvial y las características morfológicas de las geoformas resultantes dependen de:

- a. La carga de sedimentos.
- b. Extensión y naturaleza del área de captación.
- c. Régimen hidrológico.

10.4.1 VALLE ALUVIAL (Llanura aluvial)

En este caso se considera como valle aluvial al área influenciada por los aportes longitudinales de sedimentos transportados por el río principal, los cuales pueden encontrarse dispuestos en un solo plano o en varios niveles de terrazas cuyos escarpes y taludes siguen una dirección paralela a la del valle. Los aportes de sedimentos de pequeña magnitud hechos por riachuelos o arroyos, escurrimiento difuso y/o reptación también son tenidos en cuenta.

Características morfológicas

Plano inundable, con su vega (playones e islotes). Es la zona periódicamente inundable que cede y recibe continuamente aluviones de lecho (cantos, gravas y arenas) impidiendo el desarrollo de suelo y vegetación.

Sobrevega. Es ligeramente más elevada que la vega y solo ocasionalmente inundable, la cual favorece los procesos pedogenéticos y el desarrollo de una adecuada cobertura vegetal.

Terrazas. Son remanentes de antiguos niveles de sedimentación. Cada nivel de terraza está separado de otro por escarpes verticales a subverticales en los que afloran las capas de sedimentación.

10.4.2 LLANURA ALUVIAL DE PIEDEMONTE

Se extiende al pie de sistemas montañosos, serranías, y escarpes de altiplanicies, formada por la sedimentación de las corrientes de agua que emergen de los terrenos más elevados hacia las zonas más bajas y abiertas.

Cono de deyección. La superficie forma un segmento de cono, con pendiente recta de mayor ángulo que la del abanico aluvial (20%) en el cual la masa de materiales aluviales es espesa, de granulometría gruesa (cantos, graves y arena) y poco sorteada.

Abanico aluvial. Superficie de forma semicircular semejante a la de un abanico.



Del ápice hacia la base, el abanico es cruzado por un patrón de drenaje distributivo más superficial y difuso en los depósitos más jóvenes y más incisado y denso en las geoformas más antiguas. (Fig. 33)

Figura 33. Abanico aluvial.
Fuente: Surface processes and landforms.

10.4.3 LLANURA ALUVIAL DE RÍO TRENZADO

Un río trenzado es aquel cuyo lecho mayor se divide en varios canales menores que sucesivamente se bifurcan y se reúnen aguas abajo, separados por numerosos islotes y playones llamados en conjunto barras de cauce (Fig. 34). Estas son producto del mismo río y están compuestas en su mayor parte por sedimentos de lecho (cantos, gravas y arenas) los que por su volumen y peso solo son arrastrados o movidos a trechos durante las crecidas. Los materiales finos son atrapados y retenidos en la superficie cuando descienden las aguas de inundación.



Los ríos trezados presentan un lecho de amplitud variada a todo lo largo de su curso, con sucesivos estrechamientos y ensanchamientos, además de barras de cauce los ríos trezados presentan uno o más niveles de terrazas que pueden ser deposicionales o erosionales.

Figura 34. Trecho del río Chicamocha que corresponde a la llanura aluvial de río trezado.

Fuente: Autor.

Condiciones para la formación de un río trezado.

- Pendiente longitudinal suficientemente inclinada.
- Sobreprovisión de carga de lecho y en suspensión.
- Un caudal con fluctuaciones extremas.
- Márgenes fácilmente erosionables.
- Valle ubicado entre zonas montañosas.

10.4.4 SISTEMAS DE RÍOS MEÁNDRICOS

Los ríos rara vez siguen una dirección por tramos mayores a unas diez veces la amplitud de su canal, generalmente presentan un curso sinuoso y en los tramos del curso donde las curvaturas presentan simetría y una relación longitud sobre distancia recorrida mayor de 1.5, se considera que el río es meándrico.

La tendencia de un río a seguir un camino sinuoso está relacionada con:

- Puntos duros. Materiales resistentes a lo largo de las orillas que desvían el flujo del agua.
- Efectos de los tributarios. La corriente de un tributario tiende a desviar la corriente principal.
- Factor hemisférico. Este factor está relacionado con la rotación de la tierra y tiene mayor influencia en las zonas planas.
- Disminución del gradiente o reducción la fuerza de corte lineal, la corriente transcurre más lenta y sigue las depresiones irregulares del terreno.

Llanura aluvial meándrica

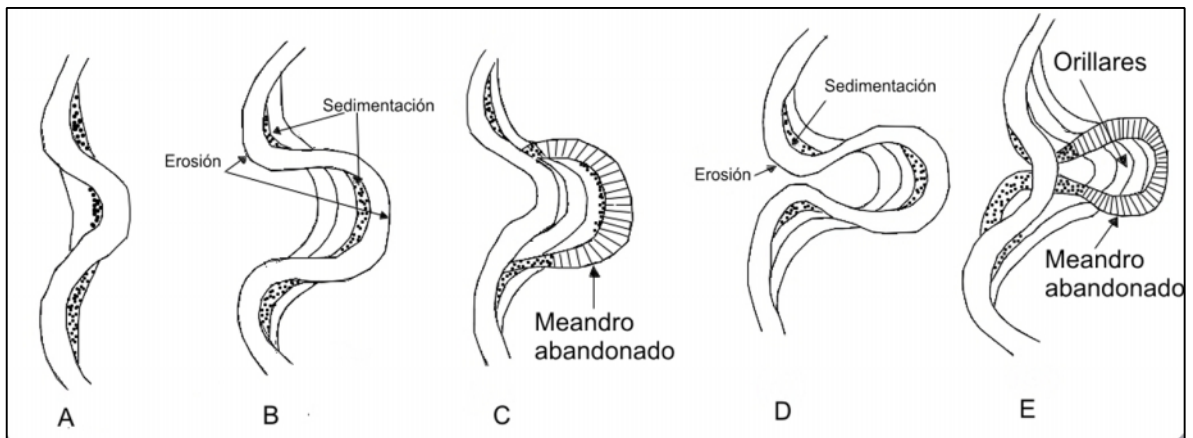
Esta geoforma se ubica a considerable distancia de áreas de erosión como cordilleras, serranías, altiplanicies o en la llanura intramontana enmarcada por vertientes estables y escasamente erosionables. La pendiente longitudinal de estos ríos es muy suave (1%), los sedimentos en suspensión son escasos y las aguas tienden a ser claras.

El proceso de meandrificación se desarrolla mediante erosión y sedimentación simultáneas. En todo meandro se originan dos componentes de la corriente, uno que se lanza con fuerza hacia la orilla cóncava y el otro débil que se dirige hacia la orilla convexa (interna), produciendo erosión y sedimentación, respectivamente. Los sedimentos erosionados en la orilla externa se depositan en la orilla interna del siguiente. Los rasgos morfológicos son:

Plano inundable. Es la zona sujeta a inundaciones periódicas u ocasionales en la cual se observan:

- Orillares o barras de meandro. Geoformas cóncavo-convexas, alargadas y curvadas, a modo de patrones de surcos y camellones de diversa amplitud y nivel que se forman en la orilla interna de los meandros. Después de las inundaciones los surcos presentan aspecto de pantanos estrechos y alargados.
- Meandros abandonados. Inicialmente contienen agua constituyen lagunas, pero luego de sucesivas inundaciones se van llenando de aluviones finos convirtiéndose en pantanos, hasta que finalmente se transforman en meandros colmatados. La gráfica 45, presenta el proceso de formación y abandono de meandros, en el caso C, el río acorta camino y deja abandonado un meandro abierto y en el caso E, el río rompe el cuello dejando abandonado un meandro en forma de herradura. Posteriormente los sedimentos se acumulan en la entrada al meandro, lo cual termina por aislarlo superficialmente del río
- Sobrevega. Es la unidad más sobresaliente del área inundable, localizada de manera discontinua sobre las márgenes. Se forma por acumulación de sedimentos del río y por aportes coluvio-aluviales procedentes de los escarpes y taludes de terrazas adyacentes.

Terrazas deposicionales. Se originan por descensos en el nivel base de erosión, ya sea por ascensos diastróficos regionales por incidencia climática global. Cada nivel de terraza se encuentra separado del otro por taludes verticales a subverticales.



Gráfica 45. Proceso de formación y abandono de meandros.

Fuente: modificado de Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos.

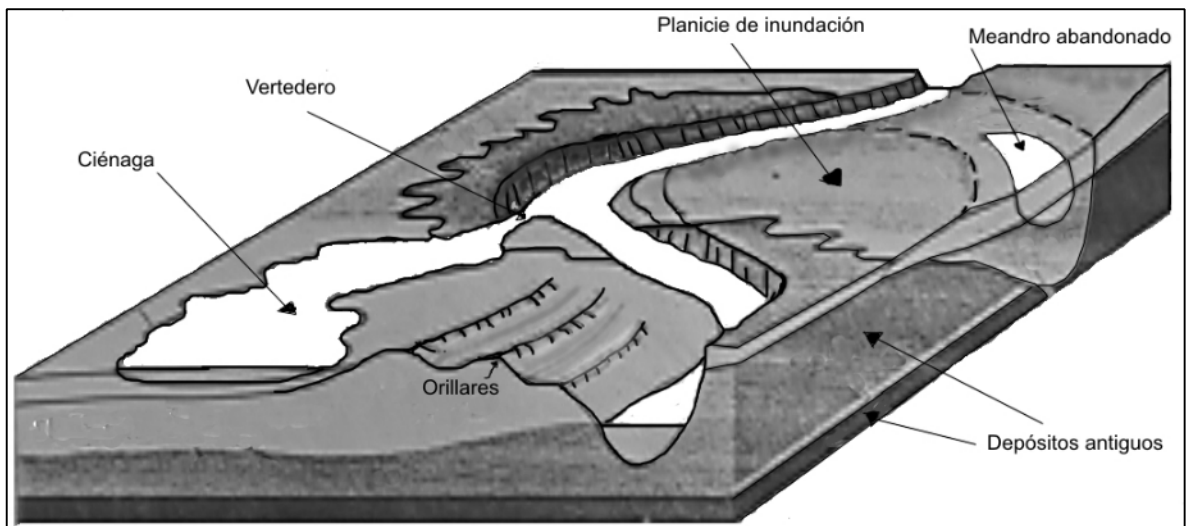
Llanura aluvial de desborde y llanura fluvio-deltaica

Son construidas por ríos de pendiente menor de 1% y se ubican entre cordilleras o después de las llanuras de piedemonte. Las corrientes reciben una elevada carga de sedimentos en suspensión y de lecho (arenas y pocas o ningunas gravas). Cuando el proceso de sedimentación prevalece en grado medio sobre el erosivo se forma una llanura de desborde y si prevalece en grado alto se tiene una llanura fluvio-deltaica.

Llanura aluvial de desborde

La corriente que rebosa las orillas del río durante la crecida extiende láminas de agua hacia la llanura produciendo una sedimentación diferencial de su carga en suspensión. El material mas grueso se deposita cerca de las orillas formando diques naturales; los sedimentos de menor tamaño se depositan un poco más lejos de las orillas formando las napas y los sedimentos más finos se extienden y decantan sobre la porción más amplia y cóncava de la llanura formando el basín o zona de estancamiento de aguas (ciénaga).

Mientras el nivel de las aguas permanece a baja altura las corrientes tienden a desarrollar el proceso de meandrificación. La corriente que golpea en la orilla externa del meandro con frecuencia rompe el dique formando una salida del agua hacia los basines durante posteriores crecidas. Estas aberturas son conocidas como vertederos (Gráf. 46).



Gráfica 46. Llanura aluvial de desborde.

Fuente: Surface processes and landforms.

Llanura fluvio- deltaica

Se forman cuando el proceso de sedimentación prevalece en grado alto sobre el erosivo. Esto sucede cuando el agua que sale del río a través de los vertederos, extendiéndose sobre ciénagas con aguas estancadas perdiendo velocidad y depositando su carga en suspensión, originando una serie de brazos deltaicos dentro de la ciénaga mayor, conocidos como deltas de explayamiento.

10.5 GEOFORMAS DE ORIGEN MARINO

Estas geoformas ocurren por procesos erosivos y de depositación relacionados con los movimientos de la línea de costa. Estos movimientos son las transgresiones o avances del mar sobre el continente y las regresiones o retiro del mar del continente, que suceden durante largos periodos de tiempo. También los movimientos ocasionados por las mareas lentamente dan lugar a geoformas de gran importancia ambiental.

10.5.1 GEOFORMAS POR TRANSGRESIONES Y REGRESIONES MARINAS

Las geoformas originadas por transgresiones y regresiones marinas dan lugar a una variada morfología costera, cuyas características dependen del evento y de la geomorfología de la zona invadida

Costas de inmersión

Una transgresión marina en una zona montañosa o de colinas con valles fluviales o glaciáricos origina una costa recortada por bahías, enseñas, estuarios,

fiordos, radas, etc. Si la transgresión se presenta en una región de llanuras origina golfos muy amplios; a veces pantanosos.

Costas de regresión

Se originan por el retiro del mar que deja una superficie lisa, con huellas de formación de barras de playa.

Costas neutrales

Estas costas no dependen de regresiones o transgresiones sino de procesos continentales fluviales, fluvio-marinos, volcánicos y biológicos. De acuerdo al proceso dominante se les denomina costas de abanicos, costas de deltas, costas volcánicas y costas de arrecifes.

Costas falladas

Se originan a partir de una falla, con hundimiento del bloque frontal. El escarpe de falla configura un acantilado muy regular.

10.5.2 GEOFORMAS POR EROSION Y SEDIMENTACION MARINA

Las costas son rápidamente modificadas por procesos de erosión y sedimentación fluvio-marina y marina. Los principales agentes de estos procesos son: las olas, corrientes de marea, corrientes costeras corrientes fluviales y el viento.

Erosión y geoformas

El principal agente de erosión costera es el oleaje. Las corrientes de marea y litorales (costeras) ejercen una acción no muy significativa. Las olas son el movimiento ondulatorio de la superficie del mar, producido principalmente por el viento. En la ribera marina ese movimiento ondulatorio se perturba y se transforma en una translación dirigida hacia la costa, que primero presiona sobre el fondo y luego se revienta o rompe con una fuerza muy grande, especialmente durante las tempestades, dando origen a erosión directa y remoción de detritos, desde los acantilados y costas montañosas o colinadas sumergidas. La morfología de las costas depende de la litología.

Los acantilados escarpados se forman a partir de rocas poco coherentes o de rocas duras que suprayacen a rocas blandas. Las olas socavan la base ocasionando deslizamiento o desplome de bloques. El material más fino es arrastrado por efecto de corrientes de deriva litoral y las corrientes de marea.

A medida que retroceden los acantilados, se forman arcos, pilares, curvas, hendiduras, etc, a la vez que se forma una plataforma de abrasión sobre la cual

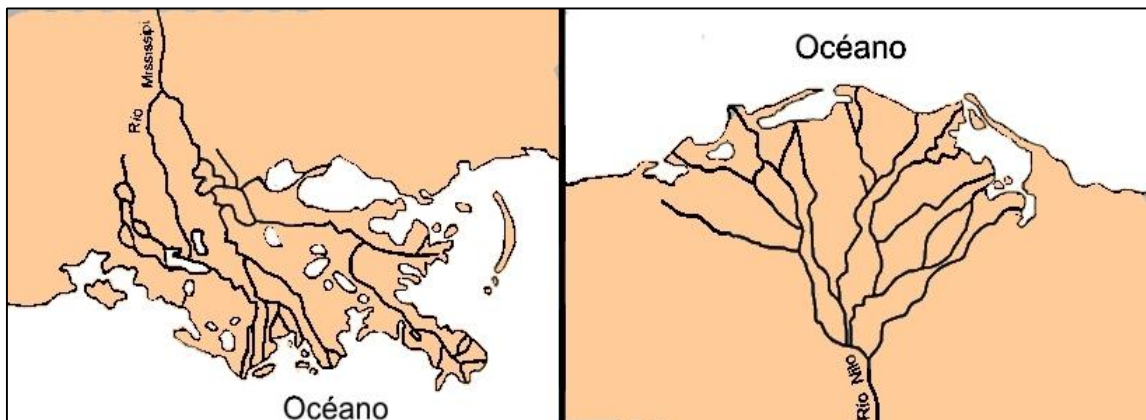
revientan las olas que mueven arenas y gravas, materiales que acaban de pulirla con la ayuda de la acción química del agua del mar.

Sobre la plataforma se acumulan gravas y arenas formando una terraza litoral, cuando se alcanza el equilibrio, el acantilado ya distante es poco afectado por el socavamiento marino.

Sedimentación y geoformas

Las geoformas litorales escasas y pequeñas se presentan cuando el material solo proviene de la erosión marina, gracias al aporte de caudalosos ríos. También debe tenerse en cuenta el aporte eólico y aquellos provistos por organismos (corales y manglares). La acumulación litoral da origen a:

Deltas. Corresponden a las zonas donde los ríos llegan al mar, son de aspecto variado, de topografía plana y anegadiza, cruzada por varios brazos fluviales que configuran un patrón de drenaje distributivo y se extienden mar adentro, ganando espacio al mar (Gráf. 47). Se forman cuando un río alcanza el mar o un lago y su gradiente prácticamente llega a cero, con una rápida disminución de velocidad, lo cual promueve la diseminación de las aguas y la depositación de su carga cuando los procesos marinos de redistribución no alcanzan a arrastrar los sedimentos.



Gráfica 47. Delta del río Mississipi y el río Nilo.

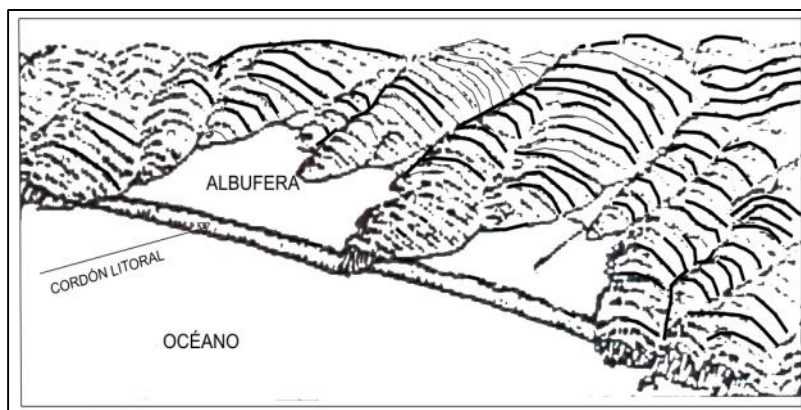
Fuente: Surface processes and landforms.

Playas marinas. Los materiales producto de la erosión de los acantilados, los sedimentos aportados por las corrientes fluviales y materiales de origen biológico se acumulan sobre la plataforma de abrasión conformando la playa. Esta se extiende desde la línea de costa (límite entre tierra firme y área de influencia marina) hasta la línea de ribera de marea baja. Los periodos de tormenta o de calma producen variaciones en el tamaño de material que conforma la playa. Durante los periodos de calma las olas empujan arena o guijarros hacia lo alto de la playa hasta formar una berma paralela a la línea de costa. Los vientos que

soplan en dirección al continente pueden formar dunas costeras longitudinales, transversales o parabólicas.

Barras de playa. Las barras de playa son bermas paralelas sucesivas que se forman por una abundante provisión de sedimentos. La posición de las barras depende de la dirección de las olas que llegan a la costa. Las barras constituyen un complejo de camellones y depresiones alargadas, paralelas a la línea de ribera, de sección transversal ondulada.

Cordones litorales, flechas o espigones y tómbolos. Estas geformas tienen su origen en la deriva de sedimentos erosionados en acantilados o aportados por los ríos, por acción de corrientes litorales que resultan de la refracción de olas oblicuas. Los sedimentos forman un depósito alargado que puede encerrar bahías, ensenadas o porciones de costa dando lugar a lagunas de agua salobre llamadas albuferas (Gráf. 48). Los cordones litorales suelen presentar canales estrechos que mantienen el lago en comunicación con el mar abierto. Las flechas son cordones que originan un lago de forma triangular. Los cordones que unen una isla con el continente reciben el nombre de tómbolos.



Gráfica 48. Albufera.

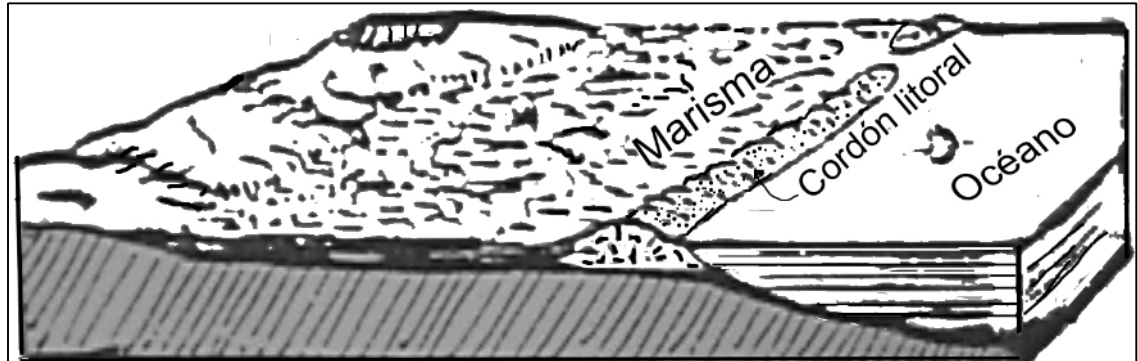
Fuente: Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos.

Marismas o depósitos lagunares (tidal plains). Son áreas bajas y pantanosas, encerradas por cordones litorales, barras de playa o rebordes deltaicos que resultan del relleno de materiales finos (lodo y materia orgánica); en las zonas tropicales a menudo reciben el nombre de manglares debido al crecimiento de una vegetación propia de aguas salobres llamada mangle.

Planicies de marea. Las corrientes de marea llevan en suspensión una carga abundante de arcillas y limos que colmatan las lagunas o albuferas dando lugar a planicies de lodo que quedan descubiertas durante la marca baja. Las plantas halófitas con sus raíces atrapan y fijan nuevos lodos en suspensión haciendo que la llanura suba de nivel hasta alcanzar el de marea alta.

Terrazas marinas. Las terrazas marinas se desarrollan debido a elevaciones de la costa por movimientos epirogénicos asociados a fallas o a descenso del nivel de mar. De esta manera la terraza no es afectada por las olas y corrientes litorales.

Edificaciones coralinas. Resultan de la precipitación bioquímica de organismos marinos con caparazones constituidas por CaCO_3 , Ca , $\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$, tales como el coral, algas calcáreas, equinodermos, etc. Las edificaciones más comunes son:



Gráfica 49. Marisma y cordón litoral.

Fuente: modificado de Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos.

1. Arrecifes marginales. Se alargan cerca de la orilla, de la que solo están separados por un canal de 30 a 150cm de profundidad.
2. Arrecifes de barrera. Están ubicados mar adentro, separados de la costa por una albufera relativamente profunda.
3. Atolones. Son arrecifes anulares cuyo tamaño depende de las dimensiones de su base sumergida. Varían de unos pocos Km hasta algo más de 200 Km de diámetro. Siempre encierran un lago de menos de 50 m de profundidad.

10.6 GEOFORMAS DE SEDIMENTACIÓN EOLICA

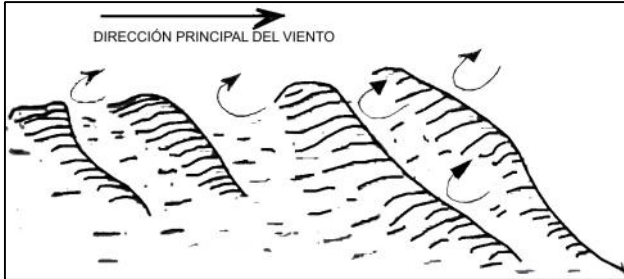
El viento aunque no posee la misma capacidad de transporte del agua también acumula gran cantidad de material construyendo geoformas de gran importancia en estudios ambientales, puesto que permiten identificar fácilmente la dirección del viento predominante y sus variaciones con el paso del tiempo.

10.6.1 LAS DUNAS

Las dunas son montículos de arenas móviles de diversas formas y tamaños, sus rasgos distintivos varían con el medio ambiente así: las dunas de los desiertos son estériles mientras que las de climas húmedos a menudo presentan una buena cobertura vegetal la cual contribuye a estabilizarlas. Su forma es un elemento importante en la determinación de la dirección y velocidad de los vientos.

Dunas transversales

Están asociadas a grandes mantos de arena (desiertos). Se presentan como una serie de lomas aproximadamente paralelas entre sí, separadas por depresiones alargadas. El eje longitudinal es perpendicular a la dirección del viento prevaleciente (Gráf. 50.)

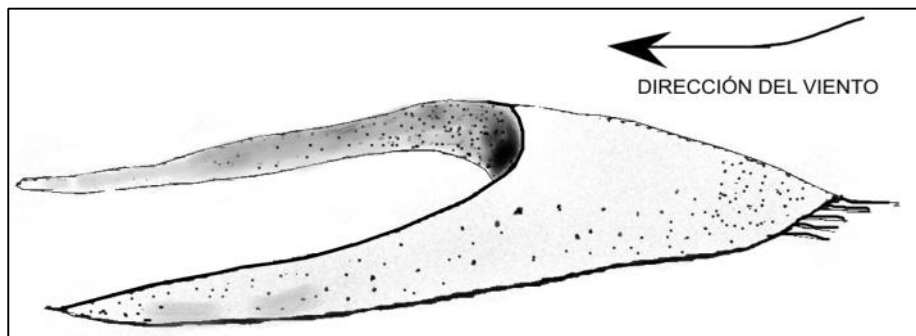


Gráfica 50. Dunas transversales.

Fuente: Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos.

Dunas tipo barján o barchán

Son médanos en forma de media luna. Los cuernos apuntan en la dirección del viento y la parte convexa presenta una pendiente suave (Gráf. 51)

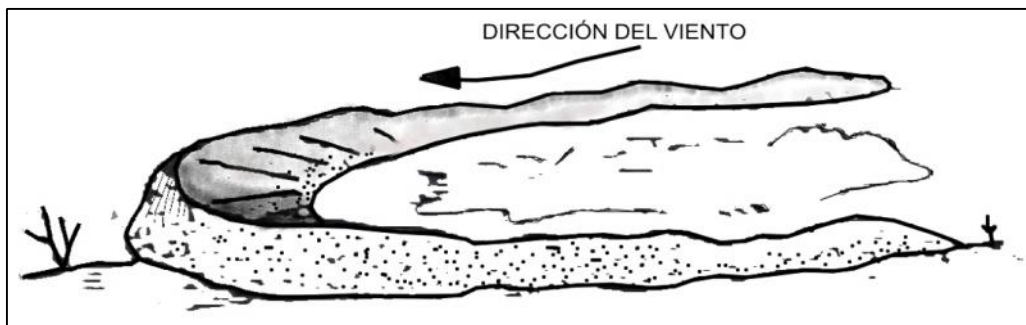


Gráfica 51. Duna tipo Baján oBarchán.

Fuente: Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos.

Duna parabólica

Es una parábola de arena en la cual los cuernos apuntan en dirección contraria al viento. En esta geofoma la parte convexa presenta una fuerte pendiente (Gráf. 52)



Gráfica 52. Duna parabólica.

Fuente: Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos.

Dunas longitudinales

Son lomas de arenas que se extienden paralelas a la dirección del viento. Posiblemente son formadas por vientos fuertes.

Mantos de loess

Son mantos de limos (y polvo) transportados en suspensión por el viento, de consistencia algo compacta, calcáreos, permeables, de color grisáceo cuando no están meteorizados y amarillentos cuando lo están.

11. AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea ha sido un recurso de gran importancia para la sociedad, pero actualmente debido a que las fuentes de agua dulce superficiales tales como ríos y lagos no contaminadas y en abundancia son cada día más escasas, su importancia se ha incrementado significativamente puesto que constituye la única posibilidad de adquirir agua dulce a un costo razonable.

Se considera agua subterránea al agua que se encuentra en los poros de rocas o de materiales inconsolidados. En el caso de rocas impermeables como las ígneas y metamórficas, el agua se podría encontrar en las fracturas. La capacidad de almacenamiento se conoce como porosidad (n) y se expresa como un porcentaje, se obtiene de la relación entre el volumen del espacio poroso y el volumen del material.

11.1 HIDROGEOLOGÍA DE LOS ACUÍFEROS

Las fuentes de agua subterránea se conocen como acuíferos y se definen como una formación o grupo de formaciones o parte de una formación que está saturada y es lo suficientemente permeable para transmitir cantidades de agua de captaciones y manantiales económicamente rentables¹⁴.

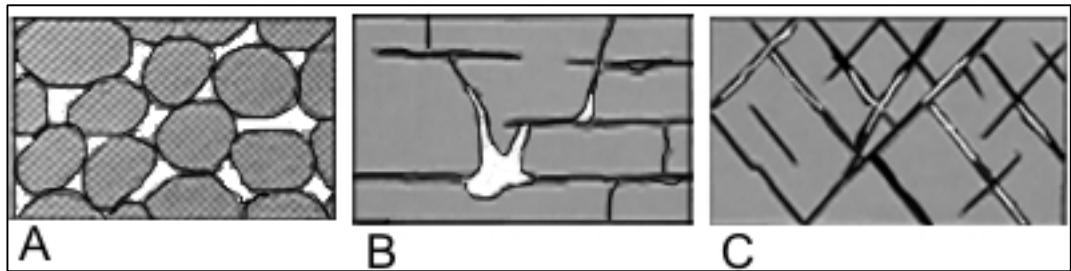
11.1.1 POROSIDAD Y PERMEABILIDAD

La porosidad (n) es la relación entre el volumen de poros y el volumen total. La porosidad efectiva (n_e) es la cantidad de poros disponibles para permitir el flujo del agua y es un factor importante en la velocidad del flujo, es una propiedad difícil de medir y a menudo se aproxima a partir de la porosidad total. El índice de poros (e), es la relación entre el volumen que ocupan los poros y el volumen que ocupan las partículas sólidas.

La porosidad primaria es la cantidad de espacios vacíos que quedaron en el proceso de formación de la roca y la porosidad secundaria se debe a fracturas y procesos de disolución después que la roca se formó. La gráfica 53, muestra los diferentes tipos de porosidad: A. Porosidad primaria, B. Porosidad secundaria por disolución, muy común en calizas y C. porosidad secundaria por fracturamiento.

La permeabilidad es la capacidad de un material de permitir el paso de fluidos a través de los poros, también es conocida como conductividad hidráulica (K). La facilidad con la que un líquido fluye dentro de un material depende de la viscosidad y presión hidrostática del fluido, tamaño de los poros y del grado de interconexión de éstos.

¹⁴ Seoáñez Calvo, Mariano



Gráfica 53. Tipos de porosidad en las rocas.

Fuente: modificado de Investigations in environmental Geology.

Permeabilidad de las rocas

La permeabilidad de las rocas depende de su porosidad primaria y secundaria. Las rocas sedimentarias terrígenas, especialmente los conglomerados y areniscas poseen una alta permeabilidad, debido a la porosidad primaria, las calizas en algunos casos también presentan alta permeabilidad, pero ésta se debe a la porosidad secundaria producida por fracturamiento y disolución.

Las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias autógenas poseen una baja porosidad primaria y por lo tanto una baja permeabilidad, sin embargo el fracturamiento puede desarrollar una alta porosidad secundaria. Algunas rocas volcánicas pueden tener una alta porosidad primaria si poseen un gran número de vesículas y si éstas se encuentran interconectadas la permeabilidad será alta.

11.1.2 FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

El movimiento del agua en los poros es controlado por fuerzas moleculares, tensión superficial, conductividad hidráulica (K) y la interconexión de los poros. Los flujos líquidos poseen energía mecánica que depende de tres factores: elevación (energía potencial), movimiento (energía cinética) y presión. En el caso del agua subterránea la energía cinética es un factor casi insignificante debido a la baja velocidad del flujo. La tabla 15 muestra el rango de valores de algunas propiedades hidrológicas para diferentes materiales geológicos.

La velocidad de un flujo se mide con la siguiente fórmula:

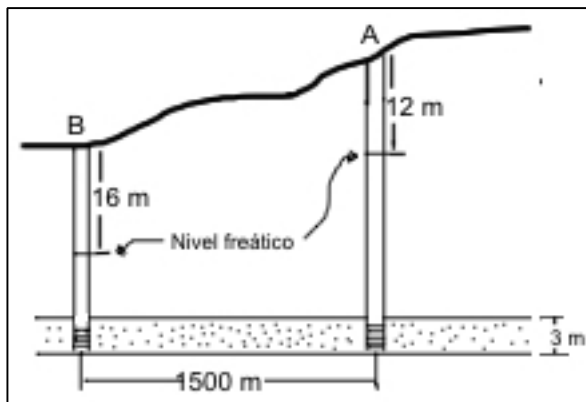
$$v = Q/A \quad \text{donde } Q = \text{m}^3/\text{seg} \text{ y } A = \text{área transversal del conducto}$$

La presión y la elevación determinan el máximo nivel que puede alcanzar el agua en un sitio cualquiera. Este nivel en el campo es medido por piezómetros, con los datos suministrados por varios piezómetros se obtiene el gradiente hidráulico que indica la dirección del flujo. La gráfica 54, muestra dos piezómetros instalados en el campo y los datos necesarios para determinar dirección, velocidad y caudal.

Tabla 15. Rangos de valores de propiedades hidrológicas para depósitos y rocas

| MATERIALES | | POROSIDAD (n) % | POROSIDAD EFECTIVA (n _e) % | CONDUCTIVIDAD HIDRAÚLICA (K) Ft/día |
|---------------------------|--------------|--------------------|---|--|
| Depósitos gravosos | | 25 – 40 | 15 -30 | 100 – 10000 |
| Depósitos arenosos | | 30 – 40 | 10 – 30 | 0.1 – 1500 |
| Depósitos arcillo-limosos | | 45 – 60 | 1 – 10 | 10 ⁻⁷ – 10 |
| ROCAS | Areniscas | 10 – 30 | 5 – 15 | 10 ⁻⁴ – 1 |
| | Shales | 1 – 10 | 0.5 – 5 | 10 ⁻⁸ – 10 ⁻³ |
| | Calizas | 1 – 20 | 0.5 – 5 | 10 ⁻³ – 10 ⁴ |
| | Ígneas | 0 – 40 | 0 – 30 | 10 ⁻⁸ – 10 |
| | Metamórficas | 0 – 40 | 0 – 30 | 10 ⁻⁸ – 10 |

Fuente: modificada de Investigations in Environmental Geology.



$$v = -K \frac{h_A - h_B}{L}, \text{ donde}$$

K = constante de conductividad hidráulica = 10⁻⁴

h = altura (m.n.n.m) - Profundidad del nivel freático.

L = Distancia entre piezómetros

A = 162 m.s.n.m

B = 153 m.s.n.m

Gráfica 54. Piezómetros.

Fuente: modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist.

$$h_A = 162 - 12 = 150, h_B = 153 - 16 = 137$$

$$L = 1500 \text{ m}$$

$$v = - (10^{-4} \text{ m/s}) \frac{150 - 137}{1500} = - 8.7 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$

El signo menos significa que la dirección del flujo es del más alto nivel hacia el más bajo (de A hacia B) por lo tanto se elimina el signo y el valor de la velocidad es 8.7 x 10⁻⁷ m/s. Con este valor se calcula el caudal (**Q**).

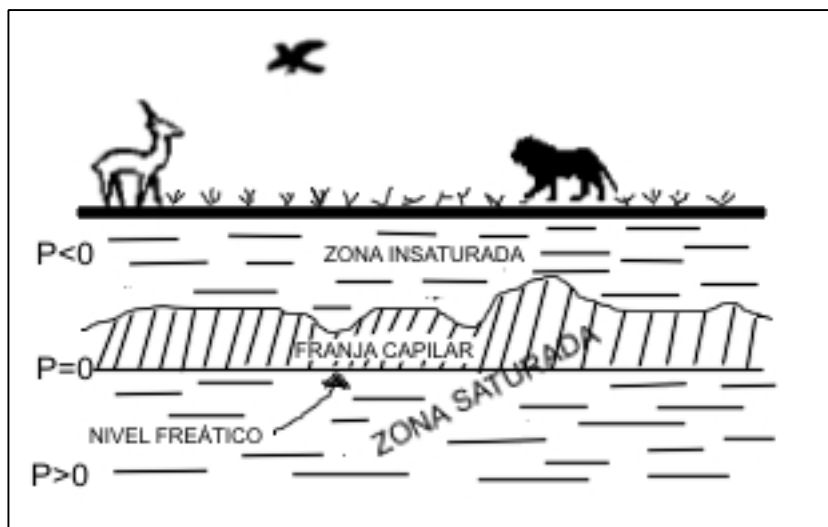
$Q = v \times A$, donde $A = \text{espesor pero en m}^2$

$$Q = 8.7 \times 10^{-7} \text{ m/s} \times 3 \text{ m}^2 = 2.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

11.2 NIVEL FREÁTICO

El agua subterránea se encuentra en diferentes condiciones físicas (Gráf. 54). Los poros de la parte superior del suelo o de la roca contienen agua y aire por lo cual esta zona recibe el nombre de zona insaturada, bajo esta zona a una profundidad determinada por el clima, la topografía y el marco geológico se encuentra la zona saturada que se subdivide en franja capilar y zona freática, cuyo límite recibe el nombre de nivel freático.

La presión del agua subterránea es mayor que la presión atmosférica por debajo del nivel freático, igual en el nivel freático y menor encima del nivel freático. En la gráfica 55, P resulta de restar la presión atmosférica de la presión de poros, en la práctica esto se refleja cuando se realiza una perforación o se hace un hueco en el suelo, una vez se alcanza el nivel freático el agua subterránea comienza a brotar.

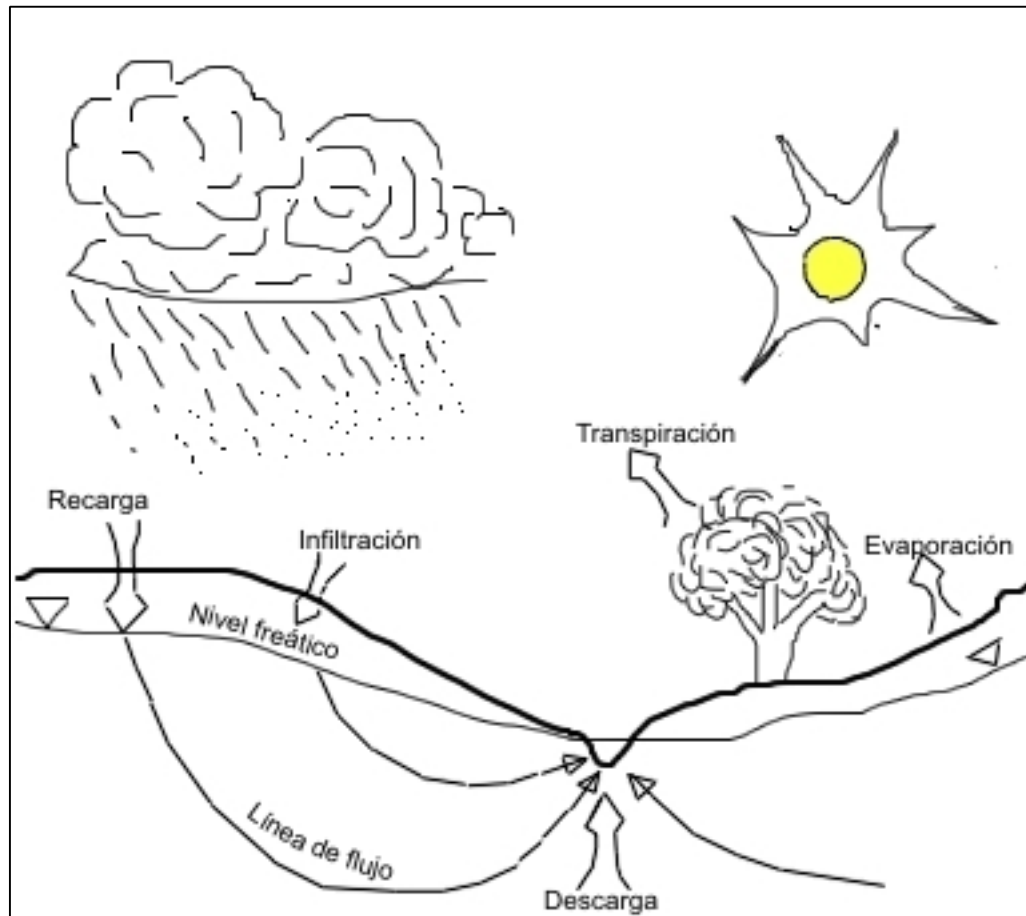


Gráfica 55. Zonas del agua en la subsuperficie.
Fuente: Autor.

11.3 SISTEMAS DE FLUJOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Los flujos de agua subterránea van de las zonas de recarga a las zonas de descarga. Cuando cae la lluvia o se funde la nieve, el agua se puede infiltrar o evaporar. (Gráf. 56.). La infiltración del agua depende del tamaño de las partículas del suelo, la pendiente del terreno, el tipo de vegetación y la humedad del suelo. La saturación del suelo reduce la infiltración y el agua fluye sobre la superficie.

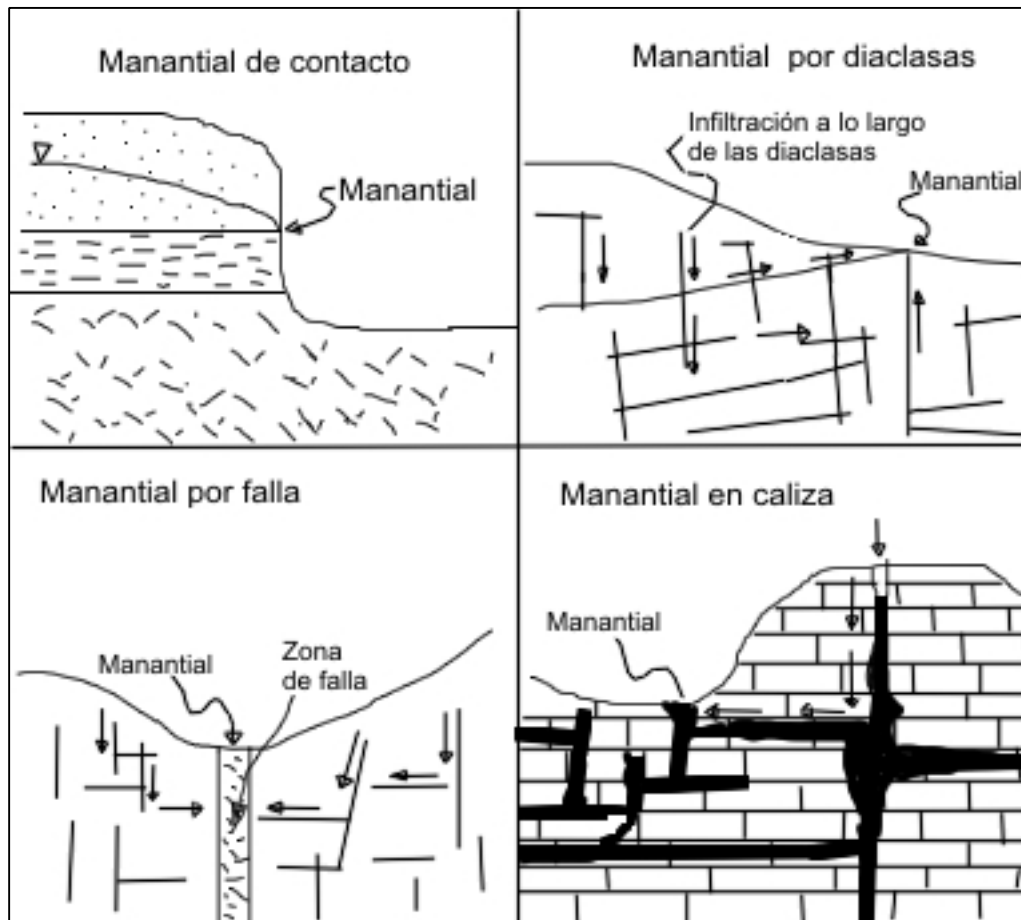
La evaporación y la transpiración son mecanismos que retornan el agua a la atmósfera y debido a la dificultad para evaluarlos cuantitativamente por separado, se agrupan en un término llamado evapotranspiración.



Gráfica 56. Interacción entre el agua atmosférica y el agua subterránea.
Fuente: Modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist.

La cantidad de agua disponible para la recarga de los flujos subterráneos es la fracción que no fluye sobre la superficie y no es evapotranspirada. En las áreas de descarga el agua fluye de la zona saturada hacia la zona insaturada o hacia el exterior en el sitio donde el nivel freático intercepta la superficie del terreno. No siempre un río o un lago determinan la zona de descarga, también se reconocen por un alto nivel freático y abundante evapotranspiración. Estas áreas presentan un persistente encharcamiento durante gran parte o la totalidad del año.

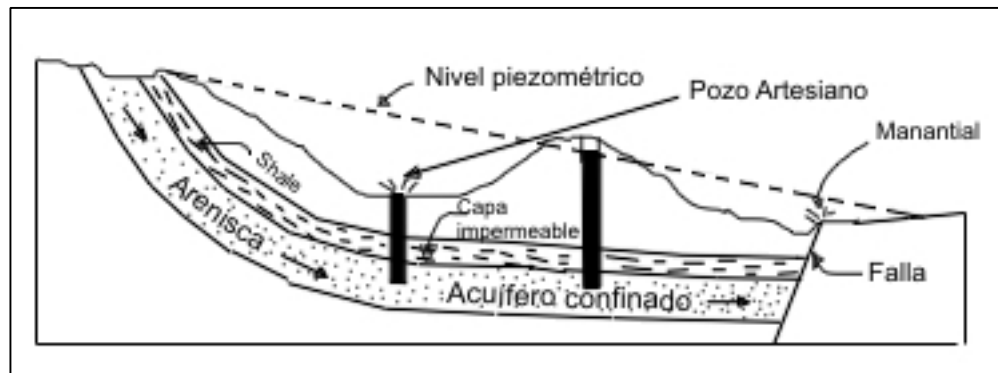
Los manantiales son los puntos de descarga más comunes del agua subterránea y su ocurrencia está relacionada con el marco geológico (Gráf. 57). Los más grandes manantiales se ubican en rocas calcáreas donde el agua reacciona químicamente con las rocas disolviéndolas y construyendo cavernas y pasajes.



Gráfica 57. Manantiales y su marco geológico.
Fuente: Geology for Engineers and environmental Scientist.

11.4 FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA

Su productividad está relacionada con los materiales geológicos que lo componen. Los materiales mas productivos son: arenas, gravas, rocas intensamente fracturadas y rocas solubles que tengan amplias cavidades subsuperficiales para circulación y movimiento del agua. Las rocas muy densas y pobremente fracturadas y los estratos limosos y arcillosos no dan lugar a la formación de acuíferos. Los acuíferos que presentan una formación impermeable encima reciben el nombre de confinados (Gráf. 58), si esta formación mantiene el acuífero por debajo del nivel piezométrico, el agua sube hasta este nivel a través de una falla, una diaclasa o una perforación, dando lugar a un pozo artesiano cuando la superficie se encuentra por debajo del nivel piezométrico.



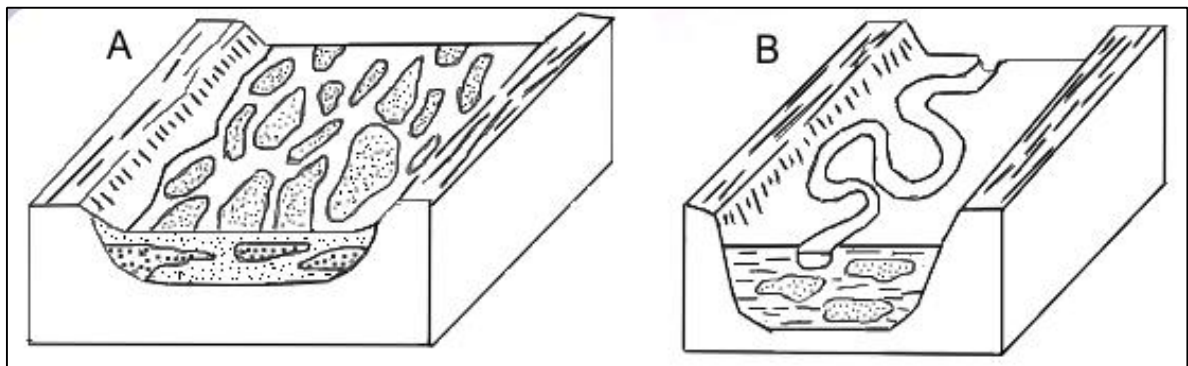
Gráfica 58. Acuífero confinado y pozo artesiano.

Fuente: Modificado de Surface processes and Landforms.

11.4.1 UBICACIÓN GEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS

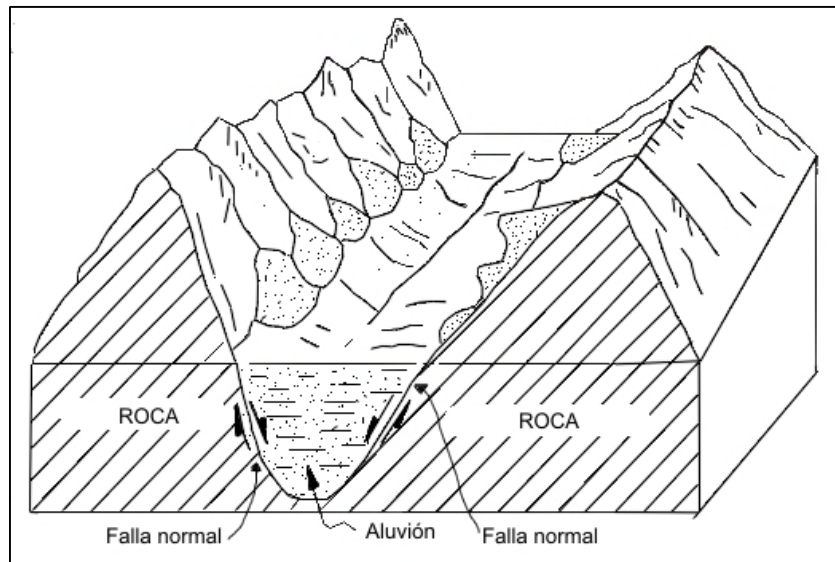
Los marcos geológicos más comunes para la ubicación de acuíferos son los valles aluviales o depósitos de los ríos (Gráf. 59). Las características de los acuíferos varían si el valle es trenzado o meándrico, en el primer caso el acuífero es más productivo debido al tamaño de las partículas.

Otros marcos geológicos son los valles tectónicos (graben) (Gráf. 60), las costas y los depósitos de las corrientes que nacen de un glaciar. Los acuíferos también se desarrollan en algunos tipos de rocas como areniscas, conglomerados y rocas carbonatadas.



Gráfica 59. Valle trenzado (A) y valle meándrico (B).

Fuente: Geology for Engineers and environmental Scientist.



Gráfica 60. Valle tectónico (graben).

Fuente: modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist.

Las rocas ígneas y metamórficas generalmente no presentan acuíferos debido a su alta densidad, baja porosidad y permeabilidad. Una posible excepción son los flujos de lava de textura vesicular por lo tanto la búsqueda de agua subterránea se debe enfocar en los contactos de los flujos

11.5 EL AGUA SUBTERRÁNEA Y LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES

El agua subterránea que circula a través de los poros, ejerce presión sobre las partículas y es muy probable que pueda disolver y transportar el material cementante fuera de los taludes, afectando la cohesión y la fricción interna. Todos los efectos anteriores disminuyen la resistencia al corte de los suelos y aumentan la susceptibilidad de éstos a los fenómenos de remoción en masa, colocando en alto riesgo obras de infraestructura, propiedades y vidas humanas.

11.6 EL AGUA SUBTERRÁNEA Y LAS CONSTRUCCIONES

La construcción de represas, túneles, edificios y autopistas debe tener en cuenta el control y disposición del agua subterránea. Las represas ilustran muy bien los problemas potenciales del movimiento y filtración del agua subterránea. El confinamiento del reservorio detrás de la represa aumenta el nivel freático dentro de los sistemas de flujo del agua subterránea y fluidos con presiones extremadamente altas, disminuyen la estabilidad de la represa generando sollevamiento en la base de la estructura o erosión interna (socavamiento) de material cerca de la corriente que sale de la represa. Las carreteras también son frecuentemente afectadas por las aguas subterráneas tal y como se observa en la figura 35.



Figura 35. Destrucción de un tramo de la autopista Maracay – Caracas en Venezuela debido a la acción del agua subterránea.

Fuente: Autor.

11.7 CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

En su movimiento a través del ciclo hidrológico, el agua sufre cambios físicos, químicos y biológicos¹⁵. Si algunas de las impurezas que adquiere son significantes en las fuentes para consumo humano, el agua se considera contaminada.

El agua subterránea contiene un mayor porcentaje de minerales disueltos que el agua de la superficie. Los minerales disueltos son medidos como Total de Sólidos Disueltos (TSD), se derivan de reacciones químicas entre el agua y el suelo o la roca. La clasificación basada en los TDS se da en la tabla 16.

Los iones de calcio y magnesio imparten una condición llamada dureza del agua. El agua dura aunque no es peligrosa para el consumo produce costras en las tuberías y calderas así como también ausencia de espuma en los jabones. Se considera agua blanda a aquella que contiene menos de 60 ppm de iones de calcio y magnesio, de 61 a 120 ppm es moderadamente dura, de 121 a 180 ppm es dura y de 180 ppm en adelante se considera muy dura. Concentraciones de hierro mayores de 0.3 mg/L producen manchas y precipitaciones sólidas en los vestidos y tuberías.

Tabla 16. Clasificación del agua subterránea basada en TDS.

| TIPO DE AGUA | TDS / mg/l) |
|---------------------|--------------------|
| Fresca | 0 – 1000 |
| Salobre | 1000 – 10000 |
| Salina | 10000 – 100000 |
| Salmuera | >100000 |

Fuente: Geology for Engineers and environmental Scientist.

¹⁵ Hem, 1985 en Investigations in Environmental Geology

La tabla 17, muestra la clasificación de constituyentes inorgánicos disueltos en el agua subterránea.

Tabla 17. Clasificación de constituyentes inorgánicos disueltos en el agua subterránea.

MAYORES CONSTITUYENTES (>5 MG/L)

| | |
|-------------|--------|
| Bicarbonato | |
| Calcio | Sílice |
| Cloro | Sodio |
| Magnesio | Azufre |

CONSTITUYENTES MENORES (0.01 – 10.0 mg/L)

| | |
|-----------|-----------|
| Boro | |
| Carbonato | Nitrato |
| Fluor | Potasio |
| Hierro | Estroncio |

CONSTITUYENTES TRAZA (< 0.1 mg/L)

| | |
|-----------|-----------|
| Aluminio | |
| Antimonio | |
| Arsénico | |
| Bario | Níquel |
| Berilo | Fósforo |
| Bromo | Platino |
| Bismuto | Radio |
| Cadmio | Rubidio |
| Cobalto | Rutenio |
| Cobre | Escandio |
| Galio | Selenio |
| Germanio | Plata |
| Oro | Talio |
| Indio | Thorio |
| Yodo | Titanio |
| Lantano | Tungsteno |
| Plomo | Uranio |
| Litio | Vanadio |
| Manganeso | Zinc |
| Molibdeno | Circón |

Fuente: Geology for Engineers and environmental Scientist.

11.8 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS SEGÚN SU COMPOSICIÓN QUÍMICA (Noisette)

Esta clasificación del agua subterránea se realiza con base en valores de resistividad (R), dureza (D) y mineralización (M).

La resistividad es la capacidad del agua de resistir el paso de la corriente eléctrica y se da en m. Por ejemplo la resistividad del agua marina tiene un valor promedio de 0.2 m y el agua procedente de un depósito aluvial alcanza valores hasta de 35 m o incluso mayores.

La dureza está relacionada con la presencia de carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, hidróxidos y óxidos de calcio y magnesio. La dureza se puede expresar de las siguientes formas:

- ppm CO_3Ca .
- mg/l Ca: Calcio o cationes equivalentes.
- °F: grados hidrométricos franceses, siendo $1\text{ °F} = 10\text{ mg/l CO}_3\text{Ca}$.

De acuerdo con los parámetros anteriores las aguas subterráneas se clasifican de la siguiente manera:

Clase 1: Aguas dulces y sin mineralización

R = 16.000 – 70.000 ohm/cm, D = 0 – 3 °F, M = 0 – 50 mg/l

Clase 2: Aguas dulces y mineralización muy débil

R = 5.000 – 15.000 ohm/cm, D = 4 – 12 °F, M = 40 – 120 mg/l.

Clase 3: Aguas de dureza media y mineralización ligera

R = 2.000 – 4.000 ohm/cm, D = 4 – 35 °F, M = 200 – 500 mg/l.

Clase 4: Aguas francamente duras y mineralización notable

R = 800 – 2.000 ohm/cm, D = 40 – 65 °F, M = 500 – 1.000 mg/l.

Clase 5: Aguas extremadamente duras y fuertemente mineralizadas

R = 400 – 900 ohm/cm, D = 60 – 120 °F, M superior a 1.000 mg/l.

11.9 CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Se considera agua contaminada cuando su composición o estado están alterados de tal modo que ya no reúne las condiciones para las utilidades a las que se hubiere destinado en su estado natural. Esto indica que un agua puede estar contaminada para el consumo humano y podría no estarlo para regadío.

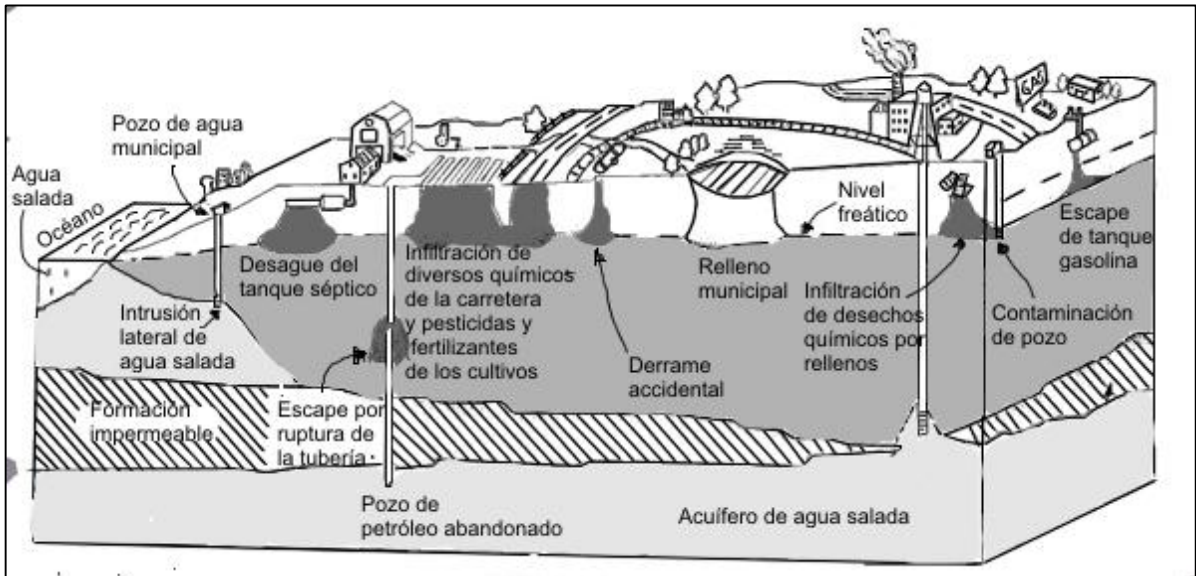
La contaminación del agua subterránea depende de diversas variables: clima, espesor de la zona no saturada, características hidrogeológicas del acuífero, velocidad de flujo del agua subterránea. La tabla 17 muestra las variables y respectiva acción.

Las mayores fuentes de contaminación del agua subterránea son las industrias, municipios, la agricultura y la minería (Gráf. 61).

Tabla 18. Acción de las variables en la contaminación de las aguas subterráneas a través del suelo.

| VARIABLE | ACCIÓN |
|---|---|
| CLIMA | Las precipitaciones actúan sobre los procesos de lixiviación de las sustancias contaminantes de los suelos. Las temperaturas influyen sobre el sentido de la circulación de las aguas de infiltración en la superficie de la zona no saturada. Puede producir precipitación de sales o encostramiento de los suelos. |
| ESPESOR DE LA ZONA NO SATURADA | Una zona no saturada de gran espesor se puede convertir en un escudo de protección de las aguas subterráneas, al impedir la infiltración de los contaminantes |
| CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEL ACUÍFERO | En este caso juegan un papel muy importante la porosidad, la permeabilidad y las variaciones del nivel piezométrico. La porosidad determina el volumen de agua contaminada, la permeabilidad incide en la dispersión del contaminante y las variaciones del nivel piezométrico extienden la contaminación en sentido vertical |
| VELOCIDAD DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA | La velocidad de flujo determina el tiempo que transcurre entre la contaminación de un acuífero y su detección en una captación |

Fuente: Adaptado de Contaminación del Suelo: estudios, tratamiento y gestión.



Gráfica 61. Mayores fuentes de contaminación de la subsuperficie.

Fuente: Modificado de Geology for Engineers and environmental Scientist.

11.9.1 FUENTES DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

La Office of Technology Assessment (OTA) de los Estados Unidos separa las fuentes de contaminación de las aguas subterráneas en seis categorías, teniendo en cuenta la función que cumple la fuente con respecto a las sustancias contaminantes o a la actividad contaminante.

Categoría 1. Fuentes diseñadas para descarga de sustancias.

Pozos sépticos y Pozos negros. Diseñados para descargar aguas servidas de uso doméstico en la subsuperficie, encima del nivel freático. Estas aguas provenientes de baños, lavaderos, duchas, lavaplatos y lavadoras pasan de las casas a los pozos, donde se hunden y sufren alguna descomposición anaeróbica. Además de los coliformes fecales, nitrógeno, amoníaco y otras sustancias de las aguas servidas, a los tanques sépticos se agregan limpiadores que contienen tricloroetileno, benceno y cloruro de metileno.

Pozos de inyección. Son pozos usados para descargar desechos líquidos en la subsuperficie debajo del nivel freático, estos líquidos comprenden desechos peligrosos, salmuera de pozos petroleros, escorrentía agrícola y urbana, aguas residuales municipales, agua de aires acondicionados, agua de bombas, líquidos usados para aumentar la recuperación de petróleo en campos petroleros, agua tratada para recarga artificial de acuíferos y fluidos utilizados en procesos mineros. Los pozos de inyección pueden contaminar las aguas subterráneas si los líquidos se inyectan accidental o deliberadamente en los acuíferos, debido a un diseño ineficiente del pozo, desconocimiento de la geología local, fallas en la construcción del pozo y daños en el sello superficial del pozo. La contaminación también puede suceder, aún con un pozo bien diseñado, por la migración de los líquidos inyectados a través de las diaclasas de la capa confinante debido a presiones inusuales o a través de pozos mal construidos o abandonados.

Aplicaciones superficiales. El uso de las aguas residuales urbanas o industriales, tratadas o no, en sistemas de regadío expone la materia orgánica contenida al efecto degradador de elementos, plantas y microorganismos del suelo. El lodo de plantas de tratamiento de aguas residuales se usa como fertilizante, así como el estiércol de animales en la fabricación de quesos. Esas aplicaciones de aguas residuales y residuos en la superficie podrían generar potenciales contaminantes de aguas subterráneas como nitrógeno, fósforo, metales pesados y componentes orgánicos refractarios, que eventualmente podrían alcanzar los acuíferos.

Categoría 2. Fuentes diseñadas para almacenamiento, tratamiento y disposición de sustancias.

Rellenos sanitarios. Los materiales en los rellenos incluyen: basuras municipales, residuos de demolición, lodos de plantas de tratamiento, cenizas de incineradores, arenas de fundición y otros residuos de fundición y materiales tóxicos y peligrosos. La contaminación de los acuíferos se presenta por fugas de lixiviados debido al diseño del relleno.

Basureros. Reciben los residuos de los hogares, pero son usados casi para todo tipo de desechos que son quemados y los residuos ocasionalmente cubiertos. La

ausencia de sistemas de recolección de lixiviados los convierte en fuertes contaminantes de las aguas subterráneas.

Depósitos superficiales. Pozos, estanques y lagos son usados por industrias, granjas y municipios para almacenamiento o tratamiento de desechos líquidos peligrosos y no peligrosos. Los pozos utilizados para tratar aguas residuales son impermeabilizados con arcilla, láminas plásticas, membranas de caucho o asfalto y en ellos se realizan procesos como asentamiento de sólidos, oxidación biológica, precipitación o coagulación química y ajuste de pH. El agua de estos depósitos se descarga en corrientes de agua o lagos, pero cuando no es descargada se evapora y se infiltra, pudiendo alcanzar el acuífero.

Desechos de minería. La minería puede producir restos de suelos, sedimentos, pedazos de rocas o residuos sólidos producto del procesamiento de minerales. Estos residuos apilados en la superficie, usados para relleno de hondonadas, para restaurar la superficie de las zonas explotadas o colocados en rellenos sanitarios. La contaminación de los acuíferos se puede presentar por los lixiviados que genera la interacción entre el agua lluvia y los desechos minerales, si existen minerales sulfatados o sulfurosos se podría producir ácido sulfúrico que disminuye el pH del agua drenada.

Apilamiento de materiales. La mayor parte de los materiales de consumo como carbón, sal, minerales, rocas de fosfato y piedra de construcción son almacenados en pilas al descubierto y su contacto con agua lluvia puede generar aguas ácidas, debido a la presencia de minerales sulfurosos en los materiales apilados.

Cementerios. La descomposición de los cuerpos enterrados podría liberar materia orgánica al suelo, si las tumbas no se encuentran bien selladas. Las áreas de fuertes precipitaciones y nivel freático alto son susceptibles a la contaminación de los acuíferos a partir de las tumbas. Los contaminantes incluyen altos contenidos de bacterias, amoníaco, nitratos y una elevada demanda química de oxígeno (DQO).

Tanques de almacenamiento superficiales y subterráneos. Estos tanques son utilizados para almacenar derivados del petróleo, químicos agrícolas y otros químicos. Rupturas por corrosión o fugas de los tanques pueden liberar sustancias en el suelo, que podrían alcanzar los acuíferos.

Categoría 3. Fuentes diseñadas para transporte de sustancias

Oleoductos. Utilizados para el transporte de derivados del petróleo, gas natural y otros líquidos, con el tiempo pueden presentar fugas por corrosión y liberar sustancias al suelo.

Transporte y transferencia de materiales. Es el movimiento de productos y desechos en vehículos y trenes. Los escapes de sustancias contaminantes pueden suceder por accidentes o por deterioro de los contenedores

Categoría 4. Fuentes que descargan sustancias como consecuencia de diversas actividades

A esta categoría pertenecen el riego, aplicación de fertilizantes, pesticidas y herbicidas y actividades pecuarias, que serán tratadas más adelante.

Escorrentía urbana. Las precipitaciones sobre áreas urbanas generan poca infiltración y gran escorrentía, que llega a las áreas rurales. Esta agua contiene gran cantidad de sólidos disueltos y en suspensión provenientes de las emisiones y fluidos de automóviles, sitios de uso de fertilizantes y pesticidas, basuras y heces animales.

Percolación de polución atmosférica. La polución atmosférica alcanza la superficie por depositación seca o como material particulado disuelto o en suspensión en el agua lluvia. Estas partículas incluyen hidrocarburos, químicos orgánicos naturales, metales pesados, sulfuros y componentes de nitrógeno. La infiltración del agua lluvia puede llevar estos componentes hacia las aguas subterráneas.

Drenaje de minas. La minería a cielo abierto o subterránea puede disturbar los patrones de flujo del agua subterránea y exponer rocas que contienen pirita a la acción de aguas oxigenadas, produciéndose agua ácida cuyo drenaje contamina las aguas superficiales y subterráneas.

Categoría 5. Fuentes que proveen un conducto para que las aguas contaminadas accedan a los acuíferos

Pozos de producción. Los pozos son perforados para producción de petróleo, gas, energía geotérmica y agua. Los contaminantes se pueden introducir durante la perforación del pozo, también los pozos deficientemente construidos, los sellos superficiales corroídos y los pozos inapropiadamente abandonados pueden proveer conductos, para el flujo de agua contaminada de la superficie hacia el subsuelo o para el movimiento de agua contaminada de un acuífero a otro.

Pozos de monitoreo o perforaciones exploratorias. Estos pozos y perforaciones tienen el mismo potencial de contaminación que los pozos de producción.

Excavaciones para construcciones. Las actividades de construcción pueden quitar el suelo desde la roca, removiendo así gran parte de la protección natural de los acuíferos. Estas excavaciones abiertas podrían convertirse en un colector de aguas de escorrentía urbanas y proveer un conducto hacia las aguas subterráneas.

Categoría 6. Fuentes que ocurren naturalmente en la descarga y/o por actividades humanas incontroladas

Interacción agua subterránea – agua superficial. En algunos casos los acuíferos se recargan con corrientes de agua superficiales, si la corriente se encuentra contaminada es posible que contamine el acuífero, cuando las sustancias contaminantes no son removidas o adsorbidas durante la infiltración. Los pozos ubicados cerca de las corrientes pueden inducir alguna infiltración de agua superficial debido al cono de depresión que forman en el acuífero.

Disolución natural. Los minerales presentes en el suelo y en las rocas pueden ser disueltos por las aguas subterráneas y aumentar el total de sólidos disueltos (TDS) hasta concentraciones que varían de 10000 a 100000 mg/L, que podrían tener indeseables concentraciones de aniones y cationes. La lluvia ácida tiene mayor capacidad de infiltración y cuando alcanza los acuíferos aumenta la capacidad de disolución de las aguas subterráneas.

Intrusión del agua salada. La explotación de pozos de agua subterránea en las zonas costeras podría hacer descender el nivel freático y permitir la intrusión de aguas subterráneas salinas que se encuentran bajo el océano.

11.9.2 CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERÁNEAS DE ACUERDO A SU UBICACIÓN

Fuentes en la superficie

1. Infiltración de agua contaminada.
2. Disposición de residuos sólidos y líquidos.
3. Almacenamiento.
4. Pesticidas y fertilizantes.
5. Derrames accidentales.
6. Materiales transportados por el aire.
7. Sales esparcidas en las carreteras.
8. Lixiviados.

Fuentes subsuperficiales sobre el nivel freático

1. Pozos sépticos.
2. Depósitos de basuras.
3. Disposición de residuos en excavaciones.
4. Escapes de tanques de almacenamiento subterráneos.
5. Escapes de tuberías subterráneas.
6. Recarga artificial.
7. Pozos abandonados.

Fuentes originadas bajo el nivel freático

1. Disposición de basuras en excavaciones.
2. Canales y pozos de drenaje para la agricultura.
3. Disposición de basuras en pozos.
4. Almacenamientos subterráneos.
5. Recuperación secundaria de petróleo.
6. Pozos abandonados.

11.10 CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

Las actividades humanas generan contaminantes al suelo y la interacción de éste con las aguas subterráneas las contamina.

11.10.1 CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA POR ACTIVIDADES AGRARIAS

Las actividades agrarias son las agrícolas y ganaderas. Las actividades agrícolas utilizan agua para riego y emplean diferentes fertilizantes y productos fitosanitarios, que aplicados sin un control adecuado pueden ser lixiviados en el suelo y contaminar por infiltración las aguas subterráneas.

Contaminación por fertilizantes

Los fertilizantes son las sustancias utilizadas en las actividades agrícolas para corregir la improductividad del suelo. Los fertilizantes nitrogenados son los de mayor importancia en la contaminación de las aguas subterráneas, especialmente los nitratos, cuya forma aniónica de nitrato (NO_3^-) se caracteriza fundamentalmente por su gran solubilidad y movilidad en el suelo. La posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas por este tipo de fertilizante depende del poder depurador del suelo que varían principalmente de acuerdo al origen y la textura.

El consumo de agua con altas concentraciones de nitratos puede ocasionar graves enfermedades, como la metahemoglobinemia.¹⁶

Los fertilizantes fosfatados se utilizan en las plantas para evitar anomalías en el crecimiento, maduraciones lentas y alteraciones en el color de las hojas. Este tipo de fertilizantes es menos contaminante que los nitrogenados, debido a que éstos últimos se transforman rápidamente en formas químicamente insolubles y son fijados al terreno mediante reemplazamientos isomórficos y fenómenos de adsorción física.

¹⁶Mariano Seoáñez en Contaminación del suelo

La contaminación con fertilizantes fosfatados está relacionada con una aplicación desproporcionada que anule la capacidad de adsorción del fósforo al suelo por sobresaturación. Al ocurrir esto el fósforo puede llegar al acuífero y contaminar el agua subterránea.

Contaminación por riego

La contaminación de las aguas subterráneas por riego está directamente relacionada con el tipo de riego utilizado, el tipo de cultivo y el suelo donde éste se desarrolla. El riego que se realiza sin ninguna dosificación puede sobrepasar la capacidad hídrica de almacenaje del suelo y el volumen de agua sobrante se infiltra en la zona no saturada, conteniendo productos fitosanitarios y fertilizantes que podrían contaminar los acuíferos.

Contaminación por plaguicidas y herbicidas

Los plaguicidas y los herbicidas en el suelo sufren procesos como degradación química, descomposición por radiación solar, volatilización, absorción por sustancias coloidales, etc, que tienden a mitigar su actividad contaminante. La movilidad y la persistencia en los suelos de estas sustancias son los factores que determinan que se infiltren y alcancen los acuíferos, contaminándolos no solamente con el plaguicida o herbicida mismo sino también con la sustancia diluyente o disolvente con la cual se aplicó.

Plaguicidas y herbicidas comunes y sus efectos:

Plaguicidas organoclorados tipo DDT. Generalmente poseen baja solubilidad, pero aún en bajas concentraciones provocan alta toxicidad en el agua.

Plaguicidas organofosforados y los carbamatos. Poseen una mayor solubilidad relativa que los organoclorados, pero son menos tóxicos y no tienen efectos acumulativos en el organismo.

Herbicidas a base de ácidos fenoxialquílicos. No son tóxicos pero provocan alteraciones de las propiedades organolépticas del agua cuando se degradan a clorofenoles.

Herbicidas del grupo de los nitrofenoles. Tienen elevada toxicidad y desarrollan efectos acumulativos en el organismo.

Evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación con plaguicidas

Esta evaluación se realiza con el sistema CRIPTAS¹⁷ el cual permite evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación con plaguicidas, teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Conductividad hidráulica del acuífero (C)
- Recarga neta del acuífero (R)
- Impacto de la zona no saturada (I)
- Profundidad del nivel del agua (P)
- Topografía (pendiente) (T)
- Roca del acuífero (A)
- Tipo de suelo (S)

Cada uno de estos factores tiene un peso relativo en la evaluación:

| Factor | C | R | I | P | T | A | S |
|---------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Peso relativo | 2 | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 5 |

A cada factor se le asigna un valor (a_i) que oscila entre 1 y 10 (tablas de valores) y el índice CRIPTAS se determina de la siguiente manera:

$$I = a_C P_C + a_R P_R + a_I P_I + a_P P_P + a_T P_T + a_A P_A + a_S P_S$$

Cuanto menor sea el índice menor será la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas.

Tabla 19. Valores de los factores CRIPTAS

| CONDUTIVIDAD HIDRAÚLICA | | | RECARGA NETA DEL ACUIFERO | |
|--------------------------------|-------|--------|---------------------------|-------|
| m/día | Valor | | Mm | Valor |
| 0.04 – 4 | 1 | | 0 – 50 | 1 |
| 4 – 12 | 2 | | 50 – 100 | 3 |
| 12 – 28 | 4 | | 100 – 180 | 6 |
| 28 – 40 | 6 | | 180 – 255 | 8 |
| 40 – 80 | 8 | | >255 | 10 |
| > 80 | 10 | | | |
| IMPACTO DE LA ZONA NO SATURADA | | | PROFUNDIDAD DEL AGUA | |
| | Valor | Típico | M | Valor |
| Limo/arcilla | 1 – 2 | 1 | 0 – 1,5 | 10 |
| Pizarras | 2 – 5 | 3 | 1.5 – 4.6 | 8 |
| Calizas | 2 – 7 | 6 | 4.6 – 9.1 | 6 |
| Areniscas | 4 – 8 | 6 | 9.1 – 15.2 | 4 |

¹⁷ EPA 1985: Aller, L. et al., 1986 en Seoáñez Mariano.

| | | | | |
|------------------------------|--------------|----|--|--------------|
| Calizas en capas | 4 – 8 | 6 | 15.2 – 22.9 | 3 |
| Areniscas y pizarras | 4 – 8 | 6 | 22.9 – 30.5 | 2 |
| Metamórficas/ígneas | 2 – 8 | 4 | >30.5 | 1 |
| Arenas y gravas | 6 – 9 | 8 | | |
| Basalto | 2 – 10 | 9 | | |
| Calizas Karstificadas | 2 - 10 | 10 | | |
| TOPOGRAFIA | | | ROCA DEL ACUÍFERO | |
| % de Pendiente | Valor | | | Valor |
| 0 – 2 | 10 | | Pizarras y arcillas masivas | 1 – 3 |
| 2 – 6 | 9 | | Metamórficas/ígneas compactas | 2 – 5 |
| 6 – 12 | 5 | | Metamorf o ígneas meteorizadas | 3 – 5 |
| 12 – 18 | 3 | | Capas finas de areniscas, calizas o pizarras | 5 – 9 |
| >18 | 1 | | Areniscas masivas | 4 – 9 |
| | | | Basaltos y/o rocas ígneas o metamos | 4 – 9 |
| | | | Rocas muy fracturadas | 2 – 10 |
| | | | Calizas Karstificadas | 9 - 10 |
| TIPO DE SUELO | | | | |
| | Valor | | | |
| Fino o ausente | 10 | | | |
| Grava | 10 | | | |
| Arena | 9 | | | |
| Turba | 8 | | | |
| Arcillas agregadas | 7 | | | |
| Marga arenosa | 6 | | | |
| Marga | 5 | | | |
| Margas aluviales | 4 | | | |
| Margas arcillosas | 3 | | | |
| Mantillo | 2 | | | |
| Arcillas no agregadas | 1 | | | |

Fuente: Contaminación del suelo: Estudios, Tratamiento y Gestión.

Contaminación por actividades ganaderas

Las actividades ganaderas generan residuos que contaminan química y biológicamente el suelo. Entre los residuos contaminantes se encuentran las aguas utilizadas para lavado de los animales que generalmente contienen productos químicos utilizados para desparasitar, estiércol y orines. El agua lluvia disuelve todos estos residuos y puede alcanzar los acuíferos, llevando inclusive bacterias y microorganismos.

11.10.2 CONTAMINACIÓN POR ACTIVIDADES URBANAS

La contaminación del suelo y de las aguas subterráneas por actividades urbanas está relacionada con: ubicación inadecuada o diseño deficiente de los rellenos sanitarios o botaderos y falta de mantenimiento, diseño deficiente y ubicación inadecuada de los sistemas de evacuación de las aguas residuales urbanas (red de alcantarillados, pozos sépticos y pozos negros). En los botaderos y rellenos sanitarios se presenta reacción química entre el agua lluvia, de escorrentía o la misma agua subterránea por elevación del nivel piezométrico y los residuos, que genera un líquido rico en sustancias contaminantes llamado lixiviado. Cuando no existe contacto directo con las aguas subterráneas, los lixiviados se infiltran hasta alcanzar el acuífero.

Los mayores riesgos de contaminación de las aguas subterráneas con lixiviados se generan debido a:

- Ubicación de un botadero o un relleno sanitario sobre un terreno calcáreo karstificado.
- Utilización de zonas excavadas, especialmente de materiales pétreos de origen aluvial.
- Ubicación de botaderos y rellenos sanitarios en hondonadas y cauces secos

La contaminación de las aguas subterráneas por aguas residuales se debe a las siguientes razones:

- Falta de mantenimiento en la red de alcantarillados, especialmente cuando ésta se instala en terrenos permeables o en áreas de alta sismicidad.
- Utilización de pozos abandonados para vertido de aguas residuales.
- Instalación y diseño deficientes de pozos negros y pozos sépticos.
- Vertido de aguas residuales directamente sobre el suelo.

11.10.3 CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS POR ACTIVIDADES URBANAS

Algunos de los controles para evitar la contaminación de las aguas subterráneas por actividades urbanas son:

- Minuciosos estudios geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos de los sitios que se han de utilizar como botaderos, rellenos sanitarios y vertido de aguas residuales.
- Prevenir el contacto de cualquier tipo de agua con los residuos acumulados, si esto no es posible entonces se debe interceptar y canalizar el agua y los lixiviados.
- Determinar la composición química y bacteriológica de las aguas residuales.
- Depuración de las aguas antes de su descarga final.

12. EVOLUCIÓN Y MEDIO AMBIENTE

La relación evolución-medioambiente se ha logrado establecer con base en la geología histórica, una rama de la geología que apoyada en otras áreas de la misma tales como la paleontología, la estratigrafía, la geomorfología, etc, reconstruye la historia del planeta desde su origen hasta el presente. A través de las rocas, de los registros fósiles de las diferentes formas de vida, del aire atrapado en resina fósil (ámbar) y la evidencia de movimientos tectónicos, determina los cambios en la atmósfera, el paisaje terrestre y las razones de la prevalencia o desaparición de las diferentes especies.

12.1 LA ESCALA GEOLOGICA

En 1654, un religioso irlandés guiado por su interpretación de la biblia aseguró que la tierra había sido creada 4004 años antes del inicio de la era cristiana; luego en 1749, un naturista consideró que un fósil tardaba 75000 años en formarse y que esa era la edad de la tierra. A finales del siglo XIX un químico tasó la edad de la tierra en 90 millones de años con base en la salinidad del mar.

El descubrimiento de la radiactividad fue el suceso que permitió calcular de manera creíble la edad de la tierra la cual se ha calculado en aproximadamente 4500 millones de años (m.a) utilizando el concepto de vida media de ciertos elementos o el tiempo necesario para que la mitad de una cantidad dada de un material se convierta en otro. La vida media del Uranio – 238, es de 4510 m.a, tiempo en el cual la mitad se ha transformado en plomo – 206, el Torio tiene una vida media de 14100 m.a y la del carbono-14 es solo de 5570 años. El uranio y el torio no son los únicos elementos utilizados para la datación absoluta, la edad de la tierra se obtuvo utilizando la comparación de la proporción de potasio-40 y Argón-40 en la corteza y en la atmósfera.

Si se resume el tiempo que ha transcurrido desde el origen de la tierra hasta el presente en las doce horas de un reloj, la historia de la tierra se describe así: De las primeras 2 horas y 52 minutos no se sabe mayor cosa, a partir de ese momento se forman las rocas y el planeta sigue siendo un desierto hasta las 4 horas y 20 minutos. A esa hora aparecen las primeras formas de vida como bacterias y algas hasta que después de las 10 horas y 30 minutos se produce una gran explosión de invertebrados en los océanos. Los dinosaurios dominan la tierra a las 11 horas y 25 minutos, pero a las 11 horas y 50 minutos son reemplazados por aves y mamíferos. A las 11 horas 59 minutos y treinta segundos aparecen los homínidos. La última centésima de segundo cubre la historia de la civilización¹⁸.

¹⁸ El mundo prehistórico

12.2 ORIGEN DE LA VIDA

Existen diversas teorías acerca del origen de la vida, entre las cuales se encuentran la divina, espacial y la que sostiene que la vida se originó en la misma tierra. La teoría de la creación divina aparece en los textos religiosos, no tiene ningún soporte científico y se basa en la fe de las personas, aunque teniendo en cuenta que libros como la biblia fueron escritos usando simbolismos se puede suponer que las personas que la escribieron creían que la vida se había generado en la tierra. La teoría espacial propone un origen extraterrestre de la vida y se basa en la presencia de moléculas orgánicas en los meteoritos.

Respecto al origen de la vida en la tierra, las teorías ubican el mar como el sitio más probable en el que se iniciara a partir de sustancias inorgánicas como dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua presentes en la atmósfera. Aunque existe controversia acerca de si la vida se generó en zonas profundas o someras del mar, está claro que ésta existe desde hace aproximadamente 3500 millones de años.

La teoría que ubica el origen de la vida en zonas poco profundas se basa en que la atmósfera primitiva estaba compuesta de carbono, nitrógeno y vapor de agua expuestos a la energía proveniente de rayos y la radiación ultravioleta del sol, esto dio origen a los aminoácidos (unidades estructurales de las proteínas) y bases orgánicas de los nucleótidos (parte esencial del ARN y ADN) que se fueron acumulando en los mares primitivos, más exactamente en charcas litorales; luego las pequeñas moléculas se unieron para formar polímeros, en ausencia de enzimas este enlace y alineamiento posiblemente ocurrió en la superficie de partículas de arcilla, posteriormente los complejos auto reproductores se aislaron en membranas dando lugar a la vida tal y como se reconoce actualmente.

La teoría que ubica el origen de la vida en zonas profundas del mar se basa en las formas de vida últimamente descubiertas en las zonas divergentes, más exactamente en las fuentes hidrotermales donde la temperatura del agua es de 350°C y contiene sustancias como sulfuro de hidrógeno y otros compuestos de azufre. Las bacterias allí presentes extraen la energía de los compuestos azufrados y no pueden vivir en presencia del oxígeno.

12.3 EVOLUCION DE LAS PRIMERAS FORMAS DE VIDA

Sin importar la diferencia en cuanto a la profundidad del origen, las dos teorías anteriores coinciden en que las primeras formas de vida eran anaerobias o capaces de vivir sin oxígeno, debido a que éste no existía en la atmósfera. Las bacterias capaces de realizar fotosíntesis comenzaron a generar oxígeno, pero éste inicialmente era absorbido por el hierro presente en las rocas y solo hasta hace aproximadamente dosmil millones de años pudo comenzar a acumularse en la atmósfera.

El oxígeno en las altas capas de la atmósfera se transformó en ozono que filtró la radiación ultravioleta de la luz solar nociva para los seres vivos, lo cual permitió un mayor desarrollo de la vida con la aparición de las primeras células eucariotas que posteriormente dieron origen a organismos pluricelulares.

12.4 MEDIO AMBIENTE Y LAS FORMAS DE VIDA

Los seres vivos han cambiado a lo largo de la historia de la tierra debido posiblemente a una interacción entre el mundo biológico y el ambiente no vivo. El medio ambiente cambia en diferentes escalas de tiempo y espacio, sobre los continentes la estabilidad es breve y la homogeneidad muy local pero mar adentro los cambios tienden a ser graduales. Consecuentemente algunas adaptaciones a los modos de vida plantónicos y bentónicos se están dando desde el paleozoico temprano. Por ejemplo, la fotosíntesis en el mar fue realizada inicialmente por las cianobacterias procariotas y ahora la realizan las diatomeas eucariotas y otros organismos.

Inicialmente la tierra tenía más océano y menos continente. Al no estar separados los mares podrían haber existido como un solo patrón de corrientes, de calentamiento, de evaporación y un suave gradiente de temperatura superficial, el agua en el fondo circularía lentamente conteniendo abundante hierro ferroso, sílice y sustancias tóxicas como cobre, arsénico y mercurio, todos suministrados por abundantes manantiales calientes submarinos. Excepto las bacterias que viven en esos manantiales, la zona profunda no tendría organismos vivos.

Hace 2500 millones de años los continentes alcanzaron un tamaño mayor y los mares poco profundos fueron más amplios, las costas y los bancos de arena impidieron la circulación global y se produjo el retorno de nutrientes a la superficie en las costas rectas y escalonadas. Aunque la meteorización no era un mecanismo aún efectivo, los ríos drenaban grandes áreas llevando nutrientes a las áreas costeras.

Un incremento en el suministro de nutrientes estimuló la diversificación y expansión de productores primarios al tomar ventaja en algunos ambientes de mares poco profundos, tal y como lo sugieren las abundantes calizas estromatolíticas y las formaciones rocosas con bandas de hierro¹⁹. Las densas poblaciones atrajeron a animales que se alimentaban de ellas y éstos a su vez atrajeron a los depredadores, juntos suministraron el potencial para la evolución de grandes organismos multicelulares. Es así, como el retorno de nutrientes a la superficie, aunque ligado a las costas es un proceso de aguas profundas que alienta la vida planctónica con sus propias adaptaciones y debido a que este

¹⁹ New Views on an Old Planet

proceso es desigual, el aislamiento geográfico podría haber influido sobre la evolución de nuevas especies.

Las primeras evidencias de organismos multicelulares son de hace 1000 millones de años, esto se opone a la idea de que continentes más grandes, mares poco profundos y gran suministro de nutrientes hayan sido un estímulo para la evolución de la vida en el océano, una posible respuesta sugiere que la corteza oceánica era muy gruesa con lo cual el piso marino estaba alto y los continentes bajos y hasta hace 1000 m.a. el 90% de la tierra estaba sumergido.

La aparición de oxígeno libre en el mar y en la atmósfera adquiere gran importancia como factor evolutivo debido a que es esencial para el desarrollo de metabolismos basados en oxígeno. Esta condición fue hallada hace 2000 m.a, mucho antes de la edad calculada para el primer fitoplancton.

La vida bentónica a unos pocos de cientos de metros no aparece sino hasta el mesozoico y el agua en profundidad era anóxica y el oxígeno llevado por corrientes profundas no se desarrolló hasta mucho después. El aparente descenso en la presencia de shales negros es una confirmación de que el oxígeno contenido en la atmósfera y el océano gradualmente alcanzaron su nivel actual.

12.5 ERAS Y PERIODOS DE LA TIERRA

El final de una Era y el inicio de la siguiente es un motivo de desacuerdo entre los científicos, debido a que algunos opinan que son los movimientos orogénicos o procesos generadores de cadenas montañosas los que determinan ese momento, otros piensan que son las grandes extinciones de formas de vida a nivel global los que lo determinan. Hasta el final de la Era Mesozoica estos sucesos coincidieron, pero posteriormente no sucedió así, pues hace 2 millones de años tuvo lugar la orogenia Ática y no se dio un evento de extinción en masa a nivel mundial. Por esta razón algunos científicos consideran al Cuaternario como una Era y otros lo consideran como un periodo de la Era Cenozoica.

Teniendo en cuenta la orientación ambiental del texto y que los eventos que dan lugar a las extinciones en masa a nivel mundial, son eventos que afectan dramáticamente el medio ambiente, se toma el Cuaternario como un Periodo de la Era Cenozoica.

| ERA | PERIODO | EPOCA | |
|-------------|--------------|---------------------|-----------|
| CENOZOICA | Cuaternario | Reciente u Holoceno | |
| | | Pleistoceno | |
| | TERCIARIO | Neógeno | Plioceno |
| | | | Mioceno |
| | | Paleógeno | Oligoceno |
| | | | Eoceno |
| | | | Paleoceno |
| MESOZOICA | CRETÁCEO | | |
| | JURÁSICO | | |
| | TRIÁSICO | | |
| PALEOZOICA | PÉRMICO | | |
| | CARBONÍFERO | | |
| | DEVÓNICO | | |
| | SILURICO | | |
| | ORDOVICICO | | |
| | CAMBRICO | | |
| PRECAMBRICA | PROTEROZOICO | | |
| | ARQUEANO | | |
| | PREARQUEANO | | |

Gráfica 62. Eras y periodos de la tierra.
Fuente: modificada de Fundamentos de Geología.

12.5.1 ERA PRECÁMBRICA

Las primeras formas de vida eran marinas y se originaron hace aproximadamente 3500 millones de años, compuestas por organismos unicelulares procariotas como

algas, bacterias y estromatolitos. La presencia de algas azul-verdoso generó oxígeno a la atmósfera y permitió el desarrollo de células eucariotas evolutivas.

12.5.2 ERA PALEOZOICA

A finales de la era precámbrica y a inicios del periodo cámbrico se presenta una sorprendente explosión de vida, que coincide con el final de una gran edad de hielo con mares amplios, someros, largas y estrechas cuencas rift, generalmente localizadas a bajas latitudes y un clima nuevamente caliente. Este evento presentó las siguientes características principales:

- a. Un incremento en la diversidad y probablemente en la densidad poblacional.
- b. La aparición de grandes organismos multicelulares.
- c. La efectiva explotación de las ventajas ofrecidas por esqueletos y conchas duras hechas de material mineral.
- d. Una subsecuente diversificación explosiva que preparó el escenario para solo uno de los grupos principales de animales más grandes.

El Periodo Cámbrico duró 70 m.a y se inició con el levantamiento de la cadena montañosa Caledoniana al norte de Europa y la aparición de muchos animales nuevos, algunos de concha dura. Los trilobites fueron los animales más abundantes, pero también se destacaron los braquiópodos, moluscos, crinozoos y arqueociatos, estos últimos desaparecen al final del periodo. En los vegetales son importantes los musgos y hepáticos aunque carecían de tejido vascular.

En el periodo Ordovícico los mares que rodean las plataformas continentales se hacen poco profundos permitiendo que los braquiópodos desplacen a los trilobites en cuanto a la abundancia. Aparecen los briozoos, corales, nautiloideos, los equinodermos como erizos y estrellas de mar. También aparecen los primeros peces aún primitivos debido a que no contaban con mandíbulas.

El periodo Silúrico se inicia hace 430 m.a, las plantas desarrollan tejido vascular y junto con los animales (escorpiones) colonizan la tierra. A finales de este periodo los peces ya tienen dientes.

El periodo Devónico se inicia hace 395 m.a y es llamado el periodo de los peces debido a la abundancia de éstos que dominan aguas dulces y saladas, se destacan los peces óseos, cartilaginosos (tiburón) y los placodermos. Este predominio de los peces es una consecuencia directa del cambio evolutivo que dotó de mandíbulas, con lo cual no solamente aumentaron su rango de productos alimenticios sino que se convirtieron en depredadores de otras especies, con las que probablemente compartían alimentos. También aparecen los primeros moluscos (amonites) y los escorpiones acuáticos. Las plantas comienzan a reproducirse sexualmente (gimnospermas) y se convierten en un sustento de la

vida en la tierra. En el Devónico superior se desarrollan los primeros anfibios a partir de los algunos peces.

El carbonífero se inicia hace 345 m.a y la regresión marina, además de un clima tropical en algunas partes de Norteamérica y Europa permite un gran aumento de las plantas que forman grandes bosques en los que se destacan árboles de 35 metros de altura como el lepidodrendon y el calamites. Los anfibios se convierten en una especie importante y algunos ejemplares llegan a medir hasta 4.5 metros y los insectos alcanzan tamaños hasta de 60 centímetros. Las ciénagas se colmatan y se comprimen para formar los actuales depósitos de carbón de Europa y Norteamérica.

El periodo Pérmico duró 55 m.a y es en este periodo cuando colisionan los supercontinentes Gondwana y Laurasia formando una gran masa continental llamada Pangea (Gráf. 63.). Los bosques comienzan a ser sustituidos por desiertos y las costas se caracterizan por ser lagunosas de cuenca cerrada donde florecen las algas calcáreas.

Los reptiles del carbonífero superior se establecen firmemente a comienzos del Periodo Pérmico y se convierten en la especie dominante, con tendencia al gigantismo. El periodo Pérmico y con él, la Era paleozoica finalizan con una gran extinción de muchas especies a nivel mundial.



Gráfica 63. Supercontinente Pangea.
Fuente: Foundations of Earth Science.

12.5.3 ERA MESOZOICA

Su inicio hace unos 225 m.a. coincide con el levantamiento de la cadena montañosa Herciniana en Europa y los Apalaches en Norteamérica. El supercontinente Pangea comienza a separarse en el Triásico superior, Laurasia y Gondwana quedan separadas por el mar Tetis. Los reptiles del Pérmico dan origen a una nueva línea de evolutiva que incluye lagartos, dinosaurios, formas acuáticas y planeadoras. Los mamíferos aparecen a finales del Triásico por evolución de un antiguo grupo de reptiles.

El periodo Jurásico se caracteriza por el avance de los mares, aunque la comunidad marina aún estaba recuperándose de la extinción del Pérmico ya son abundantes las amonitas y los bivalvos. Las rocas son principalmente pizarras, algunas bituminosas. Los reptiles alcanzan dimensiones gigantescas y algunos logran volar (pterodáctilos).

La primera ave el Archaeopteryx aparece en el jurásico superior, sus antecesores eran reptiles voladores como los pterodáctilos en los cuales la cola había desaparecido y los dientes se habían modificado.

El periodo Cretáceo se inició hace unos 136 m.a, los continentes continúan separándose y el océano Atlántico separa a Suramérica de África y a las islas Británicas y Groenlandia de Norteamérica. Los grandes reptiles dominan la tierra y en los mares abundan los amonitas, los bivalvos y los gasterópodos al inicio del periodo, pero al final una gran variedad de grandes reptiles se adapta a la vida acuática e invade los mares.

Las angiospermas que son las plantas más evolucionadas se originan en el cretáceo inferior y dominan el reino vegetal a finales de ese periodo. El color de las flores fue un avance posterior.

El final del periodo Cretáceo y de la Era mesozoica, llega con una gran extinción generada probablemente grandes nubes de polvo que cubrieron la atmósfera e impidieron la entrada de luz solar a la tierra, rompiéndose de esta manera la cadena alimenticia. El origen de las nubes de polvo es materia de controversia, pues algunos científicos sostienen que se debieron a la colisión de un gran meteorito con la tierra, mientras otros opinan que se debieron a una gran reactivación volcánica a nivel global. Sea cual sea la causa de la extinción lo que si está claro es que la prevalencia o extinción de un grupo biológico depende de su relación con el ecosistema.

12.5.4 ERA CENOZOICA

Su inicio coincide con la gran extinción y el levantamiento de las cordilleras de los Alpes, Pirineos e Himalaya. El Paleoceno es un periodo de grandes bosques en los que habitaban grupos de mamíferos sobrevivientes del mesozoico, entre esos los primates. En general los animales de este periodo no alcanzan grandes tamaños, las plantas desarrollan color en las flores y esto posiblemente las hace más aromáticas y más atractivas para los insectos, con lo cual el proceso de polinización alcanza mayores niveles de eficiencia.

En el Eoceno aparecen los roedores, los murciélagos y los antepasados de las ballenas, se desarrollan los primates más avanzados en las copas de los árboles y algunas especies de mamíferos empiezan a tender al gigantismo.

En el Oligoceno se produce la extinción de los primeros animales gigantes, los mamíferos arcaicos del Mesozoico y el Paleoceno y la aparición de los antecesores del mono.

Los mamíferos del Plioceno y el Mioceno ya son semejantes a los actuales; aparecen los caballos de tres dedos (Hipparion), los tigres “dientes de sable”, los perros, etc. Los Dryopithecinos son monos del Mioceno de los cuales evolucionan dos líneas homínoides diferentes, de una evolucionan los gibones y grandes monos y la otra se inicia hace unos 14 m.a con el ramaphitecus del que no hay certeza si era mono u homínido. El primer hombre verdadero aparece hace aproximadamente 3 m.a en África.

12.5 MOVIMIENTO DE LOS CONTINENTES Y LA EVOLUCIÓN

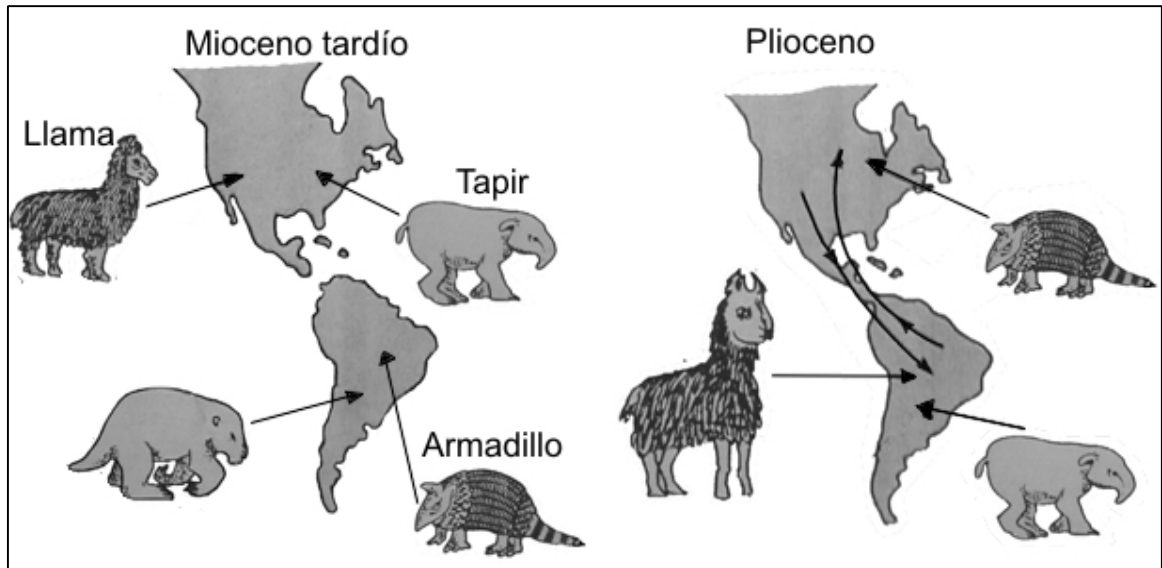
Los movimientos de los continentes han tenido gran influencia en la evolución de las especies. La separación de los continentes genera una progresiva divergencia entre las faunas separadas y la unión entre continentes da lugar a competencia entre inmigrantes. En las faunas modernas de varios continentes se observa que más de la mitad de las diferencias pueden ser atribuidas a la separación entre ellas.

Durante el mesozoico algunos de los principales grupos de reptiles evolucionaron antes de que las distancias fueran demasiado grandes, ya separados los supercontinentes (Laurasia al norte y Gondwana al sur) por el mar de Tethys, los dinosaurios evolucionaron en Gondwana mientras los ancestros de las tortugas, lagartos y serpientes lo hacían en Laurasia, sin embargo a mediados del mesozoico miembros de los principales grupos se encontraban en los diferentes sitios, aún así diferentes dinosaurios se desarrollaron en cada uno de los supercontinentes. En el cretáceo cuando los continentes estaban aún más lejos, los dinosaurios de Norteamérica y Asia no tenían una sola especie en común.

Los mamíferos existentes en la Pangea no se diversificaron hasta que los continentes no estuvieron totalmente separados. Su radiación se inició a partir de algunos centros aislados. Mares someros dividieron a Norteamérica en dos partes, África en tres y separaron a Asia de Europa. Norteamérica y Suramérica fueron separadas por un océano, pero Suramérica continuó moviéndose hasta conectarse con Australia a través de la Antártida hasta hace 50 millones de años. Este contacto entre Suramérica y Australia explica la presencia de mamíferos placentarios altamente evolucionados en Australia, aunque no queda claro por qué no sobrevivieron.

En Suramérica evolucionó una fauna rica en marsupiales durante el largo aislamiento del continente, que alcanzó un balance entre vegetación y herbívoros y entre los herbívoros y los depredadores. En Norteamérica los marsupiales fueron menos exitosos y predominaron mamíferos placentarios más avanzados. Cuando

emergió el istmo de Panamá los más eficientes herbívoros y agresivos carnívoros del norte acabaron con muchos del sur, desapareciendo cuatro órdenes enteros de la fauna suramericana; solamente unos pocos sobrevivieron y muchos menos, tal como el armadillo, se establecieron firmemente en Norteamérica. Irónicamente Suramérica es hoy un refugio de diversas especies originarias del Norte que allá se extinguieron, como la Llama y el Tapir. (Gráf. 64)



Gráfica 64. Intercambio de especies entre Norteamérica y Suramérica debido a la aparición del istmo de Panamá. Fuente: New views on an old planet.

13. RECURSOS ENERGETICOS Y MEDIO AMBIENTE

Se considera recurso energético a aquella sustancia o material que por medio de una reacción química o a través de medios mecánicos produzca energía. Esta puede ser utilizada para proveer diferentes servicios a la sociedad tales como: calefacción, refrigeración, fundición, iluminación, movimiento de motores, etc.

Entre los recursos energéticos actualmente utilizados se encuentran los combustibles fósiles (Petróleo, gas y carbón), la energía nuclear, la energía geotérmica, la energía eólica, la energía solar y la hidroelectricidad. Todos los procesos asociados a la extracción, funcionamiento y utilización de estos recursos generan un impacto ambiental que afecta suelos, agua y aire. La energía solar, la geotérmica y la eólica están consideradas como fuentes energéticas alternativas debido a que su uso no se ha masificado y al poco impacto ambiental que generan. El aprovechamiento de estas fuentes energéticas presenta diversos problemas entre los cuales los más importantes son: no se encuentran concentradas por el contrario se encuentran dispersas por toda la superficie terrestre, las tecnologías relacionadas con su aprovechamiento aún son muy costosas y no pueden competir con las actualmente utilizadas y además no son fuentes constantes.

13.1 PETROLEO Y GAS

Estas dos sustancias son conocidas como hidrocarburos porque están formados por moléculas compuestas total o esencialmente de hidrógeno y carbono. El petróleo es un líquido de color variable entre amarillo, rojo, verde hasta negro; se formó a partir de minúsculas plantas y principalmente animales (plancton) que vivían en los mares cuyos restos se acumularon en el fondo junto con arcilla y limo y luego fueron cubiertos por otras capas sin que su degradación fuera completa. Posteriormente el aumento de presión y temperatura completaron el proceso.

Los movimientos de las placas tectónicas permitieron el ascenso del petróleo y el gas en un movimiento conocido como migración, en el cual los hidrocarburos abandonan la roca madre y se desplazan hasta quedar atrapados en reservorios llamados trampas, debido a que rocas impermeables les impiden continuar. Las rocas reservorios más comunes son las areniscas y las calizas y las más atractivas económicamente son las de más alta porosidad y permeabilidad. Los hidrocarburos se usan en el transporte, generación de energía eléctrica, calentamiento, fabricación de plásticos, fertilizantes, asfalto y coque.

El impacto ambiental que generan estos recursos empieza desde su misma prospección o búsqueda, especialmente en aquella conocida como sísmica, en la cual se entierran cargas de explosivos que se hacen detonar y generan ondas detectadas por geófonos y luego interpretadas para determinar la conformación

del subsuelo y la posible presencia de hidrocarburos. En zonas de topografía quebrada estas ondas pueden activar fenómenos de remoción en masa que pueden afectar zonas de cultivos, desviar corrientes de agua o destruir viviendas (Fig. 36), inclusive poner en peligro vidas humanas. Cuando la prospección se



realiza con camiones vibradores es necesario descapotar para abrir carreteras, iniciando de esta manera un fuerte proceso erosivo.

Figura 36. Vivienda agrietada y desestabilizada por movimiento del suelo debido a una prospección sísmica realizada en San Vicente de Chucurí, Santander.

Fuente: Autor.

La extracción de hidrocarburos genera problemas ambientales relacionados con la apertura de vías, contaminación de suelos o aguas subterráneas, escapes de las tuberías o tanques de almacenamiento y aguas residuales, todos estos factores contaminan el aire con partículas de aceite. Durante el transporte que se realiza en buques, oleoductos o en camiones, los accidentes generan derrames de petróleo que en muchos casos van directamente a cuerpos de agua superficiales destruyendo hábitats acuáticos o terrestres. Entre los desastres más importantes se destacan el del buque Exxon Valdez que en 1989 derramó 10 millones de galones de petróleo en Alaska y el más reciente el del Prestidge frente a las costas europeas. Durante la primera guerra del golfo se derramaron 300 millones de galones de petróleo en el golfo Pérsico.

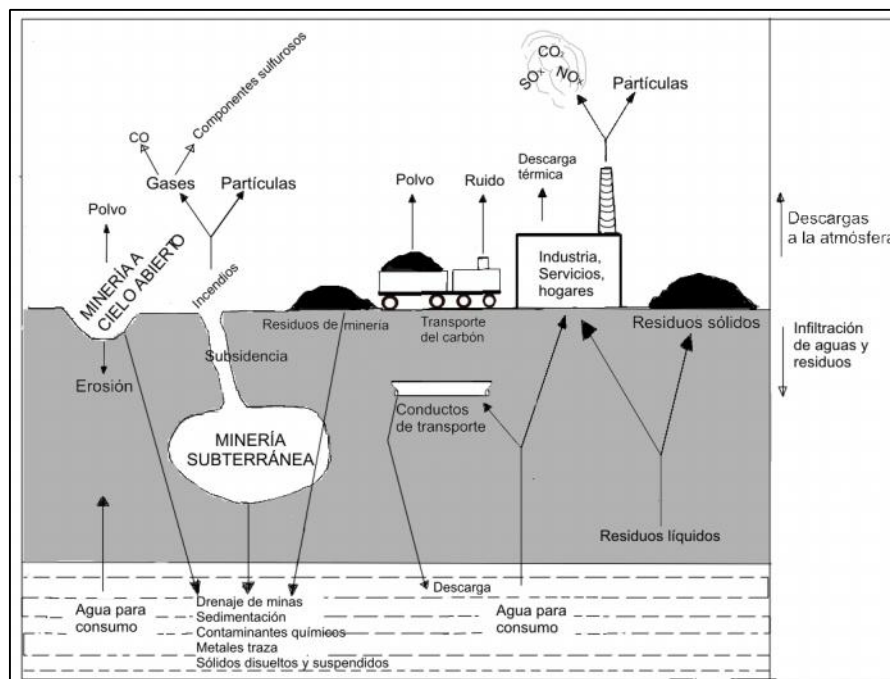
En la refinación del petróleo, la contaminación es producida por emisiones en las chimeneas, fugas accidentales y el uso de catalizadores químicos. La distribución y el uso de los combustibles derivados también genera contaminación. En la distribución, los problemas son parecidos a los del transporte de crudo en el cual son lanzadas al aire trazas de gases y partículas que no suelen estar presentes en la atmósfera, el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno y el monóxido de carbono son los más comunes. El dióxido de azufre debido a su alta solubilidad en agua es culpable de la lluvia ácida, los óxidos de nitrógeno y la luz solar reaccionan para formar el *smog* o niebla espesa y persistente que se observa cuando el aire contaminado no puede elevarse debido a capas de aire de diferente temperatura que cubren una ciudad. Hidrocarburos sin quemar y otras partículas pasan a la atmósfera y al depositarse ennegrecen edificios y tejidos.

El uso del gas natural es menos contaminante y su mayor impacto está relacionado con la emisión de metano, gas responsable en parte del calentamiento global. Del total de metano emitido a la atmósfera solo el 10% proviene del gas natural, 15% de actividades antropogénicas y el 75% de las termitas, flatulencia del ganado y cultivos de arroz.

13.2 EL CARBON

El carbón es un material que se originó por procesos biológicos y geológicos a partir de material vegetal. Inicialmente la materia vegetal se convierte en hulla, luego a lignito, posteriormente a carbón bituminoso y por último a antracita. El carbón es el más abundante combustible fósil y hasta 1995 satisfacía el 23% de la demanda mundial de energía y la producción era de aproximadamente de 3700 millones de toneladas, de las cuales Estados Unidos y la China producían más de la mitad.

Los yacimientos de carbón se presentan en capas a las cuales se les denomina mantos. La minería del carbón se realiza de acuerdo a la posición topográfica de los yacimientos, es decir, si los mantos se encuentran en una zona plana la minería es a cielo abierto y si se encuentran en una zona inclinada la minería es subterránea. El buzamiento o inclinación de los mantos determina que método se utiliza de acuerdo al tipo de minería. La gráfica 65 presenta las diversas actividades relacionadas con la extracción del carbón, sus usos y la contaminación generada.



Gráfica 65. Contaminación generada por extracción y uso del carbón
Fuente: modificada de Earth Systems Processes and Issues.

Las actividades iniciales para la extracción de cualquier material siempre van a generar impactos ambientales similares. La apertura de carreteras destruye capa vegetal y los horizontes orgánicos del suelo acelerando el proceso erosivo y necesariamente la sedimentación en cuerpos de agua, todo esto afecta directamente a todas las formas de vida. También inicia fenómenos de remoción en masa, que alteran la topografía y los cursos de agua. El asentamiento de grupos humanos genera entre otras cosas ruido, aguas residuales, residuos sólidos y orgánicos con sus respectivos lixiviados y alteración del paisaje natural. Los procesos mineros liberan metano a la atmósfera, remueven la capa vegetal (Fig 37 y Fig. 38) especialmente los que se realizan a cielo abierto, acidifican las aguas superficiales, contaminan las subterráneas y destruyen hábitats. Después de extraída la totalidad del material de una mina subterránea y abandonada ésta, se produce un fenómeno llamado subsidencia del suelo en la zona ubicada sobre la mina, cuya intensidad está relacionada con la profundidad de la explotación, columna estratigráfica y método de explotación.



Figura 36. Pérdida de cobertura vegetal por traslado de material de la mina a los molinos. Mina El Trompetero. Vetas. Santander.
Fuente: Autor.



Figura 37. Patio de acopio en una mina de carbón
Fuente: Autor

Uno de los factores contaminantes de la minería es el drenaje ácido (Fig. 39). En las minas subterráneas se origina por aguas que fluyen dentro de la mina, por



escorrentía desde los terraplenes donde se acumula la escoria y desechos de la mina o de rocas y carbón de baja calidad separados del mineral rico antes de su transporte.

Figura 39. Drenaje de minas.
Fuente: Autor.

Una vez se termina de explotar el carbón en las minas subterráneas los socavones se llenan de escoria o se deja que colapsen. Con este procedimiento, se limita la cantidad de roca expuesta a condiciones oxidantes, en cambio en la minería a cielo abierto se quita toda cubierta rocosa y se abandona una mezcla bastante porosa de escombros y escoria, estas acumulaciones de materiales quedan expuestas al oxígeno y al agua que se filtra. Como consecuencia de la oxidación del hierro y el azufre, el pH disminuye rápidamente e impide el establecimiento de vegetación y una cubierta de suelo estable, que podría finalmente aislar los escombros del oxígeno. Una zona de minería a cielo abierto seguirá produciendo drenaje ácido hasta que la mayor parte del sulfuro sea oxidado o lavado.

La recuperación del terreno puede tardar 50 a 150 años. El drenaje ácido y enriquecido en hierro de las minas, mata los animales acuáticos e impide el uso de los ríos así contaminados para el suministro de agua potable o para fines recreativos.

El transporte y el proceso para convertir el carbón en coque, genera partículas con metales tóxicos y gases nocivos a la atmósfera, además de los problemas que genera la disposición de residuos. El uso del carbón causa los mismos problemas de la coquización y se considera el más nocivo al medio ambiente entre los combustibles fósiles.

13.3 ENERGIA NUCLEAR

La energía nuclear usada para la generación de energía eléctrica proviene de un proceso llamado fisión nuclear, en el cual un átomo de uranio (^{235}U) es bombardeado con un neutrón que lo divide en dos fragmentos que liberan más neutrones, que a su vez dividen más átomos, con lo cual se liberan grandes cantidades de energía, produciéndose una reacción en cadena.

El ^{235}U es un isótopo que se encuentra en las minas de uranio en una concentración del 0.7%. En las minas, el uranio extraído es convertido en óxido de uranio (U_3O_8) por métodos químicos y en las plantas es enriquecido isotópicamente hasta alcanzar ^{235}U en una concentración del 3 al 4%.



La minería del Uranio produce los mismos efectos ambientales que la de cualquier otro material en cuanto a erosión, subsidencia y contaminación química de aguas superficiales y subterráneas.

Figura 40. Planta nuclear.
Fuente: www.campbellsci.co.uk

Los desechos son mucho más peligrosos que en otros casos porque contienen minerales radiactivos tales como Uranio y Radón, por lo cual su disposición representa un grave problema.

El funcionamiento de las plantas nucleares no permite errores porque estos podrían costar la vida y daños en la salud de las comunidades ubicadas a muchos kilómetros alrededor, debido a la contaminación del aire, agua y suelo con materiales radiactivos.

13.4 ENERGIA HIDROELECTRICA

La energía hidroeléctrica es la producida aprovechando la energía cinética del agua construyendo represas. El funcionamiento de éstas no produce mayores daños al medio ambiente, estos daños están relacionados con su presencia y construcción. Durante la construcción de las represas se inunda una gran área

destruyendo el hábitat y desplazando comunidades animales, vegetales y humanas, se interrumpen los procesos hidrológicos y de sedimentación naturales, se desmejora al calidad de agua porque disminuye la aireación, se incrementa la concentración de sales y minerales debido al aumento de evaporación, se eleva la temperatura del agua por el estancamiento corriente arriba y disminución del caudal corriente abajo y se destruye la ruta de migración de los peces.



Figura 41. Represa.

Fuente: www.etall.hpg.ig.com.br

Las represas también producen cambios en el microclima y en la sismicidad de las zonas adyacentes. No es que se produzcan terremotos de gran magnitud pero un aumento en la sismicidad tiene efectos directos sobre los fenómenos de remoción en masa. Los cambios en el microclima afectan las especies vegetales y es posible que en algunas zonas aledañas a la represa tengan que cambiar los cultivos tradicionales, con lo cual el impacto trasciende fácilmente al ámbito social y económico de una región.

13.5 ENERGIA GEOTERMICA

Esta forma de energía no es muy común en el mundo debido a los pocos sitios que permiten su desarrollo económico, actualmente a nivel mundial las plantas eléctricas que utilizan energía geotérmica producen unos 15000 megawattios. Además de producir electricidad esta energía es utilizada para calefacción y secado, en Islandia el 85% de los edificios residenciales son calentados geotérmicamente.

Esta energía se encuentra profunda en la corteza terrestre donde la temperatura es más alta que en la superficie. En ciertos sitios de la tierra el magma avanza a través de fallas y fracturas hasta unos dos o tres kilómetros de la superficie creando los “puntos calientes” y si allí se ha acumulado agua subterránea, ésta se encarga de remover la energía térmica.

Los mejores sitios para obtener esta energía se encuentran en los límites de las placas tectónicas. La exploración y perforación de los recursos geotérmicos produce impactos ambientales similares a los del petróleo como: destrucción de hábitats, fugas de fluidos de perforación, liberación de sulfuro de hidrógeno o fluidos geotérmicos salobres. En el proceso de producción de electricidad los impactos son muy diferentes e incluyen cambio de uso del suelo, impacto paisajístico, ruido, emisión de gases, elementos tóxicos tales como mercurio y arsénico y disposición de aguas salobres y residuales. También genera riesgos de subsidencia e inestabilidad de taludes debido a la extracción de fluidos geotérmicos que ayudaban a soportar la superficie. Las plantas geotérmicas emiten solo el 5% del dióxido de carbono que emite una planta del mismo tamaño que utilice carbón.

13.6 ENERGIA EOLICA

La energía eólica ha sido utilizada por cientos de años para transporte, molinos y bombeo de agua. Se usó para generar energía eléctrica hace unos cien años en Dinamarca y actualmente es una importante fuente alternativa de energía en algunos países de mundo. Las turbinas actuales se mueven con vientos de velocidades tan bajas como de 16 Km/h.

Su funcionamiento tiene poco impacto sobre el medio ambiente. El movimiento de las turbinas genera ruido que solo es percibido en el sitio y causa la muerte a algunas aves lo cual puede ser fácilmente remediado instalando las turbinas en sitios donde el conflicto con las especies aéreas sea mínimo. La presencia de las turbinas causa alteración del paisaje.



Figura 42. Energía Eólica.
Fuente: www.utilityauditing.co.uk

13.7 ENERGIA SOLAR

El sol genera 3×10^{24} BTU diariamente de los cuales solo 5×10^{21} llegan a la tierra y esta energía se convierte en la fuente inicial de todos los recursos energéticos,

excepto los recursos geotérmicos y nucleares. Los mejores sitios para aprovechar la energía solar están ubicados en la región ecuatorial.

Existen dos tecnologías para convertir la energía solar en energía eléctrica: la tecnología solar térmica y las celdas fotovoltaicas. La primera tecnología refleja y concentra los rayos solares sobre un recipiente con un fluido que a alta temperatura se vaporiza y mueve la turbina del generador, de manera similar a los generadores que utilizan combustibles fósiles. Las celdas fotovoltaicas utilizan directamente la energía radiante para producir electricidad aprovechando las ventajas que ofrecen materiales conocidos como semiconductores. En estos materiales hay exceso de electrones en un lado de la celda y ausencia de éstos en el otro lado; cuando los rayos de luz inciden en la celda, los electrones se mueven de un lado al otro bajo la influencia de un campo eléctrico generando una corriente eléctrica.



La ausencia de movimiento de partes, ruido, emisiones, ni requerimiento de agua hace de esta tecnología una de las menos contaminantes.

Figura 43. Panel solar.
Fuente: www.eeppm.com

Su impacto ambiental se reduce a ligeros cambios en el microclima local y alteración del paisaje; el impacto más fuerte está relacionado con los químicos tóxicos utilizados en la construcción de las celdas.

13.8 ENERGIA DE LA BIOMASA

La biomasa satisface entre el 7 y 15% de las necesidades energéticas del mundo. En los países menos desarrollados la biomasa es la energía dominante para aproximadamente tres millones de personas debido a su bajo costo y disponibilidad y generalmente es utilizada para cocina y calefacción de manera primitiva poco eficiente aumentando el impacto ambiental. La energía de biomasa incluye una amplia variedad de fuentes:

Madera y residuos de madera. La madera es la fuente primaria de combustible que se usa en diferentes actividades humanas como: cocina, calentamiento y producción de electricidad.

Residuos domésticos y agropecuarios. La utilización de residuos biológicos en incineradores y biodigestores constituye un medio extremadamente económico de producción de energía.

Hulla. Consiste en material vegetal parcialmente descompuesta que se ha acumulado en ambientes acuosos que produce aproximadamente 6000 BTU por libra. Ha sido utilizada para calefacción desde hace unos dos mil años y para producir electricidad desde principios del siglo veinte.

Residuos sólidos. Generalmente se recogen y se depositan en rellenos sanitarios, sin embargo pueden ser quemados para producir electricidad, vapor combustible gaseoso y líquido, reduciendo de esta manera la cantidad de residuos almacenados.



Cultivos. Cultivos de maíz y caña de azúcar a través de la fermentación producen alcohol combustible (Etanol), pero es un proceso costoso y su aplicación industrial está sujeta a los precios internacionales de los combustibles fósiles.

Figura 44. Biodigestores.

Fuente: www.energianatural.com.ar

Biomasa Acuática. La biomasa oceánica tiene grandes ventajas sobre la terrestre puesto que no necesita irrigación, pesticidas o fertilizantes pero compite con la pesca, el transporte y usos recreacionales siendo susceptible a daños por oleaje o tormentas.

En general la biomasa puede ser convertida en energía por combustión, fermentación, digestión anaeróbica y gasificación. El uso de la biomasa tiene restricciones relacionadas con patrones climáticos, disponibilidad de agua, calidad del suelo, competencia con otros usos de la biomasa, baja densidad de energía de la biomasa y los costos financieros y energéticos de su transporte al sitio de uso.

La biomasa es un recurso renovable en la medida que el agua, suelos y nutrientes sean manejados de una manera sostenible y si la rata de utilización no excede a la

de producción. Este recurso posee ventajas sobre otros porque puede ser plantada en la mayoría de sitios y puede ser almacenada hasta cuando se necesite.

El impacto ambiental generado por el uso de la biomasa está relacionado con problemas de deforestación y utilización de zonas de bosques para cultivo, aumento de la erosión y los impactos ligados a ésta, cuando el manejo del recurso no es sostenible. Durante la combustión, la biomasa genera óxidos de azufre y de hidrógeno y partículas a la atmósfera. La producción de biomasa también puede producir contaminación química de suelos y agua debido a un manejo inapropiado de herbicidas, pesticidas y fertilizantes.

La quema de residuos sólidos libera químicos peligrosos y crea cenizas con altas concentraciones de metales pesados y la competencia con la industria del reciclaje podría generar un impacto social.

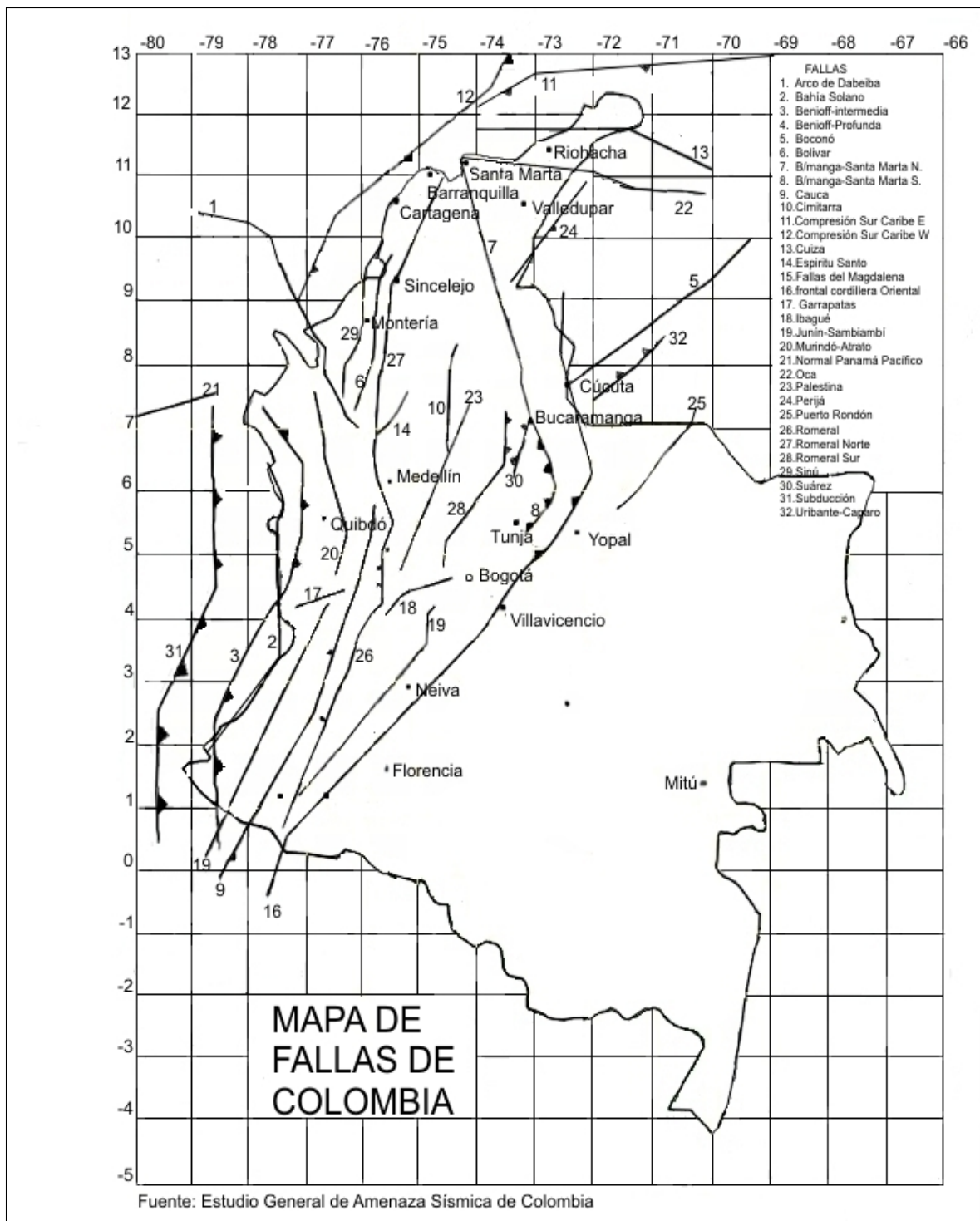
13.9 ENERGIA DE LOS OCEANOS

Las mareas, olas, corrientes y gradiente termal de los océanos contienen energía pero actualmente solo se utiliza la energía de las mareas para producción de electricidad. El proceso es similar al de las hidroeléctricas aprovechando la marea alta para acumular agua que durante la marea baja es liberada a través de turbinas convirtiendo la energía potencial en energía eléctrica. La energía de las olas también puede ser convertida en electricidad utilizándolas para comprimir el aire en tubos y éste al salir mueve las turbinas, un ejemplo son las boyas de navegación que utilizan este sistema para emitir luz.

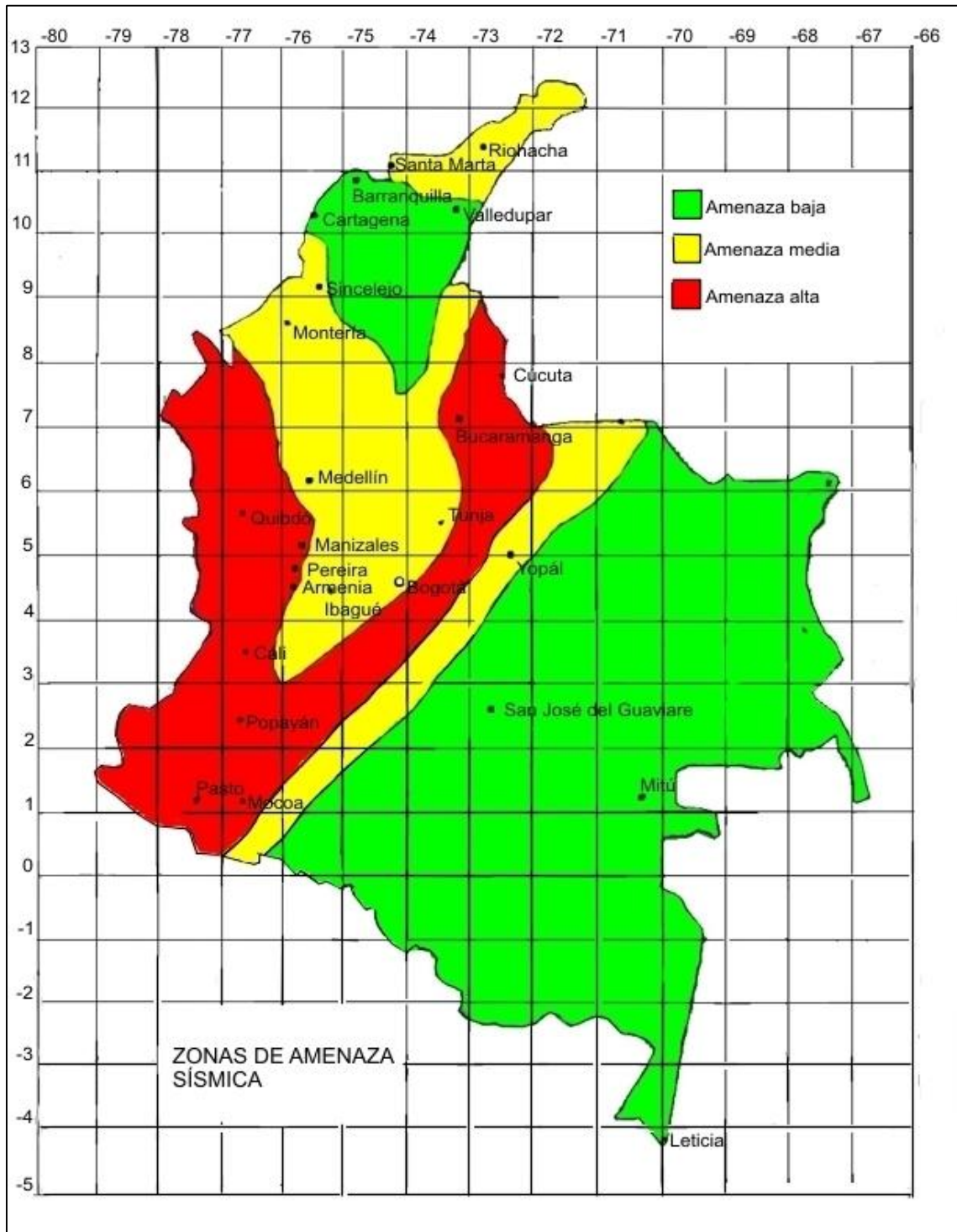
El gradiente termal o la diferencia de temperatura entre las aguas superficiales calientes y las frías del fondo en las regiones tropicales y subtropicales se puede utilizar para generación de energía eléctrica utilizando vapor de amonio, pero su eficiencia es solo del 2.5% y se constituye en un factor limitante para el desarrollo de esta tecnología.

Los impactos ambientales generados por la utilización de las diversas formas de energía de los océanos incluyen: alteración de los hábitats en los estuarios y efectos en áreas cercanas difíciles de predecir, efectos sobre los patrones de sedimentación en las costas, profundos efectos sobre la vida marina y la industria pesquera y liberación de dióxido de carbono a la atmósfera debido a que la solubilidad de éste disminuye con el aumento de la temperatura.

ANEXO 1. MAPA DE FALLAS DE COLOMBIA



ANEXO 2. ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA EN COLOMBIA



Fuente: Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia

BIBLIOGRAFIA

- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA. Estudio General de amenaza Sísmica de Colombia. Segunda edición. Ingeominas. Bogotá. Colombia. 1996
- ALLEGRE, Claude. Las iras de la tierra. Ediciones del Prado. España 1995.
- ATLAS M, Ronald and BARTHA Richard. Ecología Microbiana y Ecología Ambiental. Segunda Edición. Madrid. Pearson Educación S.A. 2002
- BIRKELAND, Peter W. Soils and geomorphology. Tercera edición. Oxford University Press, Inc. New York. 1999.
- CENTRO REGIONAL DE SISMOLOGÍA PARA AMÉRICA DEL SUR. Evaluación de los efectos económicos de los terremotos. Volumen 13C. Asociación de publicaciones educativas. Lima, Perú. 1985.
- DAVIS, George H. Structural Geology of Rocks and Regions. John Wiley and sons. Singapore. 1989.
- DEXTER, Perkins. Mineralogy Prentice Hall. Upper Saddle River. New Jersey. 2002.
- DOMENICO, Patrick A. Y SCHWARTZ, Franklin W. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1990.
- DUNCAN, Foley; McKENZIE, Gary D. y UTGARD, Russell O. Investigations in Environmental Geology. Segunda Edición. Prentice – Hall, inc. Estados Unidos. 1999.
- EASTERBROOK, Don J. Surface processes and Landforms. Segunda edición. Prentice Hall. Upper Saddle River. New Jersey. 1999.
- FETTER, C. W. Contaminant Hidrogeology. Segunda Edición. Prentice Hall. Upper Sadle River, New Jersey. EE. UU. 1999
- GOMEZ Franco, Evelio. Procesos Erosivos. Estrategias para su caracterización e implementación de sus prácticas básicas de control y prevención. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín Instituto de ciencias Naturales y Ecología – ICNE. 1999.
- HARVEY, J. C. Geología para ingenieros geotécnicos. Primera edición. Limusa. México. 1987.

- HOBBS, Bruce E. et al. Geología Estructural. Ediciones Omega S.A. Barcelona. 1981.
- INGEOMINAS. Estudio general de la amenaza sísmica de Colombia. Segunda Edición. Bogotá. 1998
- INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. Las aguas subterráneas, importancia y perspectivas. Madrid. 1993
- KEENAN, Lee y FETTER, C. W. Hydrogeology Laboratory Manual. Prentice – Hall, inc. New jersey. Estados Unidos. 1994.
- KEHEW, Alan E. Geology for Engineers and environmental Scientist. Segunda edición. Prentice – Hall, inc. Estados Unidos. 1998
- LEET, L. Don; JUDSON, Sheldon. Fundamentos de geología física. Limusa. Mexico. 1982.
- LEON ESCOBAR, Milagro. Suelos, Bosques, agricultura y Medio Ambiente. Universidad Industrial de Santander. 2004.
- LUTGENS, Frederick K y TARBUCK, Edward J. Foundations of Earth Science. Tercera edición. Prentice Hall. Estados Unidos. 1999.
- MERCIER, Jacques y VERGELY, Pierre. Tectónica. Primera reimpresión. Limusa S.A. México. 2001
- MOODY, John and Richard. El mundo prehistórico. Colección el mundo del saber. Ediciones Vidorama S.A. España.
- MUÑOZ, Harold Alberto. Revista Notivías, N° 40. Bogotá. 1998
- NUEVA REFORMA URBANA. LEY 388 DE 1997. Editorial Unión Ltda. Bogotá. 1997
- OJEDA Moncayo, Jacobo y otros. Evaluación del riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa. Guía Metodológica. Publicaciones Ingeominas. Primera edición. Bogotá. 2001.
- RHAN, Perry H. Engineering Geology an Environmental Approach. Elsevier Science Publishing Company, Inc. EE. UU. 1986.
- SCHUMM, Stanley A. et al. Active Tectonics and Alluvial Rivers. Cambridge University Press. Inglaterra. 2000.

SCHWAB, Glenn O. et al. Ingeniería de Conservación de Suelos y Agua. Primera edición. Editorial Limusa S.A. México. 1990.

TERRENCE J, Toy. et al. Soil erosion: processes, Prediction, measurement, and control. John Wiley & Sons, Inc. New York. 2002.

TJEERD H, Van Andel. New Views on an Old Planet. A History of Global Changes. Segunda Edición. Cambridge University press. Estados Unidos. 2000

YEATS, Robert S. Et al. The Geology of Earthquakes. Oxford University Press, inc. New York. 1997.

III SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE DESLIZAMIENTOS. Volúmenes I y II. Cartagena. Colombia. 2001.

SEOÁNEZ CALVO, Mariano. Contaminación del suelo: Estudios, Tratamiento y Gestión. Ediciones Mundi – prensa. España. 1999

SUÁREZ Díaz, Jaime. Manual de Ingeniería para el Control de Erosión. Bucaramanga. Colombia. 1992

VARGAS Cuervo, Germán. Guía técnica para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa. Villavicencio. Colombia. 1999.

VILLOTA, Hugo. Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. Primera Parte. Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”. Subdirección de Docencia e Investigación. Bogotá. 199

W. G, Ernst. Earth Systems Processes and Issues. Primera edición. Cambridge University press. Estados Unidos. 2000.

WICANDER, Reed and MONROE, James S. Fundamentos de Geología. Segunda Edición. International Thonson Ediciones. México. 2000.