



Plaza de El Cocuy, Boyacá, Colombia. Angelfire.com

MANUAL DE GEOLOGIA PARA INGENIEROS

Cap 09

ROCAS SEDIMENTARIAS

GONZALO DUQUE ESCOBAR

A la Universidad Nacional de Colombia en sus 150 años.

La meteorización y erosión producen partículas de diverso tamaño que son transportadas por el hielo, el agua o el aire hasta las zonas de mínima energía donde se acumulan. Una vez en reposo los sedimentos sufren procesos que los transforman en rocas sedimentarias.

Estas rocas se han formado por la consolidación o litificación de sedimentos. Los factores que determinan el tipo de roca son fundamentalmente la fuente de los sedimentos, el agente que los erosiona y transporta, y el medio de deposición y forma de litificación.

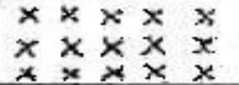

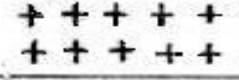
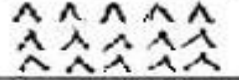
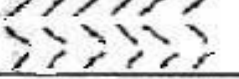


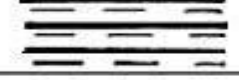
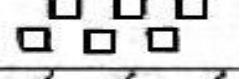
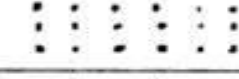
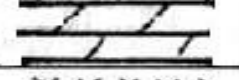
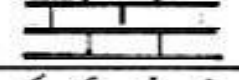
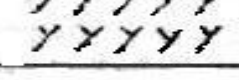
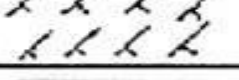

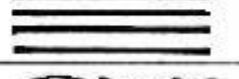
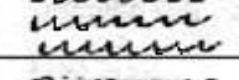
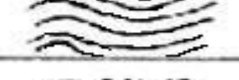
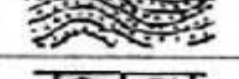



9.1. GENERALIDADES

9.1.1. Origen. Los productos de meteorización pueden ser transportados en el fondo de las corrientes (por arrastre, rodando o por saltación) o bien dentro del fluido (en suspensión, solución o flotando).

Aquellas rocas que se originan a partir de partículas que mantienen su integridad física durante el transporte, son las detríticas, por ejemplo conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas, y las que se forman por la precipitación de sustancias que se encontraban en disolución, son las de origen físico-químico, por ejemplo carbonatos, evaporitas, ferruginosas y fosfatos. Existe un tercer grupo de rocas sedimentarias, las biogénicas, en cuya formación interviene directamente la actividad de organismos vivos, por ejemplo carbonatos, fosfatos y silíceas, este grupo abarca desde las que se originan por acumulación de organismos en posición de vida (calizas de arrecifes, etc.) o que han sufrido un transporte mínimo tras su muerte (diatomitas), hasta aquéllas en cuya formación interviene la precipitación de sustancias en disolución favorecida por la actividad orgánica (tobas calcáreas formadas por la precipitación de CaCO_3 propiciada por la acción fotosintética de vegetales).

Finalmente las rocas orgánicas que son las formadas por acumulaciones de materia orgánica (carbones y petróleo)

Cuadro 11. Símbolos para la representación litológica de las principales rocas.

	Granito		Riolita
	Diorita		Andesita
	Gabro		Basalto
	Limolita		Lutita
	Halita		Arenisca
	Dolomia		Caliza
	Yeso		Anhidrita
	Carbón		lodolita
	Filita		Esquistos
	Guarcita		Gneis
	Mármol		Serpentina

Las de origen mecánico o clástico son primordialmente detritos que, transportados y depositados, se litifican por consolidación o cementación. Su clasificación se basa en el tamaño de grano de sus componentes.

Los sedimentos de origen químico, son precipitados en los cuales los cristales individuales están unidos por enlaces químicos. Dentro de las rocas de origen biógeno las más representativas son los carbonatos que se clasifican a su vez según su composición química y el tipo y origen de las partículas que las constituyen.

Los sedimentos de origen orgánico se forman por la acumulación de partes duras de organismos que, al unirse por cementación, constituyen una roca. Las rocas orgánicas se clasifican según su grado de madurez, con base en el contenido de carbono y volátiles.

En la formación de una roca sedimentaria pueden actuar más de un proceso sedimentario por lo que se producen rocas mixtas de difícil asignación a un grupo concreto. Tal es el caso, por ejemplo, de una roca formada por la acumulación in situ de las partes duras de organismos y por partículas aportadas por algún mecanismo de transporte.

9.1.2 Abundancia. En los proyectos de ingeniería las rocas sedimentarias son frecuentes. En el volumen de los primeros 15 km. de la corteza las sedimentitas son el 5%; el 95% restante son rocas ígneas, pues las metamórficas dominan los ambientes profundos. Por el área de afloramiento las sedimentarias son el 75% de la superficie el resto son ígneas, sin quedar margen de significación para las metamórficas.

Son tres las rocas sedimentarias más abundantes clasificadas por su participación: lutitas 45%, areniscas 32% y calizas 22%; otras, 1%. La propiedad fundamental de las lutitas es la plasticidad o la impermeabilidad, la de las areniscas, su posibilidad y eventualmente la dureza (de ser cuarzosa), o de servir como acuífero, y la de las calizas, la de ser roca rígida y soluble. Es también la caliza la materia prima del cemento.

9.2. DIAGENESIS

La formación de las rocas sedimentarias a partir de los sedimentos, comporta la existencia de una serie de procesos que, en general, tienden a la reducción de la porosidad y al aumento de la compacidad de los materiales. Estos procesos se engloban bajo el nombre de diagénesis.

Los procesos diagenéticos se inician antes del reposo de los componentes del sedimento, razón por la cual los fragmentos que forman las rocas detríticas pueden quedar cubiertos por capas de óxidos metálicos y se pueden formar arcillas a partir de algunos minerales que se degradan. En los ambientes marinos, sobre pisos duros, los procesos de perforación e incrustación por diversos organismos resultan frecuentes.

Entre los componentes de un sedimento en reposo circulan fluidos con iones en disolución (Ca^{2+} y CO_3^{2-}) que pueden precipitarse para formar cementos y darle rigidez a los materiales. Sin embargo, la circulación de fluidos puede también producir disolución.

Los procesos de consolidación provocan a su vez una reducción de la porosidad; los efectos visibles son la interpenetración de componentes y las superficies de disolución que afectan porciones más extensas de la roca.

El conjunto de procesos diagenéticos se desarrolla a distintas profundidades sin que exista un límite neto para los procesos típicos que ocurren en profundidad y los del metamorfismo de bajo grado. Usualmente se conviene en aceptar que este límite corresponde a la zona en la que se forma el grafito, a partir de los carbones naturales, y se volatilizan los hidrocarburos.

Los procesos diagenéticos suelen realzar las diferencias originales que existen entre los sedimentos (tamaño y color de granos, etc.) por lo que las rocas sedimentarias se configuran en capas de una cierta continuidad lateral denominadas estratos, donde normalmente su base y techo son plano-

paralelos. Algunas veces el paralelismo entre algunas capas presenta distinto ángulo de inclinación con el resto de la serie.

9.2.1 Ambientes sedimentarios. Reciben el nombre de ambientes o medios sedimentarios, los lugares donde pueden depositarse preferentemente los sedimentos.

Algunos ambientes sedimentarios están situados dentro de los **continentes**, como ocurre con el medio fluvial, el cual se forma por la deposición de partículas en el lecho y a ambos lados de los ríos, principalmente durante las crecidas, o el medio lagunar, originado por el material sedimentado en el fondo de los lagos. Otros ambientes se localizan en las **zonas costeras** y sus alrededores. Entre éstos se pueden citar los deltas, formados por los sedimentos que lleva el río al final de su curso, y las playas. Es, sin embargo, en **el mar**, donde suelen encontrarse los máximos espesores de sedimentos de plataforma continental, pero sobre todo los localizados al pie del talud continental y en la desembocadura de los cañones submarinos. En las llanuras abisales, en cambio, el espesor de los sedimentos es muy pequeño, desapareciendo prácticamente al aproximarse a las dorsales.

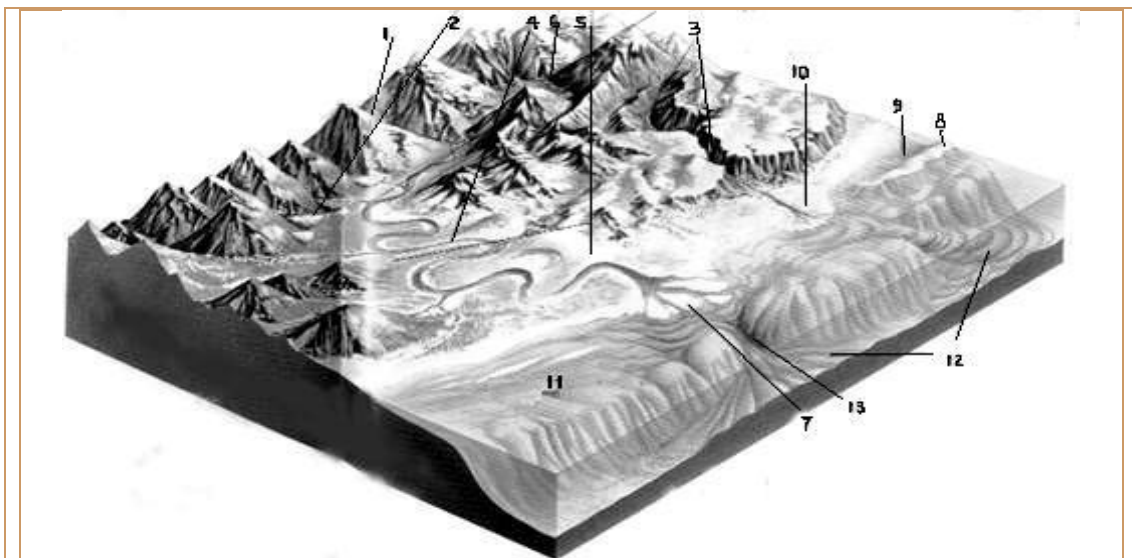


Figura 43. Ambientes sedimentarios: torrente (1), torrencial [cono aluvial (2), canal (3)], fluvial [canal (4), llanura de inundación (5)], lacustre (6), costero [delta fluvial (7), isla barrera (8), laguna (9), delta torrencial (10) plataforma (11)]. Marino [cono turbidítico (12), cañón submarino (13)]. Adaptado de Atlas de Geología. Edibook S. A.

Otras denominaciones de los depósitos se dan según el agente que los transporta, el lugar donde se depositan o la estructura del depósito. En función del **agente**, se denominan coluvial (ladera), eólico (aire), aluvial (ríos) y glacial (hielo); según el **lugar**, palustre, lacustre, marino y terrígeno, y por la **estructura**, clástico y no clástico. Tienen que concurrir varios factores para que un medio sedimentario sea eminentemente deposicional. Si se deposita **materias de origen detrítico** (partículas sólidas que han sido transportadas mecánicamente por corrientes fluidas, como ríos), el medio de transporte de las partículas tendrá que perder energía para que pueda llevarse a cabo la sedimentación del material.

En cambio, en los lugares en los que se depositan **sedimentos de origen químico**, será necesario que las condiciones físico- químicas sean adecuadas para que puedan precipitarse sustancias disueltas. En todos los casos es necesario que la zona de deposición sufra un hundimiento progresivo, lo cual posibilitará la formación de grandes espesores de sedimento.

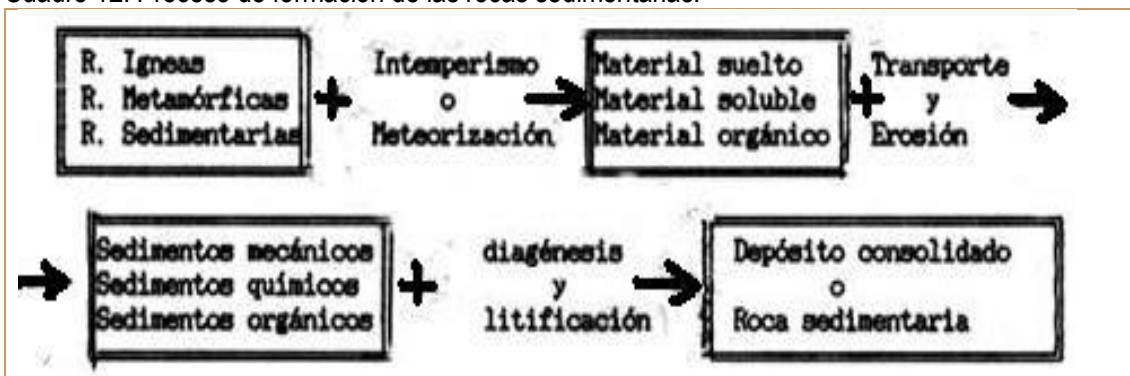
9.2.2 Principales procesos de litificación. Los principales procesos diagenéticos son la cementación, la consolidación-desección y la cristalización. El término litificación se puede entender como el proceso por el cual se forman rocas, en este caso a partir de la consolidación de los sedimentos.

- **Cementación.** Los principales agentes minerales cementantes son: la calcita y la dolomita que llegan disueltos en el agua formando con ella una solución que ocupará los intersticios del depósito. Ello demanda un material poroso y permeable, por lo que este proceso domina la formación de las areniscas, calizas y dolomías.

- **Consolidación y desección.** Dos procesos generalmente ligados, porque la consolidación trae implícita la salida del agua. No obstante en el caso de los depósitos de arena transportados por el viento, después de la evaporación se puede dar la litificación. Este proceso exige un material poroso y no necesariamente permeable. Las arcillas a un km. de profundidad, por la presión confinante, pierden el 60% del volumen y dan paso a la formación de lutitas.

- **Cristalización.** La formación de nuevos cristales (neocristalización) y el crecimiento cristalino (recristalización), permiten el endurecimiento de los depósitos, por unión de cristales individuales.

Cuadro 12. Proceso de formación de las rocas sedimentarias.



Fuente. Notas del curso de Suelos. G. Duque, Geología.

9.3. CLASIFICACION DE ROCAS SEDIMENTARIAS

Cuadro 13. Las rocas sedimentarias.

ORIGEN	AGENTE	DEPOSITO	ROCA
Mecánico	Agua	Canto rodado	Conglomerados
		Guijarro	Brechas, aglomerados
	Arena	Areniscas	
		Limo	Limolitas, lodolitas
		Arcilla	Arcillolitas, lutitas
	Viento	Médanos o dunas	Areniscas
		Loess (limo)	Limolitas
	Hielo	Till (peñascos en una matriz fina)	Morrenas y otras tillitas (peñascos en una matriz fina pero consolidados)

ORIGEN	NATURALEZA	SEDIMENTO CONSOLIDADO
Químico	Calcárea	Caliza, dolomía, travertino
	Calcárea- arcillosa	Marga
	Silicosa	Pedernal, geiserita
	Salina (evaporitas)	Sal, yeso, bórax
Orgánico	Carbonosa (% de C libre)	Turba C<50%: carbón compresible y de formación reciente
		Lignito C ≈ 50%: carbón de formación
		Intermedia
		Hulla C ≈ 75%: carbón fósil o mineral

Adaptado de Lexis 22 Mineralogía Geología, Círculo de Lectores, 1983.

9.3.1 Minerales componentes de las rocas sedimentarias. Son tres los principales: la arcilla, principalmente la illita y la caolinita, el cuarzo y la calcita. Otros minerales son los feldespatos, de sodio y calcio principalmente, dolomita, yeso, anhidrita y halita.

En los conglomerados la composición es cualquiera, dominando el cuarzo. En las areniscas, si es ortocuarcita, domina el cuarzo, si es grawaca habrá fragmentos de roca, cuarzo y arcilla y si es arcosa feldespatos, cuarzos, micas y carbonato cálcico.

En las arcillolitas habrá, hidróxidos de hierro y aluminio, en las lateritas; caolinita, en los caolines; montmorillonita, en la bentonita, y arcilla, cuarzo, feldespatos y calcita, en los loess. En las margas se tendrá carbonato cálcico y arcilla.

En travertinos, tobas, calizas, y caliches, habrá carbonato cálcico, como también en las calizas de bacterias y algas; en las cretas y calizas, conchíferas y coralinas; en las dolomías y calizas dolomíticas, formadas por procesos metasomáticos, habrá calcita y dolomita.

En el sílex, pedernal, gliceritas, trípoli, jaspe y lidita, se tiene sílice coloidal y criptocristalina. En los yesos, sal gema y otras evaporitas, habrá sulfato cálcico y cloruros de sodio, potasio y magnesio. En las sideríticas y pantanosas, que son ferruginosas, carbonato, óxidos e hidróxidos de hierro. En las fosforitas y guano, fosfatos de calcio y otros elementos.

9.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

Las principales características de las rocas sedimentarias son la estratificación, las facies y el color.

Estudiando el **entorno** actual se tienen indicios acerca de la formación de las rocas sedimentarias: los sedimentos de grano muy fino, en un entorno costero típico se depositan sobre los pantanos de sal, y los de grano más grueso, en las dunas y en la playa; en ambos casos habrá huellas fósiles que se conservarán para su interpretación futura. También el tamaño de las partículas sedimentarias tiene que ver con el entorno de deposición: los lodos pantanosos se acumulan en condiciones acuáticas de relativa calma, mientras las dunas son depositadas por el viento y las arenas de la playa donde rompen las olas.

Los granos, según su forma y tamaño demandan entornos de diferente energía y turbulencia; así la distribución de los tamaños y forma de los granos en las playas y arenas de las dunas varía: en las primeras la granulometría muestra mejor clasificación y las partículas aparecen muy bien redondeadas.

Tamaño, clasificación y forma de granos condicionan la **textura** de un sedimento. Contrario a lo que ocurre con los sedimentos de entornos de baja energía, los sedimentos transportados durante largos períodos en entornos de alta energía y depositados en condiciones similares, están bien redondeados y bien clasificados. Las corrientes rápidas transportan granos mayores no sólo en suspensión por el fluido en movimiento, sino también por saltación y rodamiento a lo largo de la superficie del lecho, mientras los lodos del entorno de un pantano de sal han sido depositados de la suspensión, fundamentalmente. Los organismos que viven dentro o en los sedimentos costeros o en un entorno cualquiera, son también huellas fósiles potenciales y útiles indicadores del entorno.

El examen de los diferentes granos de mineral presentes en las rocas sedimentarias permite establecer la naturaleza de la **roca fuente** y de los procesos de meteorización que la degradaron. La interpretación se facilita en granos gruesos como cantos de playas y se dificulta con una arena donde un grano puede ser sólo una parte de un cristal único. Una arenisca totalmente cuarzosa no informa sobre la roca madre pero sí es testigo de varios procesos de meteorización, erosión y deposición. La forma en que la roca fuente haya sido fraccionada por procesos superficiales determina la categoría de la roca sedimentaria. El grado de fraccionamiento conseguido en las rocas fuentes es de importancia económica, toda vez que favorece la formación de concentraciones de carbono, carbonato cálcico, óxidos de aluminio y de hierro y evaporitas.

Los diferentes tipos de rocas sedimentaria, pueden relacionarse no sólo con los procesos de meteorización, sino también con la **zona climática** de la Tierra en que se formaron, pues aquéllas están condicionadas por el clima, así como por las diferentes partes del ambiente tectónico sobre las cuales pueden estar operando los procesos superficiales.

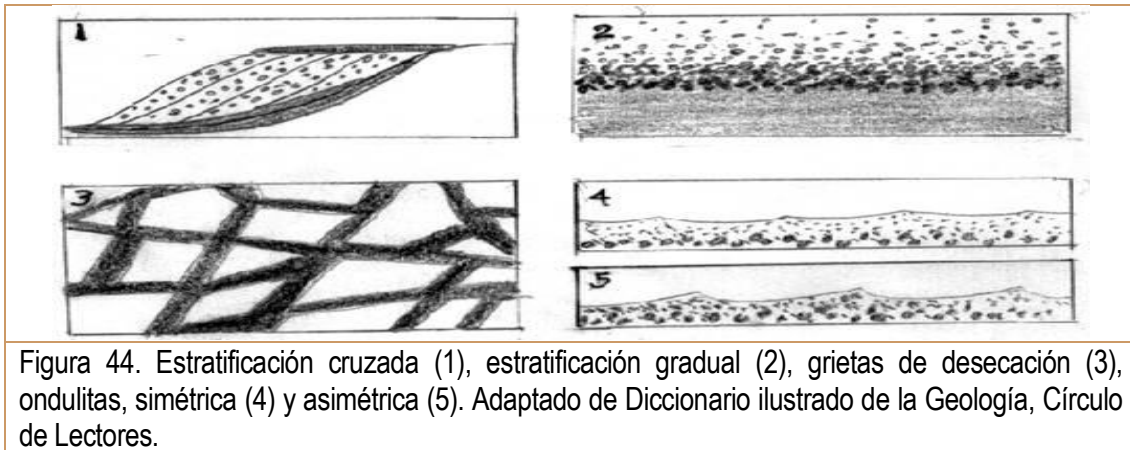


Figura 44. Estratificación cruzada (1), estratificación gradual (2), grietas de desecación (3), ondulitas, simétrica (4) y asimétrica (5). Adaptado de Diccionario ilustrado de la Geología, Círculo de Lectores.

9.4.1 La estratificación. Es la más importante. Cada capa marca la terminación de un evento. Interesa en una capa su geometría interna en el conjunto, la geometría de las capas, pues dichas estructuras ponen en evidencia el ambiente de formación. Las capas pueden ser horizontales, si el ambiente de formación es tranquilo (lacustre); onduladas, si se trata en el ambiente de las dunas; inclinadas, si el ambiente es detrítico; rizadas, cuando son marcas de ambiente de playa; cruzadas, si el ambiente es pantano, y geodas, si son capas esféricas concéntricas explicadas por un fenómeno osmótico por diferencia de salinidad.

Las grietas de desecación se producen cuando el barro húmedo se seca al aire y se genera un diseño de grietas de varios lados, típico de lagos poco profundos que se han secado.

La estratificación grano-clasificada es una estratificación en la cual las partículas mayores están en el fondo de una unidad y las pequeñas en la parte superior; la estratificación cruzada es una estratificación original en la cual los planos de los estratos están en el ángulo de la superficie principal sobre la cual los sedimentos fueron depositados; la estratificación de corriente es la misma cruzada; la estratificación de médano es una estratificación cruzada de tamaño más bien grande.

En las estructuras sedimentarias las ondulitas son marcas como ondas formadas por el movimiento del agua o del aire sobre la superficie de un sedimento recién depositado, y las dos principales ondulitas son la simétrica y las huellas fósiles de corriente asimétrica.

9.4.2 Facies sedimentaria. El término alude a la acumulación de depósitos con características específicas que gradúan lateralmente a otras acumulaciones sedimentarias, formadas simultáneamente, pero que presentan características diferentes. A veces se subdividen en litofacies o facies litológicas y biofacies o facies marina. Entre las facies de agua dulce se distinguen la fluvial y la lacustre; entre las marinas, la litoral o costera, la nerítica y la abisal, y entre las terrestres o continentales, muy variadas, la fluvial, la eólica, la glacial, etc.

Averiguar en qué tipo de ambiente se originó una roca sedimentaria tiene gran interés en geología, debido a sus múltiples aplicaciones. Hace posible, por ejemplo, reconstruir la situación de ríos, torrentes y costas, hace millones de años (reconstrucciones paleográficas); permiten averiguar los avances y retrocesos del mar que se han producido en otras épocas, así como localizar trampas estratigráficas, lo cual es de gran interés en prospección de petróleo.

9.4.3 Color. En las rocas sedimentarias los colores gris y negro pueden explicarse por la presencia de humus y otras sustancias afines (materiales carbonosos); pero el principal agente colorante son los óxidos de hierro, así: por la hematita (Fe_2O_2) color rosado; por la limonita, (hierro de pantanos) amarillo y café; por la goethita (hierro acicular) pardo oscuro a negro, y por el hierro libre o nativo, verde, púrpura o negro.

Se recuerda que el color es una de las propiedades físicas más importantes de los minerales, sin embargo, deben tenerse presente:

- Puede ser constante y definido para varias muestras de un mismo mineral (la pirita de brillo metálico es un indicador) o puede variar de una a otra muestra en un mismo mineral (en el cuarzo el color no es indicativo).
- Como precaución, la identificación por los minerales se basará en muestras frescas. Se tendrá en cuenta la pátina, que es una alteración superficial pigmentada por otros minerales.
- En minerales opacos y de brillo metálico, no alterados, se expondrá el color del mineral. No obstante el color puede variar entre límites amplios.

9.5. DESCRIPCION DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

La descripción de las rocas se hace en lenguaje gráfico y alfabético. El lenguaje gráfico se apoya en diagramas y planos, como se muestra en la figura 45. Cada tipo de roca y cada rasgo estructural, tiene su propia nomenclatura.

9.5.1 Areniscas. La mayoría están compuestas principalmente de granos de cuarzo y arcilla en pequeñas cantidades. Pueden ser, por su composición, arcosa, si son ricas en feldespatos; cuarzosas, ricas en SiO_4 ; grawacas, ricas en ferromagnesianos, y micazas ricas en micas. También las areniscas se denominan, por la matriz cementante, así: ferruginosa, silicosa, arcillosa y calcárea. Las areniscas son útiles en construcción, revestimientos y fabricación de vidrio.

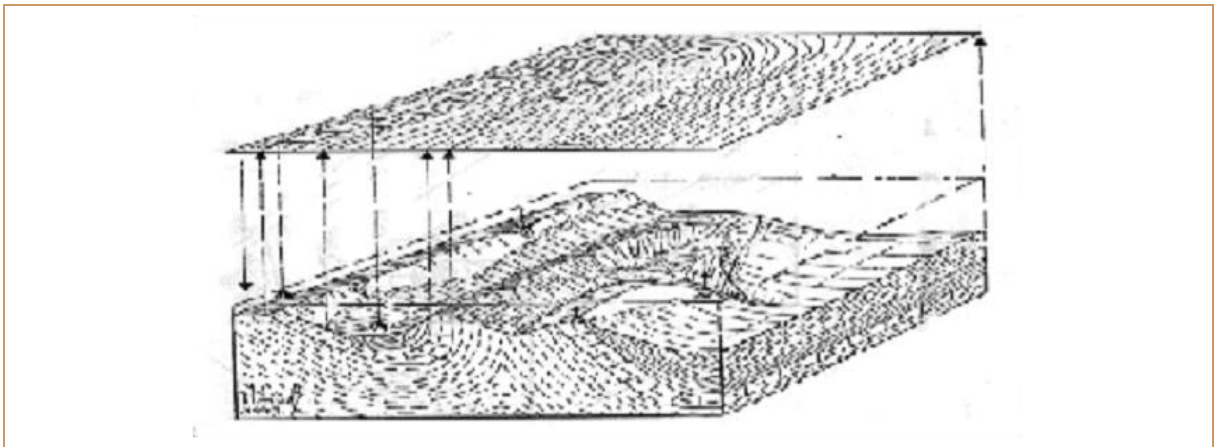


Figura 45. Representación de una estructura sedimentaria (pliegue): arriba, expresión en carta geológica; abajo, expresión en diagrama de bloque. Tomado de las notas del curso de geología de Pedro Hernández, U. Nal...

9.5.2 Areniscas de cuarzo. Son el resultado de una considerable fragmentación de restos de roca soltados por procesos de meteorización como lo demuestra su pobreza en minerales incapaces de resistir la meteorización química.

Texturalmente exhiben gran porosidad y permeabilidad, por lo menos inmediatamente después de su deposición, pues más tarde los poros serán rellenados por cemento mineral, compuesto frecuentemente de sílice o calcita, e incluso hierro. Una variedad, de las arenas verdes, es arenisca de cuarzo con glauconita, típica de ambiente marino, y otra las areniscas (y pizarras) de los lechos rojos, a causa de las hematites que recubren los granos de arena y que denuncian un grado de aridez del entorno de deposición donde la lámina acuífera permaneció baja permitiendo a los minerales de hierro su oxidación.

9.5.3 Arcosa. Esta arenisca además de cuarzo, tiene feldespato en una cantidad del orden del 25%. Ambos minerales soportan la degradación mecánica durante el transporte, siendo el segundo más susceptible a la descomposición. Su aparición en proporciones mayores a las de un pequeño porcentaje, evidencian condiciones de aridez y de transporte corto o rápido.

9.5.4 Grawaca. El término significa gris y duro y describe bien esta arenisca que contiene una mezcla de productos de meteorización de rocas ígneas y metamórficas, en los que se incluyen, además de partículas de descomposición mecánica, minerales arcillosos de la meteorización química. Las grawacas son el resultado de un fraccionamiento incompleto de productos de meteorización, reflejado en la pobre clasificación y escasa redondez de los clastos. Las rocas usualmente duras y oscuras en extremo pueden confundirse con basaltos si las variedades de grano son finas. Se asocian con pizarras negras, sobre todo cuando son fruto de corrientes de turbidez o de densidad.

9.5.5 Brechas. La palabra significa cascote y con ellas se describe una roca formada por fragmentos angulosos; dicha angulosidad significa una cantidad mínima de transporte, razón por la cual la fuente está cercana y puede estar asociada a arrecifes de coral, fósil y moderno. Los depósitos de brechas pueden formarse por la meteorización mecánica en la cara de los acantilados en cuya base se forman los taludes o depósitos de deyección; también pueden ser depositados por ríos de flujo esporádico en regiones áridas. Las brechas son útiles en construcción, revestimiento y decoración.

9.5.6 Conglomerados. Se distinguen de las brechas por la naturaleza redondeada de sus clastos. Si los clastos se tocan entre sí se dice que es clastosoportado y se sabe que ha sido depositado en condiciones de alta energía, como puede ser el contexto de playa o la llanura de inundación de un gran río no sujeto a períodos de desecación. Si es matriz soportado, caso en que los clastos más

grandes se separan por una matriz fina de arena y arcilla, indica que el material sedimentario fue transportado y depositado rápidamente sin dar lugar a la clasificación del depósito. Tal es el caso de los conos aluviales con inundaciones rápidas.

De otro lado existen conglomerados extraformacionales compuestos por clastos de fuera del área de deposición y conglomerados intraformacionales derivados de la erosión de sedimentos locales, como es el caso de un banco de río cercano. Los conglomerados, por las gravas, son útiles para el hormigón.

9.5.7 Rocas calcáreas. Calizas y dolomías, contienen por lo menos la mitad, o bien de calcita o bien de dolomita. Ambos minerales pueden estar formados como precipitaciones directas del agua del mar, pero la forma más importante en la que el calcio y el magnesio - liberados originalmente por meteorización química- quedan fijados, es mediante la secreción de minerales carbonatados, por animales y plantas. En la actualidad, los sedimentos calcáreos, aparte de los lodos de mares profundos, se encuentran frecuentemente sólo en clima tropical y subtropical donde florecen los organismos secretores del carbonato. Su aparición, la de antiguas rocas calcáreas, es un indicador paleoclimático.

9.5.8 Calizas. Pueden ser de agua dulce o de origen marino, y componerse de material químicamente precipitado, orgánico o detrítico. La mayoría de las calizas se formaron en aguas poco profundas y las condiciones de turbulencia o de ambiente tranquilo se reflejan en la existencia del soporte de grano con relleno de calcita cementante en el primer caso, o la existencia de espacios porosos rellenos con lodo carbonatado, en el segundo.

Las calizas son la materia prima de la cal y el cemento, complementando el proceso con arcillas ferruginosas. Las calizas fosfóricas son útiles como materia prima para fertilizantes. Hay calizas útiles en litografía (detrítica de ambiente marino) y para productos refractarios (organógena marina).

9.5.9 Dolomías. La roca tiene una mezcla de carbonato cálcico y magnésico y puede tener dos orígenes. El primero aparece dentro de la cuenca de deposición, sólo a unos cuantos decímetros por debajo de la superficie e inmediatamente después de la deposición de la caliza, en un proceso asociado a la formación de las evaporitas, y el segundo tiene lugar a más profundidad y mucho tiempo después de la deposición (aquí se produce una dolomita de grano grueso y la sustitución está causada por soluciones ricas en magnesio que se filtran a través de la caliza).

9.5.10 Rocas ferruginosas. Pueden ser de tres tipos: las ferruginosas veteadas, de edad precámbrica, que muestran láminas de óxido de hierro, carbonato de hierro o sulfuro de hierro, y sílice tipo calcedonia. Contienen varias estructuras sedimentarias incluyendo marcas de rizadura y grietas de lodo, las que sugieren deposición en aguas poco profundas. Las rocas de hierro oolítico sedimentario, formadas durante los últimos 600 millones de años, que poseen las características texturales de las calizas, pero no están compuestas de carbonato cálcico sino de minerales de hierro, incluyendo el carbonato de hierro y los silicatos ferroaluminicos que pueden formarse sólo en condiciones anóxicas, y las rocas ferruginosas de arcilla, que resultan insignificantes cuantitativamente, hoy en día, pero que soportaron la industria del acero asociada a campos de

carbón. Están conformadas por acumulaciones redondas de carbonato de hierro, que sustituyen las pizarras en muchos estratos, especialmente cubriendo vetas de carbón. Estas rocas, de ambiente continental y marino, facilitan la obtención del hierro.

9.5.11 Bauxitas y lateritas. Dos productos de la meteorización química en donde el material no ha sido disuelto incluso después del más intenso ataque por aguas subterráneas ácidas y se han dado condiciones para que la erosión mecánica y la retirada del material sean virtualmente nulas. Este es el ambiente tropical de las tierras bajas o las áreas planas mal drenadas, donde la capa residual del perfil de meteorización, compuesta de hidróxidos de hierro y aluminio, se conoce como laterita. Cuando la mayor parte de los componentes de hierro es lixiviada de una laterita, se convierte en la bauxita; ambos depósitos están coloreados generalmente con profundos tintes de rojo, marrón y naranja.

9.5.12 Evaporitas. Son rocas sedimentarias producidas en clima cálido y árido, por la evaporación del agua del mar. Experimentalmente al evaporarse el agua marina se origina la formación de carbonato cálcico, después sulfato cálcico (yeso) y finalmente las sales más solubles, incluida la halita (sal común). Sin embargo, cuantitativamente las evaporitas no pueden deberse a una simple evaporación puesto que una capa de metro y medio de halita requiere la desecación de 100 metros de profundidad marina y hay muchos depósitos de sal con cientos de metros de espesor en mares abiertos. El resultado de tales procesos, si se dan sedimentos porosos, es que la caliza original se sustituye por dolomita de grano fino y el sulfato cálcico (anhidrita) crece dentro del sedimento y lo deforma.

9.5.13 Chert. Roca silícea densa y dura, compuesta de sílice casi pura, bien con una cristalización extremadamente fina o criptocristalina que no muestra evidencia alguna de estructura cristalina regular. El jaspe, el pedernal y el ópalo son variedades denominadas calcedonias. Hay dos tipos diferentes de chert: los que sustituyen a las calizas en forma de nódulos o vetas de calcedonia y los realmente estratificados asociados con pizarras o con formaciones estratificadas de piedra ferruginosa. Los primeros provienen de microfósiles silíceos como los organismos unicelulares marinos llamados radiolarios; los segundos forman el sílex, son de origen inorgánico y pueden estar asociados a precipitados, lavas submarinas o ceniza volcánica.

9.5.14 Shale o lutita. Se denominan así a las limolitas y arcillolitas mejor consolidadas. La marga es una lutita calcárea.

Según el grado de consolidación diagenética, pueden clasificarse así:

- **De bajo grado de consolidación.** Arcillolita, lodolita y limolita.
- **De mediano grado de consolidación.** Shale arenoso, shale lodoso y limolita laminada.
- **De alto grado de consolidación.** Argilita, una roca más competente que las anteriores.

Aunque la argilita sea más resistente y menos deformable, no es por ello la más durable, pues las lutitas, pueden tener mucho o poco cementante pero su durabilidad está supeditada a su naturaleza silíceo, ferruginosa o calcárea.

9.6. SEDIMENTOS ORGANICOS

Los compuestos orgánicos se descomponen rápidamente por la acción de bacterias anaeróbicas (o de putrefacción) pues en contacto con el aire se oxidan por la acción de bacterias aeróbicas (que consumen oxígeno). Si los materiales se cubren de aguas pobres en oxígeno se fermentan por la acción anaeróbica incrementando su porcentaje de carbono libre.

9.6.1 Carbón y petróleo. El carbón se forma en los continentes a partir de materiales vegetales; el petróleo en el océano a partir de microorganismos animales y vegetales (plancton).

Del metamorfismo de los carbones se obtienen esquistos grafitosos, no el diamante, asociado a rocas ígneas ultrabásicas.

- **El carbón.** Existen dos tipos de cuencas hulleras, las parálicas o costeras como el Cerrejón, que son extensas pero de poca potencia (medio metro de espesor en promedio) y las límnicas o intramontañosas, como lo es la cuenca carbonífera de Quinchía-Riosucio, del terciario carbonífero de Antioquia, que son de poca extensión pero donde la potencia de los estratos de carbón llega a los 5 metros en promedio.

En las cuencas costeras los estratos del cicloclima son: conglomerados, areniscas, pizarras arenosas y con raíces, pizarras fósiles y estériles, vienen luego las capas marinas (caliza marina y pizarra marina, ambas con fósiles y pizarras ferruginosas). En las cuencas continentales, faltan en el cicloclima las capas marinas.

Si día a día, El Cerrejón y la Drummond exportan más de 150 mil toneladas de carbón, la clave para extraer el carbón andino, radica en implementar medios de transporte más económicos, como lo son las líneas férreas y la hidrovías del Magdalena, logrando de esa manera precios remunerativos para hacer viable una minería técnicamente desarrollada y social y ambientalmente responsable.

También habrá que recordar que mientras el petróleo se negocia en tiempo real, el carbón no, dado que recordar que el negocio responde a mercados de futuros: cuando se hace un pedido de carbón, se fijan los rangos del poder calorífico, granulometría, volátiles y contenido de azufre que satisfacen al cliente, y luego se procede a un acuerdo de precios, donde el valor final permite la venta de carbones de baja calidad, arrastrados por los de buena calidad que participan de la mezcla. Dada la alta calidad de los carbones de los distritos carboníferos de la Cordillera Oriental, y la posibilidad de implementar el Ferrocarril Cafetero para articular el sistema férreo de la región andina, esto resulta importante para sacar dicho producto a los mercados de la Cuenca del Pacífico, resolviendo de paso las barreras de carga para viabilizar la inversión en líneas férreas y de menor calidad de los carbones de la cuenca del río Cauca.

Ver: **Sistema Bimodal Cafetero** <https://youtu.be/26q-zGOY5N4>

- **Petróleo.** Los hidrocarburos sólidos, líquidos y gaseosos dependen de la longitud de las cadenas de los compuestos. Las largas para los primeros, por ej., asfalto y betunes, las más cortas para los gaseosos, como metano, acetileno, propano y butano. La porción líquida flotará sobre aguas marinas fósiles. La presión de extracción del yacimiento la dan los gases, disueltos. Todo el compuesto se origina del plancton que por acción anaeróbica, similar al proceso de carbonatación, se transforma en sapropel - hay carbón sapropélico- y luego en hidrocarburos.

La roca madre es marina pero en la orogenia el petróleo aprovecha acuíferos y emigra al continente a zonas de menor presión con dos posibilidades: dispersarse en la atmósfera para perderse en la acción anaeróbica o entrar a reservorios preservándose gracias a trampas de cinco tipos: pliegues anticlinales, fallas, diapiros salinos (domos), lentes de masas coralinas (calizas) y otros tipos de discordancias.

9.7. FASES DE EXPLORACION GEOLOGICA

La geología de campo es un método de prospección de bajo costo pero con bajo nivel de eficiencia respecto a la información que demanda la inversión para la explotación de recursos.

En la fig. 46 la parte más eficiente de este método es la primera porción de la curva A, donde por regla general el nivel de información obtenido alcanza cerca del 30% de lo demandado. Si se continúa con la inversión, el porcentaje de información no crece, pues la curva ya es plana. Lo contrario ocurre con las perforaciones exploratorias, son de alto costo y sólo después de una inversión importante muestran óptima eficiencia (la curva C se levanta) y gran alcance (llega al 100% de información). Por costos y eficiencia los métodos geofísicos son intermedios entre los señalados (ver curva B). Las abscisas tienen escalas de costos diferentes, para cada método.

De lo anterior se desprende que existe una ruta óptima resultante de la aplicación debida y combinada de los tres métodos de exploración; primero se recurrirá a la geología de campo con costos del primer orden; luego a la prospección geofísica (entre m y n) con costos de segundo orden, y finalmente a los pozos exploratorios, para obtener el 100% de información demandada, siendo los costos del último método, de tres órdenes, aplicables sólo a los últimos niveles de información faltantes. La economía proveniente de la combinación de métodos surge de la consecución de información más económica en los primeros niveles.

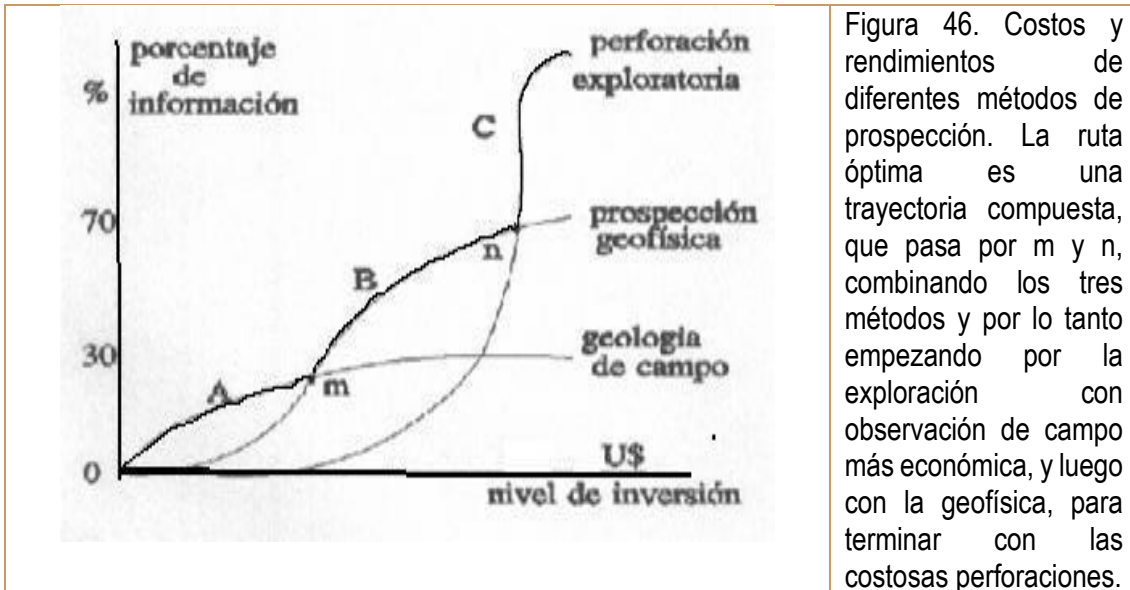


Figura 46. Costos y rendimientos de diferentes métodos de prospección. La ruta óptima es una trayectoria compuesta, que pasa por m y n, combinando los tres métodos y por lo tanto empezando por la exploración con observación de campo más económica, y luego con la geofísica, para terminar con las costosas perforaciones.

9.8. EJEMPLOS DE SEDIMENTITAS EN COLOMBIA

En la Serranía de la Macarena, la región norte exhibe una sucesión rítmica de grawacas turbidíticas de grano fino a grueso y color gris. Hay calizas delgadas fosilíferas y shale gris oscuro, arenitas finogranulares cuarcíticas muy micáceas, que gradan a arenitas arcillosas cuarcíticas y shale arenoso rojo. Son sedimentitas, además, todas las secuencias del paleozoico temprano.

En la región de los Llanos Orientales hay remanentes de coberturas detríticas del precámbrico con arenitas de cuarzo blancas y grises de grano fino a medio, bien gradadas, en estratos delgados a gruesos intercalados con arcillolitas grises, verdes o rojas. En la región de la selva amazónica las arenitas rojas oscuras se intercalan con tobas y materiales vulcanoclásticos. En la margen llanera al sur-oriental de Bogotá, las sedimentitas, que son de ambiente pericontinental, están constituidas por calizas, arcillolitas rojas, areniscas, conglomerados, arcillolitas y limolitas grises fosilíferas.

En la Sierra Nevada se encuentran además de pelitas, ruditas y calizas del paleozoico, además pelitas y tobas del mesozoico y coberturas locales pelíticas y calcáreas.

En la región del Cerrejón se presenta una secuencia clástica a vulcanoclástica granodecreciente: los sedimentos de grano muy fino conglomerados, areniscas, lodolitas con intercalaciones calcáreas, localmente sedimentitas rojas del mesozoico temprano, y otra secuencia, de hasta 1000 metros de espesor, de arenitas, lodolitas, calizas y rocas comúnmente ricas en materia orgánica depositadas en ambientes predominantemente marinos durante el mesozoico tardío. Más reciente se presenta otra secuencia clástica de arenitas y lodolitas con mantos de carbón, depositada en ambiente marino transicional y continental durante el cenozoico, (terciario). Su espesor alcanza 1000 metros.

En la península de la Guajira hay lodolitas rojas, verdes y grises, arenitas pardas, conglomerados, calizas y lutitas calcáreas. Al NW hay un supraterrano terciario marino. En la baja Guajira una secuencia de arenitas y limolitas en la base y, localmente, capas delgadas de carbón ricas en materia orgánica y calizas glauconíticas depositadas en ambiente transicional a marino, a finales del cretácico.

Igualmente, una secuencia de arenitas y lodolitas de colores rojizos suprayacida por otras oscuras de ambiente continental a marino, del mesozoico tardío. En la región de Santa Marta se tiene una cobertura pelítica y calcárea y, localmente, mantos de carbón.

En Córdoba hay turbiditas con fragmentos de serpentinitas, shale, chert y tobas. Más al sur y al occidente del río Cauca, hasta Cartago, hay turbiditas fino a grueso granulares, chert, calizas y piroclastitas básicas. Continuando desde Cartago hacia el sur, la estratigrafía se repite pero presenta metamorfismo. En Santander del Norte hay una sedimentación predominantemente samítica y pelítica y localmente calcárea que reposa discordantemente sobre el basamento ígneo-metamórfico. Entre Tunja y Bucaramanga, región de la Floresta, hay una sedimentación pericontinental durante el paleozoico temprano que se reanuda posteriormente. Las sedimentitas son conglomerados, arcillolitas generalmente amarillentas, limolitas y areniscas.

Al sur de Ibagué, y hasta Mocoa, hay sedimentitas del paleozoico medio y superior con sedimentos calcáreos epicontinentales del mesozoico. Entre los Llanos orientales y el sistema de Romeral, en la región que comprende Cundinamarca y Santander, hay sedimentitas clásticas, en desarrollos faciales, y calizas bioclásticas y evaporitas. Se trata de una sedimentación epicontinental que culmina con el levantamiento progresivo a finales del mesozoico.

La región de los valles del San Juan-Atrato y la costa Pacífica al sur de Buenaventura, presenta shales, arenitas, conglomerados turbidíticos y calizas en menor proporción. Localmente se encuentran afloramientos de arenitas cuarzosas. La región del Baudó muestra piroclastitas básicas, arenitas turbidíticas, shale, chert y calizas. Al norte, la región del Sinú tiene turbiditas, hemipelágicas (carbonatos y silicatos) y depósitos marinos terrígenos.

9.9. CARBÓN ANDINO COLOMBIANO

En 2014, la producción nacional de carbón mineral superó los 84 millones de toneladas, 93% de ella concentrada en La Guajira y Cesar donde la explotación es a gran escala, y 7% en el interior donde se destacaron los distritos carboníferos de Santander, Cundinamarca y Boyacá, y en menor grado Antioquia, todos estos explotados con una minería de corte artesanal y de alta generación de empleo. Colombia cuenta con unas reservas medidas de 7mil millones de toneladas MT de carbón.

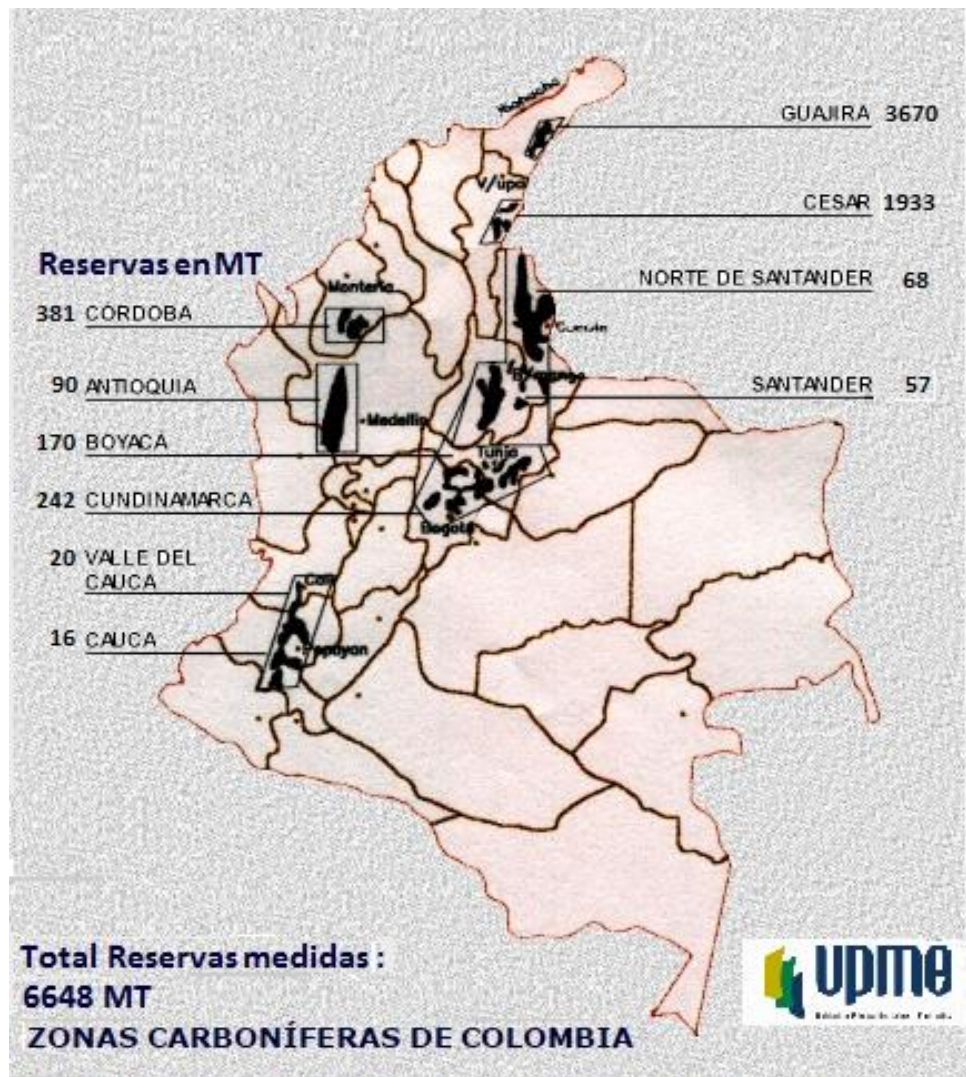


Imagen 48: Distritos carboníferos y reservas medidas de carbón en Colombia, en millones de toneladas MT. Fuente: UPME.

Los carbones colombianos que son básicamente duros, bajos en azufre y de elevado poder calorífico, pueden tener gran desempeño durante las próximas décadas como carbones térmicos de cara a la crisis ambiental. Pese a que por el cambio climático al 2050 deberá reducirse el 80% del consumo mundial de carbón, el 50% del gas natural y el 30% del petróleo, habrá que consumir las enormes reservas del país en los próximos 40 años, asunto por fortuna viable gracias a que todo el carbón de Colombia es exportable.

La Región Andina de Colombia, con sus importantes yacimientos mineros según el inventario de Ingeominas (1972), aunque cuenta con información cartográfica estandarizada y oficializada de su geología, debería propender no sólo por la exploración geológica, una actividad importante para el desarrollo del conocimiento científico y la identificación del potencial de los recursos minerales, sino por su transformación incentivando la inversión minera, minero-energética e industrial, para impulsar el progreso económico y social del país.

Ya se ha citado la visión al respecto de Gabriel Poveda Ramos proponiendo varias industrias químicas de base minera como las contempladas en el "Plan Minero- Industrial de Caldas", y he señalado las ventajas del Magdalena Centro y del Corredor del Cauca para su emplazamiento,

gracias a su ubicación respecto a nuestros escenarios energéticos y de transporte, entre otras ventajas como agua disponible y recurso humano. Me referiré ahora al carbón mineral, recurso que en el quinquenio 2006-2010 aportó al fondo nacional de regalías 0,8 billones de pesos anuales y cuantiosas divisas por su participación del 35% en el PIB minero de 2012, un bien aún demandado en el mercado hemisférico configurado por consumidores de carbón térmico, que seguirá siendo estratégico para empresas de fundición ferrosa y no ferrosa, y siderúrgicas importadoras de coque.

Colombia, con el siglo XXI entra al escenario mundial del carbón, donde se consolida como sexto exportador mundial en 2004, cuando el comercio del período 1980-2004 en Asia-Pacífico aumentaba 3,6 veces y el consumo mundial pasaba de 2.780 millones de toneladas Mt a 4.282 Mt. Poseemos las mayores reservas de carbón en América Latina: 17 mil Mt, de las cuales 7 mil Mt son medidas, en un escenario donde el carbón de la costa norte colombiana, aunque representa el 90% del recurso, por ser térmico y contar con mayores sustitutos, no tiene las ventajas del carbón coquizable y bajo contenido en azufre existente en varios yacimientos intra-montañosos de la Cordillera Oriental colombiana, un bien aún con demanda global estable, que demanda el ferrocarril andino como medio de transporte eficiente para ubicarlo sobre la cuenca del Pacífico.

Mientras cada día Cerrejón saca 9,2 trenes de diez mil toneladas, y Drummond 8,5 trenes, cuantías que sumadas equivalen a 61 Mt anuales, y Antioquia con 90 Mt de reservas medidas produce 1 Mt por año, en 2013 el Tren de Occidente movilizó sólo 150 mil toneladas de carga. De ahí la propuesta del Ferrocarril Cafetero entre La Dorada y el Km 41, para sacar inicialmente 5 Mt del carbón por año, que provendría de la Región Andina con destino al Pacífico, cantidad equivalente a seis trenes de montaña, cada uno llevando 50 vagones de 50 toneladas, cantidad suficiente para financiar el Túnel Cumanday y el corredor bimodal cafetero soportado en el Ferrocarril Cafetero como ferrovía y línea férrea, propuesto en apartes de esta obra.

Sabemos que el petróleo, después de desplazar al carbón como recurso energético a mediados del Siglo XX, marca el comportamiento del mercado energético internacional: primero, con la crisis energética de 1973 resultado de la confrontación árabe – israelí; luego, con la revolución en Irán (1979) y su guerra con Irak (1980); y ahora, con la destorcida de precios favorecida por la OPEP, previniendo los efectos de largo plazo relacionados con la gran escalada de la exploración – explotación, las tendencias generalizadas hacia la conservación de energía y la investigación de fuentes alternas previendo atenuar el cambio climático. Mientras los dos primeros momentos incrementaron el precio de los combustibles fósiles, el segundo ha logrado lo contrario.

A diferencia del petróleo que se vende de forma directa, el mercadeo del carbón responde a operaciones de futuro: se acuerdan previamente las características del carbón, como son poder calorífico, contenidos de azufre y volátiles, y granulometría. Al gestionar su precio según dichas cuantías acordes a su empleo, el valor estará condicionado por otras consideraciones para el cliente, dado que para un mismo uso como lo es el energético, el patrón de compra temporal depende del destino: se negocia caro cuando el país comprador en contratos ocasionales busca satisfacer necesidades de consumo que demandan energía fluctuante, o a precios estables mediante contratos de largo plazo, para asegurar un suministro a bajo costo cuando se trata de producción industrial que requiere energía de base.

[Ref. La Patria, Manizales, 2015.01.5].

9.10. ARROYO BRUNO, ENTRE LA MUERTE NEGRA Y LA VIDA WAYUU

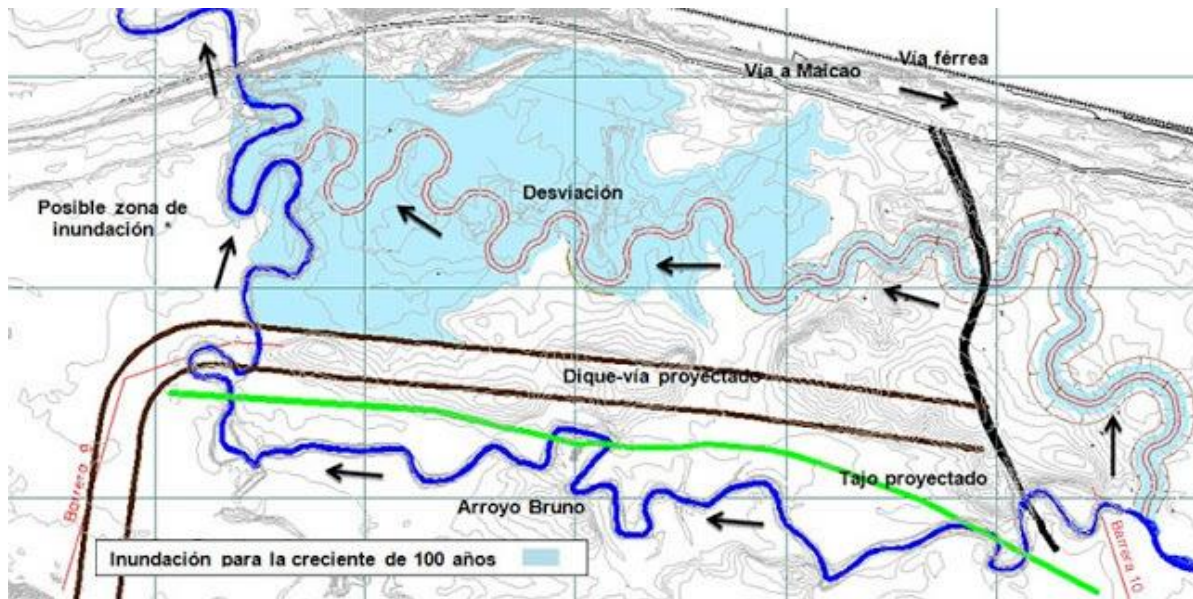


Imagen 50: Área de intervención, en <http://www.cerrejon.com>

Resumen: Dado que los antecedentes de la empresa carbonera El Cerrejón en la solución de conflictos que terminan en negociación directa con campesinos que quedan desarraigados al perder su cultura, no son buenos ¿valdrá la pena que a cambio de las regalías de 40 millones de toneladas de carbón adicionales, al trasladar 700 m el arroyo Bruno para excavar su cuenca, como consecuencia de la destrucción de la estructura ecológica del cuerpo de agua y el acuífero, se comprometa la supervivencia de miles de indígenas wayuu y de grupos afro-descendientes en La Guajira?

Hasta no contar con el consentimiento favorable de una consulta popular, la Sala Plena de la Corte Constitucional ha dicho no a la pretensión de Cerrejón de explotar carbón sobre el arroyo Bruno, dejando en firme la suspensión de las obras que desplazarían dicho arroyo con graves consecuencias ambientales y sociales para el territorio wayuu: la escasez del agua que con frecuencia afecta a varias comunidades de la media y alta Guajira, una situación que reiterativamente crea dificultades durante las temporadas de intenso verano, es una amenaza severa toda vez que al secarse cultivos y pasturas con impacto para los animales, agrava el círculo fatal por las enfermedades derivadas de sequías y carencias alimentarias.

La exótica península de La Guajira parcialmente compartida con Venezuela, para Colombia no solo es sinónimo de la sal de Manaure y de la tragedia del pueblo Wayuu dada la mortalidad infantil asociada a la falta de agua y la desnutrición, sino también de cuantiosas regalías generadas por la explotación de su enorme potencial de carbón y gas natural, donde la Anla y Corpoguajira otorgan las licencias ambientales, amén de otras problemáticas como la corrupción en contratación de programas de educación, salud, atención a infancia y obras civiles. Allí, las comunidades indígenas que ancestralmente han ocupado el territorio, viven principalmente de la ganadería trashumante, la pesca, la extracción de yeso y sal marina, y ocasionalmente del comercio o el cultivo estacional.

El arroyo Bruno es un cuerpo de agua intermitente con comportamiento bimodal que nace en la Serranía del Perijá, y en sus 26 kilómetros de recorrido transitando con dirección noroeste baña el paisaje de estepa para luego desembocar en el río Ranchería. El desvío del cauce para excavar su cuenca en dominios de la multinacional expandiendo la zona de explotación y el uso del agua para destinarla a las medidas ambientales de control de polvo, son dos intervenciones que pese a

estar incluidas en los planes de la compañía desde 1998, de contar con licencias y de contemplar el equilibrio dinámico del caño y otros requerimientos técnicos, no solo atentan contra el derecho al agua, sino que también causarían la pérdida de diversidad biológica y generarían cambios en las prácticas y usos del suelo. Esto, a cambio de las regalías de 40 millones de toneladas de carbón adicionales, compromete la supervivencia de miles de indígenas wayuu y de grupos afrodescendientes.

Mientras el per cápita de agua en la Guajira es inferior a un litro por segundo al día, contra un consumo de 17 millones de litros diarios que requiere Cerrejón, con el desvío del citado cauce y la explotación carbonífera en el subsuelo de dicho cuerpo de agua cuyo caudal medio alcanza 0,9 metros cúbicos por segundo, además de la amenaza de desertificación y del daño severo e irreversible al ecosistema, se afectaría el suministro para varios asentamientos de la península, y con ello una función social fundamental de dicha fuente de aprovisionamiento del vital líquido que, transportado en vehículos día a día a lo largo y ancho de La Guajira, satisface las necesidades en Albania, Maicao, Uribia, Riohacha y algunos sectores de Manaure.

Es que los antecedentes de la empresa carbonera en la solución de conflictos que terminan en negociación directa con campesinos que quedan desarraigados al perder su cultura, o que transan presionados al ver iniciados los trámites de desalojo, no son buenos: como prueba estarían las historias de las comunidades de Chancleta, Patilla, el Roche y Tabaco, que tras largos procesos de reasentamiento, reparación colectiva o negociación directa, recibieron casas con deficiencias de servicios públicos y predios en tierras áridas, que agravaron su calidad de vida.

Si para advertir de la fragilidad del territorio guajiro frente a la amenaza al cambio climático, basta señalar que en lugares como Uribia ocasionalmente se han secado los 350 reservorios construidos para proveer del vital líquido a sus 280 mil habitantes del área rural; también podríamos cuestionar las regalías para la nación estimadas en un billón de pesos anuales provenientes del carbón extraído, si esto implica comprometer la seguridad alimentaria de grupos vulnerables, cuando en la última década entre 400 y 500 niños Wayuu han muerto por desnutrición.

[Ref.: La Patria. Manizales, 2017/12/04]

9.11. ¿CUÁL ES EL MEJOR SISTEMA DE TRANSPORTE PARA COLOMBIA?

Resumen: *El transporte férreo y el fluvial suelen ser más eficientes que el de las tractomulas que hoy tenemos. Por eso esta propuesta de un sistema intermodal, y de cuáles serían las rutas y las obras prioritarias para los próximos años: expandir el sistema ferroviario articulando la región Andina para salir del Altiplano hasta los mares mediante el Ferrocarril Cafetero entre La Dorada y el Km 41, y el corredor férreo del Cauca yendo desde Buenaventura hasta Urabá incluyendo la variante de Loboguerrero para hacer eficiente el Ferrocarril del Pacífico; esto con el objeto de implementar un sistema intermodal de carga soportado en corredores logísticos apalancados en trenes e hidrovías, dos medios que pueden resultar entre un 20% y 50% más económicos que la tractomula, si es que se desarrolla la locomotora del carbón andino y se planifica la inversión en infraestructura en función de los centros de generación de carga de Colombia. Aún más, también podemos acceder a la cuenca del Pacífico construyendo un paso interoceánico mediante el Ferrocarril Verde entre Puerto Antioquia y Cupica, que pasando por Chigorodó y Vigía del Fuerte se complementa con la hidrovía del Atrato.*



Imagen 51A: Sistema Férreo Nacional existente (rojo) y propuesto (verde), y Ferrocarril Verde entre Urabá y Cupica marchando por la margen del Atrato antioqueño, para conformar un paso interoceánico que a diferencia del Ferrocarril Chino desarticulado de Colombia (rojo), no afectaría el Darién.

Un transporte deficiente

Uno de los principales obstáculos al desarrollo económico de Colombia a lo largo de su historia ha consistido en la dificultad y el alto costo del transporte interno, que a su vez resulta del retraso en materia de infraestructura.

Para apreciar la magnitud del desafío actual, basta decir que en 2014 ocupábamos el puesto 18 entre los países de América Latina y el Caribe, con un índice de desempeño logístico de 2,64, contra un promedio de 2,74 para el conjunto de la región.

Durante los últimos años, sin embargo, se han producido avances de importancia. Además de haber creado la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) en 2011, de haber modernizado el sistema de concesiones en 2012 y de haber expedido las Leyes [1508](#) de 2012 y [1682](#) de 2013, el gobierno nacional ha venido planeando acciones de largo plazo en esta materia. Estas acciones están contempladas en el Plan Maestro de Transporte Intermodal (PMTI) 2015-2035 y en la Estrategia Nacional para el Desarrollo de Infraestructura (2015).

Durante el siglo XX Europa consolidó los trenes de pasajeros gracias a su densidad demográfica y a la relativa cercanía entre sus grandes ciudades. Por su parte, Norteamérica lo había hecho con trenes de carga y no de pasajeros, ya que después de la explosión del automóvil (1930) y del avión (1950) estos medios fueron más aptos para su baja densidad poblacional.

A partir de finales del s. XIX, Colombia logró consolidar una incipiente red de ferrocarriles para el café que pudo competir con las recuas de mulas y bueyes y redujo los tiempos y costos, pero que no pudo competir con las tractomulas.

Mientras en Europa el 8 por ciento de las mercancías se mueven por tren y en Estados Unidos esta proporción llega al 38 por ciento, en Colombia la carga movilizada por este medio alcanza el 26 por ciento de las 300.000 toneladas anuales, sobre todo el carbón del Cerrejón y del Cesar. Además, el transporte que le aporta cerca del 4,2 por ciento al PIB de la nación responde por el 35 por ciento de la demanda de energía.

Cambio de “plan”

El PMTI 2015-2035 da prioridad a proyectos cuyo beneficio depende de oportunidades multisectoriales, estimando la capacidad y volumen de los modos de transporte en función del movimiento de carga. Con este Plan se busca estructurar una red vial primaria que le garantice al sector camionero una infraestructura eficiente, para operar con velocidades entre 60 y 80 kilómetros por hora según se trate de terreno montañoso o llano. El Plan contempla:

1. Inversiones férreas por 9,8 billones de pesos durante las dos décadas, lo cual incluye la adecuación de la trocha pero no la inversión en material rodante;
2. Inversiones portuarias por 1,28 billones que incluyen las obligaciones públicas de dragar canales existentes y garantizar que Cartagena y Buenaventura tengan accesos de 60 pies para recibir los barcos que transitarán por el nuevo Canal de Panamá; y
3. Inversiones por 4,8 billones de pesos en hidrovías.

En el PMTI los proyectos ferroviarios prioritarios para la primera década son:

- 410 kilómetros del tren del Pacífico,
- 257 kilómetros del tren Bogotá-Belencito, y
- 522 kilómetros del tren La Dorada-Chiriguaná (todos estos con una inversión total de 4,10 billones de pesos).

Durante la segunda década seguirá la construcción de:

- Los 420 kilómetros del tren carbonero del Carare (Belencito-Vizcaína), y
- 160 kilómetros en el tren San Juan del Cesar-Puerto Dibulla (Guajira) (dos obras que costarían 6 billones de pesos).

Las nuevas autopistas transformarán la obsoleta red de carreteras diseñada a partir del modelo de sustitución de importaciones y reorientarán la conectividad buscando la integración de regiones y conglomerados urbanos para favorecer la ampliación del mercado interno.



Imagen 51B.. Corredores Logísticos E-W y N- S, para la Región Andina de Colombia. Propuesta de Ferrocarriles e Hidrovías, SMP Manizales - UN de Colombia.

Otras propuestas

Sin embargo, el PMTI no deja de tener problemas a la hora de implementar un sistema intermodal de carga en Colombia. Según la Cámara Colombiana de Infraestructura (CCI), mientras el sistema multimodal en Europa moviliza el 60 por ciento de las mercancías, en Colombia, por la falta de articulación entre los modos fluvial y ferroviario, solo se alcanza el 1,5 por ciento en este tipo de transporte.

A pesar de que las vías 4G podrían traer beneficios al reducir el tiempo de transporte hasta en un 30 por ciento, y aunque el PMTI considera que una reducción del 1 por ciento en el costo de los fletes puede aumentar las exportaciones entre 6 y 8 veces, en Colombia se persiste en el modo carretero para salir al mar y se abandona la interacción del sistema con ferrocarriles e hidrovías.

Al comparar la eficiencia de los sistemas carretero, férreo y fluvial, la hidrovía resulta ser un 40 a 50% más económica y el tren entre 20 y 25% más barato por unidad de carga que el transporte en tractomula. Por esa razón hay que apostarle a la combinación de modos de transporte, y estructurar el sistema sobre la base de redes que generen reducciones de costos a medida que crezca la demanda y se estimulen las economías de escala asociadas con las líneas troncales con sistemas de alimentación.

Además, el PMTI debería rediseñar los corredores logísticos Buenaventura-Puerto Carreño y Buenaventura-Bogotá, integrándolos mediante una línea férrea transversal que parta de Puerto López y llegue a Buenaventura, pasando por el altiplano y La Dorada, para cruzar la cordillera Central con el Ferrocarril Cafetero e integrarse al corredor férreo del río Cauca en el kilómetros 41, vecino de Irra. Ver: Ferrocarril Cafetero, en: <https://youtu.be/26q-zGOY5N4>

Movilizar un contenedor entre el altiplano y Buenaventura cuesta 2.100 dólares, contra los 800 dólares que cuesta sacarlo en Perú a sus puertos. Adicionalmente, en lugar de poner a competir hidroviás, ferrocarriles y carreteras a lo largo del Magdalena, se debería incluir el Corredor Buenaventura-Eje Cafetero-Turbo, extendiendo el corredor férreo del Cauca, para llegar hasta Urabá, donde Antioquia tiene sus grandes megapuertos. Incluso Chigorodó podría tener una extensión para salir en tren a Bahía Solano, cruzando el Atrato por Vigía del Fuerte para configurar entre ambos, tren e hidroavía, un paso interoceánico entre Urabá y Cupica.

Extender así el sistema ferroviario hasta el Caribe y el Pacífico (con un costo igual al sobre costo de Reficar más la mermelada de Odebrecht) permitiría articular el altiplano a los dos mares en Urabá y Buenaventura, al diamante caribe y a las hidroviás del Meta, del Atrato y del Magdalena. A esta última llegarían los contenedores partiendo de puertos ubicados en el norte del Valle y del altiplano, que son los centros de generación de carga en la Región Andina, e incluso los de Medellín y de Bucaramanga.

El potencial de movimiento de carga de la hidroavía entre Barranquilla y Honda, según el [Plan Maestro de Aprovechamiento del Río Magdalena](#) elaborado por Hydrochina (2014), es de 500 millones de toneladas anuales, equivalentes a 150 trenes de 10.000 toneladas por día.

Ajustes necesarios

La importancia de encontrar economías modales que dependen de una estrategia que busca darle carga suficiente al sistema, no solo radica en que se pueden reducir los fletes del transporte, sino también en el aumento de nuestras exportaciones.

Según el Banco Interamericano de Desarrollo, en su estudio [Destrabando las arterias: El impacto de los costos de transporte en el comercio de América Latina y el Caribe](#) (2010), por cada reducción porcentual de los costos las exportaciones podrían crecer porcentualmente varias veces.

Por lo tanto, habrá que desarrollar un sistema de plataformas logísticas apoyada en una red de puertos de contenedores ubicados en zonas generadoras e importadoras de carga, donde se consolide la carga y se empiecen los trámites aduaneros, con el fin de reducir de 15 a 5 días el tiempo que tarda exportar un contenedor en Colombia.

Al abrir la matriz modal de transporte de carga incorporando el transporte ferroviario y fluvial tendrá que considerarse el agotamiento de las reservas de petróleo antes de seis años para darle sentido al dragado del Magdalena. Como estas reservas representan la mayor proporción de su carga habría que trazar una nueva política pública alterna que se apoye en la locomotora del carbón andino.

Este mineral es exportado desde Cundinamarca, Boyacá y Antioquia, donde la producción podría alcanzar los 10 millones de toneladas por año con destino a la Cuenca del Pacífico (con otro tanto sacado de Córdoba) y sería la clave para financiar la infraestructura férrea.

Aunque por el cambio climático se planea reducir para 2050 el 80 por ciento del consumo mundial de carbón, el 50 por ciento del gas natural y el 30 por ciento del petróleo, habrá que consumir las enormes reservas del país en los próximos 40 años. Este es un asunto viable gracias a su excelente calidad, caracterizada por el bajo contenido de azufre y alto poder calorífico.

9.12- ¿QUÉ HACER CON LA VÍA AL LLANO?



Imagen 52A: Panorámica de la vía al Llano. Razón Pública.

El problema de la Vía al Llano es de ingeniería, planeación o geografía. El riesgo y la incertidumbre son inevitables en un proyecto como este. Pero los diseños de ingeniería y la respuesta gubernamental ante el desastre deben estar a la altura del desafío. A pesar de los avances, la comunicación de los llanos con el centro del país sigue estando seriamente limitada.

En 2019, continuará cerrada durante varios meses

La vía que comunica a Villavicencio con Bogotá fue habilitada en septiembre de 2019 durante algunas horas diarias, para vehículos de carga y de pasajeros. Sin embargo, el viernes tuvo que cerrarse debido a nuevos derrumbes.

La carretera hace parte del corredor transversal Puerto Carreño-Buenaventura y ha estado inhabilitada desde el pasado 15 de junio. Según la gobernadora del Meta, Marcela Amaya García, el cierre ya ha producido pérdidas superiores a los dos billones de pesos, y deja graves consecuencias para los llaneros. La ruta fue concesionada a Coviandes y Coviandina para construir una autopista de 85,6 kilómetros en tres tramos. En condiciones normales, la carretera tiene un tráfico promedio de 11 mil vehículos por día y tres peajes: Boquerón, Naranjal y Pipara, que estarán hasta 2054. Debido a la fluctuación impredecible de los factores ambientales y a los desafíos técnicos, no parece haber luz verde para terminar la obra en 2023.

Algo de historia



Imagen 52B: Mapas de la Vía al Llano, en *El Espectador* (Adaptada) y en ANI.

Cuenta la historia que el antiguo camino de herradura que unía a Villavicencio con Bogotá se recorría en dos o tres días debido a las dificultades topográficas y la inestabilidad de las laderas. Luego, el auge económico de Villavicencio y la creciente demanda de bienes agropecuarios en la capital del país llevó a que entre 1924 y 1936 se convirtiera en un camino carretable. Pero en el trópico andino las laderas son frágiles y pueden ser afectadas por cualquier obra de desarrollo longitudinal mal planificada. Además, el modelado, la ocupación conflictiva del territorio en los márgenes de la vía y la deforestación empeoran la situación. Esto fue lo que ocurrió con la antigua carretera.

El cierre ya ha producido pérdidas superiores a los dos billones de pesos.

En 1974, un derrumbe en la vía cobró cientos de vidas y causó pérdidas económicas significativas. El suceso se conoce como la tragedia de Quebrada Blanca y fue lo que desencadenó la construcción del actual túnel de Quebrada Blanca, una rectificación y varias obras complementarias destinadas a reducir el riesgo y el tiempo de viaje. Para lidiar con la demanda de conectividad vial entre Bogotá y los Llanos Orientales, desde 1994 se decidió construir la “nueva vía al Llano”, que se recorrería en 90 minutos a un costo de 79 mil millones de pesos. En 2011, cuando ya el nivel de servicio de la vía se hacía imposible, la Concesionaria Coviandes empezó la construcción de la doble calzada, gracias a una inversión a seis años que superaba los 1,8 billones de pesos.

Según la ANI, luego de las modificaciones, el contrato sumaba 4,8 billones iniciando el 2018. Pero el diseño —que contempla la excavación de 25 túneles y 69 puentes entre otras obras viales como galerías para una operación fluida, la instalación de cientos de miles de metros cuadrados de malla metálica sobre los taludes, túneles falsos y obras adicionales preventivas— tendría un costo final de 8 billones de pesos.

¿Problemas de diseño o naturaleza indócil?

En la construcción de la vía al Llano se han presentado problemas de ingeniería que no tienen justificación. Es el caso de la caída del puente Chirajara en enero 15 del año 2018. Se desplomó uno de los dos pilones terminados pocos meses antes de la inauguración de la obra, dejando un saldo de nueve trabajadores muertos. El incidente mostró la falta de ética traducida en la absoluta

precariedad del diseño que soportaba esta pieza fundamental de un viaducto galardonado con el Premio Nacional de Ingeniería en 2010. Este es el tipo de cosas que no deberían ocurrir.

Pero otra cosa son los riesgos inevitables que impone la naturaleza, que además dependen del tipo de obra y las características del terreno. Mientras en las obras subterráneas la incertidumbre suele ser del 30 por ciento o más, en las estructuras de concreto y similares ésta se reduce al 6 o 4 por ciento.

La nueva vía al Llano parece no tener luz verde hasta 2023.

Por ejemplo, los túneles tienen un alto riesgo porque su estabilidad está asociada, entre otras cosas, con cambios erráticos en las discontinuidades y variaciones litológicas del macizo rocoso. Al contrario, una obra de concreto representa un riesgo mínimo dado que depende de elementos que se conocen y pueden ser controlados, como la cuantía y configuración del acero y resistencia de los agregados o la geometría y comportamiento dinámico de las estructuras. Para entender el riesgo también hay que tener en cuenta el clima. Por supuesto es necesario mejorar los pronósticos que permiten tomar medidas de precaución y así salvar vidas y proteger la economía. Esto va a la par de los sistemas de alerta. Pero aquí es necesario tener en cuenta que la información del clima revela probabilidades y no predicciones, por lo que siempre hay algún grado de incertidumbre. Todos estos son factores que podrían explicar la complejidad del problema de la vía al Llano:

- La incertidumbre consustancial del macizo rocoso relacionada con la geología;
- La ocurrencia de eventos climáticos extremos dados los usos conflictivos del suelo;
- Las decisiones técnicas y sus consecuencias —como el posible impacto del uso de dinamita en la construcción—;
- Y las cuestiones administrativas relacionadas con obras inconclusas.

¿Cómo lidiar con el riesgo?

Para determinar la viabilidad de una obra como la vía al Llano, el diseño ingenieril debe contemplar e intentar calcular el riesgo relacionado con los factores ambientales. Para esto existen fórmulas (ver tabla) que calculan el riesgo de una amenaza —como un evento climático extremo— sobre la estabilidad de una obra teniendo en cuenta su vida útil, que en este caso debería ser de un siglo.

Valores de R	Años	n= Vida útil de una obra						
		10	25	50	100	250	500	1000
$Tr =$ Período de retorno de la amenaza El Riesgo R está dado por: $R = 1 - (1 - 1/Tr)^n$	10	0,65	0,93	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
	25	0,34	0,64	0,87	0,98	1,00	1,00	1,00
	50	0,18	0,40	0,64	0,87	0,99	1,00	1,00
	100	0,10	0,22	0,39	0,63	0,92	0,99	1,00
	250	0,04	0,10	0,18	0,33	0,63	0,87	0,98
	500	0,02	0,05	0,10	0,18	0,39	0,63	0,86
	1000	0,01	0,02	0,05	0,10	0,22	0,39	0,63

Tabla: valores del Riesgo R, en función del período de retorno “Tr” de una amenaza expresado en años (Columna 1), y de la vida útil “n” de una obra (Fila 1). La diagonal en rojo (64 a 63%), destaca los valores utilizados para que las obras sean rentables

Por supuesto, el riesgo depende de la recurrencia de ese tipo de eventos a lo largo de la vida útil de la obra. El problema radica en que, con el calentamiento global, los eventos climáticos extremos se han exacerbado. Esto significa que el periodo de recurrencia o “Tr” de una amenaza puede aumentar, por ejemplo, de 100 a 25 años. Ver: Laderas del trópico andino, en <https://youtu.be/mnzeEIYgQIM>

En la construcción de la vía al Llano se han presentado problemas de ingeniería que no tienen justificación.

Como lo muestra la tabla, esto aumentaría el riesgo “R” de 0,63 a 0,98. Un resultado así significa que hay un riesgo demasiado alto —cercano a la certeza— de que la obra falle frente a la presencia de una amenaza. Cuando eso ocurre la obra deja de ser rentable. Entonces, cuando el cambio climático ha logrado agravar la amenaza, la pregunta es: ¿qué se debe hacer? La respuesta es simple: se deben ajustar los diseños a la par con la amenaza, y con ello el nivel de riesgo se mantiene en niveles aceptables.

Así, a pesar de la incertidumbre relacionada con la geología y el comportamiento “salvaje” del clima, los diseños en escenarios complejos pueden conducir a obras robustas y confiables. Para ello es necesario hacer uso de los factores de seguridad y de la gestión del riesgo. Lo importante es reconocer las limitaciones de la ingeniería al planificar, diseñar y construir grandes proyectos, previniendo pasivos ambientales importantes que se traduzcan en riesgos.

Las medidas necesarias



Imagen 52 C: Las frágiles laderas de la Vía Bogotá-Villavicencio – Fotos W Radio y Coviandes

Con la carretera cerrada o solo parcialmente abierta, la conectividad de esta importante región del país es reducida. Solo hay otros dos caminos que sirven como alternativa para conectar la capital del Meta con Bogotá:

La Transversal del Sisga de 137 Km que, pasando por Guateque (Boyacá) y Aguaclara (Casanare), se recorre en 8 horas; y

El corredor Briceño–Tunja-Sogamoso por Tauramena (Casanare) de 350 Km, que se transita en 11 horas.

Para paliar el impacto, el Gobierno ha debido:

- Garantizar el abastecimiento de combustible en las zonas afectadas;

- Otorgar incentivos de almacenamiento a los productores de arroz;
- Subsidiar el precio para productores de maíz tecnificado;
- Cubrir hasta el 50 por ciento del costo de peajes en vías alternas para vehículos de transporte público y de carga;
- Otorgar excepción al cobro y recaudo de la tasa aeroportuarias;
- Promover el consumo de bienes y servicios turísticos; y
- Declarar la alerta amarilla en la red hospitalaria de Cundinamarca y Meta, entre otras medidas.

A pesar de haberse iniciado hace 24 años, es evidente que las dificultades ingenieriles del proyecto continuarán, y con ellas la difícil situación del Llano. No se trata solo del medio agreste de una cordillera sedimentada de edad reciente y alto nivel de movimiento tectónico. Los usos conflictivos del suelo, las limitaciones institucionales y la falta de experiencia empresarial —dada la complejidad del proyecto— también le pasan factura al país.

Más que de contratación, el problema de la vía al Llano es un problema de falta de experticia.

Sumando a la fatídica historia de esta vía, el problema actual incluye el derrumbe de los kilómetros 58 y 46+200, que ocurrió cuando las obras estaban a punto de concluir, o los desprendimientos en los kilómetros 38 y 64, que taponaron ambos carriles. En un informe técnico realizado por la concesionaria Coviandes se identifican otros 17 lugares críticos de la vía similares a los que han generado cierres continuos. La estabilidad del corredor vial dependerá del plan de acción que se elabore para resolver esas vulnerabilidades. Mientras tanto, por lo menos hasta que la situación se regularice, el Estado deberá ejecutar un plan de ajuste macroeconómico para salvar el difícil trance.

9.13 BOSQUES, FUNDAMENTALES COMO SUMIDEROS DE CARBONO



Los bosques tropicales están emitiendo alrededor de 425 teragramos de carbono anuales. Imagen: Min Ambiente Colombia.

Como consecuencia de la revolución industrial la concentración de CO₂ en la atmósfera ha sufrido un considerable aumento en el siglo XX: Si en su comienzo, era de unas 280 partes por millón de la mezcla de gases del aire (el 0,028%), a principios del siglo XXI llega a las 370 ppmv (el 0,037%). El manejo forestal y de los ecosistemas no puede resolver, por sí solo, el problema del calentamiento global. <https://www.concienciaeco.com>

Los árboles, como todas las plantas, absorben dióxido de carbono, con lo que contribuyen a la lucha contra el cambio climático. En los ambientes tropicales húmedos, donde los árboles crecen más rápido, los bosques pueden almacenar de 10 a 15 toneladas de carbono por hectárea al año, y por lo tanto remover importantes cantidades de CO₂ del aire en un período de tiempo relativamente corto. <http://www.ideam.gov.co>

Como sumideros del CO₂, los bosques a través de la fotosíntesis almacenan en madera y en el ecosistema, una parte del carbono tomado de la atmósfera, y devuelven oxígeno a ella haciendo todo lo contrario de la jungla de concreto. Se estima que un kilómetro cuadrado de bosque genera mil toneladas de oxígeno al año, y que una hectárea arbolada urbana produce al día el oxígeno que consumen seis personas. Además, que cada persona emite dos toneladas de CO₂ al año por alimentarse. U de Sevilla en <http://www.elmundo.es>

Se conoce como sumidero todo sistema o proceso por el que se extrae de la atmósfera un gas o gases, y se almacena. Las formaciones vegetales actúan como sumideros por su función vital principal, la fotosíntesis, que es el proceso por el que los vegetales captan CO₂ de la atmósfera o disuelto en agua, y con la ayuda de la luz solar lo utilizan en la elaboración de moléculas sencillas de azúcares. www.mapama.gob.es

Si el per cápita de la huella de carbono para Colombia es de dos hectáreas, también el secuestro de CO₂ de los bosques es pequeño en comparación con las emisiones del medio urbanizado, máxime cuando cerca de la mitad corresponde al uso de combustibles fósiles, ya que con dichos combustibles la media global de las emisiones de carbono a la atmósfera, alcanza hoy a 1 tonelada por año (tC/año) y por persona, emitida en forma de CO₂. María Abellas en <http://dinamica-de-sistemas.com>

Aproximadamente 86% de los bosques del mundo es de propiedad pública, pero en muchos casos la tenencia de la tierra no está clara o está en conflicto. Casi la tercera parte de la madera tropical comercializada mundialmente proviene de actividades ilegales, que en su mayor parte se han dado en la Amazonía y el Sudeste Asiático. <http://www.cinu.mx>

En los trópicos, el Carbono C que está en sumideros superficiales, varía entre 60 y 230 ton C/ha en bosques primarios, y entre 25 y 190 ton C/ha en bosques secundarios. En bosques tropicales, los sumideros de C en el suelo varían entre 60 y 115 ton C/ha y en los sistemas agroforestales las cuantías, que llegan a valores entre 30 y 50 ton C/ha, son similares a las de los bosques secundarios, mientras que en los sistemas agrícolas o ganaderos, los sumideros de C en el suelo son considerablemente pequeños. www.fao.org/

Como consecuencia de la deforestación y la degradación de los ecosistemas, los bosques tropicales están emitiendo alrededor de 425 teragramos de carbono anuales. Urge emprender acciones para su recuperación, implementando estrategias y acciones de pago de servicios ambientales. Los países en desarrollo pueden capturar Carbono C a bajo costo, mediante

opciones que van desde la agroforestería, plantaciones de rotación larga y corta, hasta regeneración natural, manejo forestal y prácticas silvo-culturales. <http://www.fao.org/>

Algunos bosques en Suramérica, África y Asia, pasaron de retener carbono a emitirlo. Según un estudio publicado recientemente en Science, Científicos de la Universidad de Boston y del Centro de Investigación de Woods Hole, quienes combinaron los datos satelitales de 12 años, han encontrado que mientras Latinoamérica aporta cerca del 60% de las emisiones, en África la cifra es de 24% y en Asia del 16%. Medio Ambiente <https://www.elespectador.com/>

En el primer semestre de 2016, Colombia empezó a negociar bonos de carbono. En dicha estrategia para combatir el cambio climático, al estimar cuánto carbono acumulan los bosques del país, el IDEAM estimó nuestro potencial en el mercado de los bonos de carbono, calculando el potencial de carbono almacenado en la biomasa aérea, así: si en Megagramos de carbono por hectárea, según el instituto tenemos entre 79,1 Mg C/ha y 168,9 Mg C/ha, entonces la reserva de carbono nacional total expresada en Petagramos de carbono, oscila entre 4,7 Pg C y 10,0 Pg C, y representa 17,1 Pg CO₂ equivalentes y 36,6 Pg CO₂ equivalentes que no han sido emitidos a la atmósfera. Para el efecto, 1Mg son 1000 Toneladas y 1 Pg son 1 millón de millones de Toneladas. María Mónica Monsalve S. en: <http://www.elespectador.com>

Recopilación: (Fragmentos tomados de Internet) .

9.14 TRANSICIÓN ENERGÉTICA E HIDRÓGENO DE BAJAS EMISIONES



Imagen 54: Transición energética e hidrógeno verde, en Worldenergytrade.com y Getty Images.

RESUMEN: Tras entrar a la era del hidrógeno como fuente renovable de energía versátil y clave para enfrentar el desafío más importante de nuestro tiempo: la descarbonización progresiva de nuestra economía al 2050, el país por contar con enormes reservas de carbón mineral, podría contemplar la transformación del carbón, en hidrógeno azul, aunque para su obtención se requiere capturar y almacenar carbono, razón por la cual algunos expertos consideran que el hidrógeno “limpio”, además de considerar el hidrógeno verde, también comprende el hidrógeno azul.

Al tiempo que el cambio climático y la crisis energética tras la guerra, obligan a la U.E. a implementar acuerdos y estrategias ineludibles, no sólo para avanzar en eficiencia energética y energías renovables y hacia la descarbonización y políticas de soberanía energética; también para el caso colombiano le exige al país mirar alternativas de medidas regulatorias, para una transición energética con visión prospectiva, tal cual se propone Chile cuyas metas le apuntan a convertirse al 2050 en un referente mundial de hidrógeno verde.

Aunque históricamente, el hidrógeno se ha obtenido usando energía eléctrica o combustibles fósiles para hidrógeno azul, actualmente su producción de hidrógeno verde con energía solar y eólica que es la fórmula más amigable con el medio ambiente, es la apuesta global para

“descarbonizar” un 25% como aporte a la reducción de emisiones para 2050. Por ello además de la descarbonización de la economía, la independencia energética que ahora más que nunca le pasa factura a quienes no la poseen, son dos objetivos estratégicos para el futuro de Europa.

Se estima que para 2050, al tiempo que la tecnología permite una considerable reducción del costo de producción de hidrógeno verde, con los objetivos de neutralidad en carbono rubricados por 185 países, aumentará diez veces la demanda global de este combustible limpio que reemplazará el uso de los combustibles fósiles, que en el caso colombiano deben entrar en transición buscando una solución que permita mitigar el cambio climático de forma efectiva y eficiente sin afectar la inversión para no sacrificar el desarrollo y crecimiento económicos.

Hace un año, durante la Semana Europea del Hidrógeno, además de lanzarse la Alianza internacional con 1.500 miembros de todos los sectores para unir ideas e iniciativas con posibles inversiones, y de anunciarse 600 proyectos que serían operativos en 2025, también la Unión Europea anotó que en una coalición de países, cuyo propósito es consolidar el sector energético del futuro en Europa, se le está apostando a crear 100 valles de hidrógeno verde en todo el mundo, mediante proyectos que reúnen producción, transporte y distribución.

En España, por ejemplo, existen múltiples proyectos de valles de hidrógeno verde en los que participan diversas compañías energéticas como Enagás, cuya pretensión es convertirse en un aliciente para la reindustrialización, con desarrollo sostenible, transición justa y creación de empleo de calidad local. Estos son algunos de los más relevantes: entre ellos, Green Hysland en la isla de Mallorca, el Valle del Hidrógeno de Cataluña con 30 proyectos identificados, y el Corredor Vasco del Hidrógeno con una inversión prevista de 1.300 millones de euros hasta 2026.

La Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia, donde Promigas y Ecopetrol ya hacen apuestas, aunque la producción y adaptación de los sectores económicos para su uso, requerirán grandes inversiones destinadas al desarrollo de tecnología y la creación de infraestructuras, no puede desconocer que el país cuenta con reservas de petróleo, gas natural y carbón, suficientes para acercarse a la autosuficiencia en combustibles. No obstante, estas materias primas podrían utilizarse para la producción de hidrógeno azul a partir del almacenamiento y/o utilización del CO2 generado.

Respecto a nuestro arco energético, si bien las reservas de gas y petróleo no alcanzan para una década, al estar comprometida la seguridad energética, la pregunta debe ser qué hacer con las reservas probadas de carbón duro y de alta calidad que superan 6.648 millones de toneladas: si exportarlas o convertirlas en hidrógeno azul. Esto para complementar el arco energético, aprovechando para el efecto una oferta hídrica equivalente al 5% del patrimonio hídrico mundial, del cual el país obtiene el 70% de la generación eléctrica, aunque con problemas para su distribución y gestión.

Pero si de exportar hidrógeno verde se trata, Colombia con una posición geoestratégica que le permite situarse como nodo de comercio marítimo y exportador, para posicionarse en este mercado sabiendo que cuenta con un tejido empresarial dinámico y emprendedor con amplia experiencia en la industria minera, y de producción, transformación y transporte de petróleo y gas, deberá atraer fondos financieros nacionales e internacionales para aprovechar sus excelentes ventajas culturales y recursos naturales, al competir con otros países en el futuro mercado del hidrógeno de bajas emisiones.

Manizales, October 24, 2022.

Lecturas complementarias

Sistema Bimodal Cafetero: ferrocarril y carretera para integrar la Región Andina.

Perfil de proyecto para un corredor bimodal transversal de unos 150 km, constituido por el Ferrocarril Cafetero entre La Dorada y el Km 41 y la Transversal Cafetera de Caldas, además del nuevo Túnel Cumanday. Documento para el taller de lanzamiento de un Centro de Altos Estudios del Asia – Pacífico en la Universidad Libre de Pereira, del Lunes 28/07/2014. Ver en:

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/54691/sistemaferroviarioparalaregi%c3%b3nandinadecolombia.pdf>

Dinámicas y contra rumbos del desarrollo urbano.

Las ciudades, que surgen cuando la especie humana se ha establecido para facilitar las actividades socioeconómicas propias de una economía compleja, han evolucionado. Con el descubrimiento de América, los desarrollos urbanos de los poblados precolombinos cambiaron por otros que parten del modelo castellano. Pero ya en el siglo XX, al pasar de la arriería a los ferrocarriles cafeteros, y luego al automóvil, la ciudad se deshumaniza al concederle el espacio al transporte motorizado y a la jungla de concreto. Dicho hábitat comporta el reto de enfrentar profundos desafíos, para resolver ese modelo urbano conflictivo, no sustentable.

Ver en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/49615/gonzaloduqueescobar.201442.pdf>

Eje Cafetero: elementos para una visión prospectiva.

Las ciudades, que surgen cuando la especie humana se ha establecido para facilitar las actividades socioeconómicas propias de una economía compleja, han evolucionado. Con el descubrimiento de América, los desarrollos urbanos de los poblados precolombinos cambiaron por otros que parten del modelo castellano. Pero ya en el siglo XX, al pasar de la arriería a los ferrocarriles cafeteros, y luego al automóvil, la ciudad se deshumaniza al concederle el espacio al transporte motorizado y a la jungla de concreto. Hoy, dicho hábitat comporta el reto de tener que enfrentar profundos desafíos, para resolver ese modelo urbano conflictivo, no sustentable.

Ver en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/20374/gonzaloduqueescobar.201336.pdf>

Medio ambiente, mercado y Estado.

Las grandes problemáticas de Colombia, más que responder a componentes técnicos y económicos, se relacionan con aspectos estructurales de naturaleza socioambiental. La fuerza del mercado frente a las falencias del Estado, como factores que explican las barreras para el desarrollo de la vacuna sintética contra la malaria en Colombia y la falta de control a las causas antrópicas del ecocidio de los chigüiros en el desierto de muerte del Casanare.

Ver en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21507/gonzaloduqueescobar.201414.pdf>

Desarrollo energético y clima salvaje

No es viable quemar las actuales reservas de petróleo, gas y carbón sin afectar el clima de la Tierra. Urge descarbonizar la economía para reducir las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, para llevándolas a un nivel que impida las interferencias antrópicas en el clima global, que ponen en riesgo la adaptación natural de los ecosistemas, la seguridad alimentaria y el desarrollo económico sostenible. Colombia, deberá replantear su política minero - energética relacionada con el carbón. Ver en:

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/52222/desarrolloenergeticoyclimasalvaje.pdf>

Manizales: un diálogo con su territorio.

Manizales - Caldas, su historia, la construcción social e histórica de su territorio, los períodos de su desarrollo urbano y económico, el perfil ambiental de la ciudad, la amenaza climática y su adaptación al trópico andino. Esta visión que propone entender el territorio de Manizales, como el resultado de las relaciones dialécticas entre dos sistemas complejos: el social y el natural, examina las problemáticas y potencialidades socioambientales de la ciudad y la región, para emplazar a la sociedad civil a establecer un dialogo con el territorio a través de la cultura. Ponencia UN de Colombia - SMP Manizales, para el Proyecto Concejal N° 20. Auditorio de la SMP de Manizales. Manizales. Ver en:

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21412/gonzaloduqueescobar.201411.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ENLACES GEOAMBIENTALES.

<p><i>Acecha el niño fortalecido por el calentamiento global.</i></p> <p><i>Acuerdo climático: avance necesario pero insuficiente.</i></p> <p><i>Agua y clima en el desafío ambiental.</i></p> <p><i>Aprendizajes en procesos participativos de reconversión productiva</i></p> <p><i>Cambio climático y pasivos ambientales del modelo urbano.</i></p> <p><i>Caso río blanco en ii encuentro de paisajes latinoamericanos.</i></p> <p><i>Clima andino y problemática ambiental.</i></p> <p><i>Clima, deforestación y corrupción.</i></p> <p><i>Clima extremo, desastres y refugiados.</i></p> <p><i>Construyendo el territorio Umbra.</i></p> <p><i>Curso de capacitación UN-SMP para el CIDEAMA.</i></p> <p><i>Desarrollo urbano y huella ecológica.</i></p> <p><i>Eje cafetero: cambio climático y vulnerabilidad territorial.</i></p> <p><i>El inestable clima y la crisis del agua.</i></p> <p><i>El camino por el Río Grande de La Magdalena.</i></p> <p><i>En Colombia también los desastres acechan.</i></p> <p><i>El Paisaje Cultural Cafetero de Colombia PCCC: una visión prospectiva.</i></p> <p><i>El río Cauca y el desarrollo de la región.</i></p> <p><i>El río grande, su ecosistema y la hidrovía.</i></p> <p><i>El territorio caldense: ¿un constructo cultural?</i></p> <p><i>El territorio de los Ansermas de la cultura Umbra.</i></p> <p><i>El territorio del Río Grande De La Magdalena.</i></p> <p><i>El tortuoso camino de los acuerdos climáticos.</i></p> <p><i>El transporte en Colombia.</i></p> <p><i>“Escombros a la espera” en zonas sísmicas densamente pobladas.</i></p> <p><i>Fisiografía y geodinámica de los andes de Colombia.</i></p> <p><i>Fragmentación urbana y clima en Colombia.</i></p> <p><i>Girasoles emblemáticos para la problemática ambiental de caldas.</i></p> <p><i>Geotecnia para el trópico andino.</i></p> <p><i>Gestión del patrimonio natural en Colombia.</i></p> <p><i>Geomecánica de las laderas de Manizales.</i></p> <p><i>Gestión del riesgo natural y el caso de Colombia.</i></p> <p><i>Guerra o Paz, y disfunciones socio-ambientales.</i></p>	<p><i>Huella hídrica en Colombia.</i></p> <p><i>Huracanes y terremotos acechan.</i></p> <p><i>Ingeniería, incertidumbre y ética.</i></p> <p><i>Manizales: el futuro de la ciudad.</i></p> <p><i>Manizales: foro del agua 2019.</i></p> <p><i>Minería metálica sí, pero sustentable.</i></p> <p><i>La adaptación de la ciudad al trópico andino.</i></p> <p><i>La amenaza climática en la Ecorregión Cafetera.</i></p> <p><i>La apicultura, sector estratégico.</i></p> <p><i>La catástrofe del eje cafetero en un país sin memoria.</i></p> <p><i>La encrucijada ambiental de Manizales.</i></p> <p><i>La gestión ambiental del hábitat.</i></p> <p><i>La Ingeniería en La identidad del territorio caldense. la transformación del territorio.</i></p> <p><i>La gestión del riesgo.</i></p> <p><i>La pandemia del hambre y la pobreza en Colombia.</i></p> <p><i>La sed de los cafetos.</i></p> <p><i>Laderas del Trópico Andino: caso Manizales.</i></p> <p><i>Los guetos urbanos o la ciudad amable.</i></p> <p><i>Paisaje y región en la tierra del café.</i></p> <p><i>Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Campoalegre: fase prospectiva</i></p> <p><i>Plan de ordenación y manejo ambiental cuenca del río Guarinó: fase prospectiva</i></p> <p><i>Plan de acción centenario SMP Manizales: un diálogo con el territorio.</i></p> <p><i>Planeación preventiva y cultura de adaptación ambiental.</i></p> <p><i>Preservación ambiental e hídrica en e PCC.</i></p> <p><i>Riesgo en zonas de montaña por laderas inestables y amenaza volcánica.</i></p> <p><i>Samoga: lugar de asombro.</i></p> <p><i>Sismos y volcanes en el eje cafetero.</i></p> <p><i>Sobre la fragilidad del hábitat humano.</i></p> <p><i>Sobre la naturaleza antrópica del desastre.</i></p> <p><i>Territorio, descentralización y autonomía regional.</i></p> <p><i>Territorio y región: caldas en la ecorregión cafetera.</i></p> <p><i>Vulnerabilidad de las laderas de Manizales.</i></p> <p><i>Vulnerabilidad de río blanco frente a la expansión urbana.</i></p>
---	---

.....

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
(1867-2017)



MANUAL DE GEOLOGIA PARA INGENIEROS

Gonzalo Duque-Escobar

MANIZALES, 2020

ANEXOS

Anexo 1: [Fisiografía y Geodinámica de los Andes de Colombia.](#)

Anexo 2: [Cambio Climático en Colombia: La Amenaza.](#)

Anexo 3: [Riesgo sísmico: los terremotos.](#)

Anexo 4: [Desafíos del Complejo Volcánico Ruiz – Tolima.](#)

Anexo 5: [El desastre de Armero por la erupción del Ruiz.](#)

Anexo 6: [Gestión del riesgo natural y el caso de Colombia.](#)

Anexo 7: [Preservación Ambiental e Hídrica del PCC.](#)

Anexo 8: [Túnel Manizales](#)

Anexo 9: [Geomecánica.](#)

Anexo 10: [Guía astronómica.](#)

Anexo 11: [Astrofísica y Estrellas.](#)

Anexo 12: [La Luna .](#)

Anexo 13: [Colombia tropical, ¿y el agua qué?](#)

Anexo 14: [Pacífico biogeográfico y geoestratégico.](#)

Anexo 15: [El camino por el Río Grande de La Magdalena.](#)

Anexo 16: [El Río Cauca en el desarrollo de la región.](#)

Anexo 17: [El desarrollo urbano y económico de Manizales.](#)

Anexo 18: [Plusvalía urbana para viabilizar el POT](#)

Anexo 19: [El futuro de la ciudad.](#)

Anexo 20: [Introducción a la economía del transporte.](#)

Anexo 21: [Introducción a la teoría económica.](#)

Anexo 22: [El territorio caldense: ¿un constructo cultural?](#)

Anexo 23: [Eje Cafetero: construcción social e histórica del territorio.](#)

Anexo 24: [Colombia intermodal: hidrovías y trenes.](#)

Anexo 25: [Sustentabilidad y decrecimiento económico.](#)

Anexo 26: [UMBRA: La Ecorregión Cafetera en los mundos de Samoga.](#)

Anexo 27: [Textos “verdes”](#)

Anexo 28: [Videoteca del Museo Interactivo Samoga.](#)

HOME:

[Manual de geología para ingenieros.](#)

CONTENIDO: Cap01 [Ciclo geológico](#), Cap02 [Materia y Energía](#), Cap03 [El sistema Solar](#), Cap04 [La Tierra sólida y fluida](#), Cap05 [Los minerales](#), Cap06 [Vulcanismo](#), Cap07 [Rocas ígneas](#), Cap08 [Intemperismo ó meteorización](#), Cap09 [Rocas sedimentarias](#), Cap10 [Tiempo geológico](#), Cap11 [Geología estructural](#), Cap12 [Macizo rocoso](#), Cap13 [Rocas Metamórficas](#), Cap14 [Montañas y teorías orogénicas](#), Cap15 [Sismos](#), Cap16 [Movimientos masales](#), Cap17 [Aguas superficiales](#), Cap18 [Aguas subterráneas](#), Cap19 [Glaciares y desiertos](#), Cap20 [Geomorfología](#); [Lecturas complementarias](#); [Bibliografía](#).

A la Universidad Nacional de Colombia en sus 150 años.

