

MODELACIÓN DE BALANCES HÍDRICOS DE CIÉNAGAS FLUVIALES Y COSTERAS COLOMBIANAS

Mario Díaz-Granados O¹.

Luis Alejandro Camacho²

Alexander Maestre³

Resumen

Se presentan varias aproximaciones de modelación del balance hídrico de sistemas cenagosos fluviales y costeros compuestos por uno o más cuerpos de agua interconectados entre sí, e interactuando con ríos y/o el mar. La modelación está basada en la ecuación de continuidad y en el comportamiento hidráulico de las conexiones. Se muestran las aproximaciones utilizadas para la ciénaga Grande de Santa Marta y el complejo lagunar de Pajalar, las ciénagas de Zapatosa y La Rinconada - Tesca, y la región de La Mojana. Se ilustran los diferentes tipos de resultados que estos modelos pueden suministrar, importantes para el conocimiento de estos ecosistemas frágiles por naturaleza, para su recuperación, preservación, uso y manejo adecuado.

Abstract

This paper describes some approaches for the water balance modeling of fluvial and coastal wetland systems, where one or more water bodies are interconnected, interacting with a river and/or the sea. The modeling methodology is based on the continuity equation and the hydraulic behavior of the connection channels. In this paper, the models for four wetland systems located in the Lower Magdalena River floodplain are presented. Typical results are included to illustrate the type of information these models can give to contribute to the knowledge of the dynamics of these fragile ecosystems, their recuperation, preservation, exploitation and sustainable management.

INTRODUCCIÓN

En Noviembre de 2000, la UNESCO declaró a la Ciénaga Grande de Santa Marta una reserva mundial de la Biosfera, como reconocimiento a un ecosistema único y representativo de la región, con paisajes hermosos y considerable riqueza de especies de fauna (El Tiempo). De igual manera, este ecosistema junto con la laguna de La Cocha, ha sido declarado como un humedal de importancia internacional por la Convención Ramsar. Colombia es un país que se caracteriza por su riqueza hídrica,

en particular por la gran cantidad de humedales como ciénagas fluviales y costeras, pantanos y lagunas, que desafortunadamente en un porcentaje importante han sufrido deterioro ambiental por acción antrópica. Es conocida ampliamente la destrucción de mangle de la ciénaga Grande, la contaminación de las ciénagas del Bajo Cauca, la contaminación y sedimentación de la laguna de Fúquene, entre muchas otras. Típicamente, experimentan diferentes tipos de acciones sobre su estado natural, consistentes principalmente en el cierre y taponamiento de caños de conexión, construcción de

¹. Profesor asociado, Departamento de Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.

². Profesor asistente, Departamento de Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.

³. Profesora de cátedra, Departamento de Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.

diques y terraplenes, incremento en los aportes de sedimentos de sus cuencas tributarias debido a cambios en el uso de la tierra, deforestación y deterioro en la calidad de sus aguas. Paralelamente al interés internacional, el país ha tomado conciencia de la importancia socioeconómica y ecológica de estos sistemas hídricos que deben recuperarse o preservarse, y manejarse sustentablemente. Para manejar un humedal, es necesario conocer como se comporta antes de acometer actividades de intervención. En este trabajo se pretende mostrar la importancia de la cuantificación del comportamiento hídrico de estos sistemas como un insumo primario para la definición de planes de manejo que propendan por un uso adecuado. Para esto, se presenta la modelación del balance hídrico del complejo lagunar de Santa Marta, de algunas ciénagas del Bajo Magdalena y de la región de La Mojana en la depresión momposina.

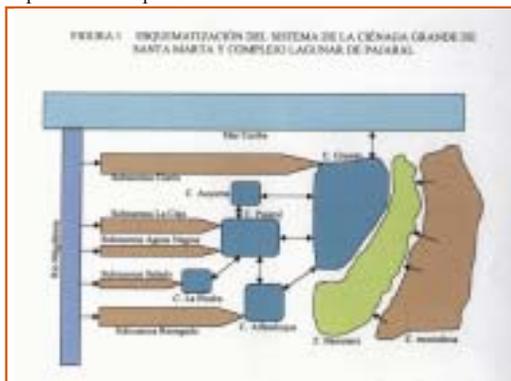


Figura 1

DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS CENAGOSOS Y SUS CUENCAS TRIBUTARIAS

Ciénaga Grande de Santa Marta

La ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) es la laguna costera más grande de Colombia, con una extensión aproximada de 430 km² y una profundidad entre 1 y 2 m. A pesar de sus condiciones biológico ambientales, constituye un ecosistema natural de mucha riqueza e importancia económica, social y paisajística que es necesario rescatar y preservar. La ciénaga está conectada con el mar a través de la boca de Puente La Barra y al complejo lagunar de Pajalar mediante caños, existiendo permanente intercambios de agua entre estos cuerpos como consecuencia de la oscilación periódica del nivel del mar, causada por las mareas y por los excesos o déficits de agua en las ciénagas del complejo. Por otra

parte, recibe aportes netos de agua provenientes de los ríos de la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, de la precipitación directa sobre la ciénaga y esporádicamente del río Magdalena a través del caño Clarín, su única comunicación directa (en la actualidad este caño ha sido rehabilitado y mediante estructuras controladas se deriva un caudal medio de alrededor de 15 m³/s que refresca el sistema cenagoso). Adicionalmente, la evapotranspiración desde la superficie de agua constituye la pérdida de agua más importante. La cuenca tributaria a la CGSM tiene un área aproximada de 7,730 km². Por el oriente, está constituida por la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, cuyos ríos aportan agua a la ciénaga luego de atravesar la Zona Bananera donde es notorio el uso consumptivo de agua por las actividades agrícolas. Por el norte, el límite de la cuenca es la Troncal del Caribe que separa al parque de Salamanca de la CGSM. El límite sur está definido por la divisoria natural de aguas entre las vertientes de la ciénaga de Sapayán y el complejo lagunar de la ciénaga Grande. El río Magdalena es el límite occidental de la cuenca. Entre el río y la CGSM se encuentra el complejo de ciénagas de Pajalar, integrado por numerosos cuerpos de agua entre los cuales se pueden mencionar las ciénagas de La Piedra, Alfandoque, Pajalar, Auyama y Conchal, conectadas mediante sendos caños. Entre este conjunto de ciénagas y el río Magdalena se encuentra una planicie de inundación, construida por el mismo río al desplazarse de oriente a occidente. En esta zona se ubican varias poblaciones y en los últimos años ha experimentado un rápido proceso de incorporación a la producción agropecuaria, mediante la construcción de diques de protección contra inundaciones. Estos diques actualmente representan una barrera casi continua de más de 50 km que impide los desbordamientos naturales del río Magdalena, dejando sólo pasar volúmenes reducidos a través de algunas bocas controladas con compuertas. En la Figura 1 se muestra la esquematización de este sistema hidrológico. Los desbordamientos naturales aportaban grandes volúmenes de agua fresca al complejo de Pajalar que regulaban el balance salino del sistema lagunar. La distribución espacial de la precipitación anual muestra que alrededor de la Isla de Salamanca se localiza la menor precipitación con 400 mm/año. Ésta se incrementa radialmente sobre la CGSM y parte de la zona norte de la Zona Bananera. En la parte central y sur de la Zona, la precipitación varía entre 1,000 y 1,200 mm/año. En la región occidental caen entre 500 y 1,000 mm/año, mientras que en las estribaciones de la Sierra se presentan los mayores valores (2,700 mm/año). La evaporación potencial oscila entre 1,500 y 2,200 mm/año.

Ciénaga de Zapatosa

El conjunto cenagoso de Zapatosa es el de mayor extensión en el Plano Inundable del Bajo Magdalena y contiene el cuerpo de agua dulce más grande del país. Tiene un área superficial del orden de 300 km² y constituye un elemento de paso y amortiguación del río Cesar, al igual que de amortiguación del río Magdalena en ciertas épocas del año, siendo un punto de convergencia de dos vertientes con características diferentes en términos de regímenes hidrológico, sedimentológico y de calidad físico - química del agua. Actualmente su única comunicación con el río Magdalena es a través del río Cesar, aunque anteriormente existieron dos interconexiones importantes adicionales por los caños Patón y Tamalacué, las cuales están interrumpidas por varios diques y terraplenes. La cuenca tributaria del río Cesar es de aproximadamente 21,750 km², la cual ha sufrido procesos progresivos de deforestación y cambios en el uso de la tierra.

Ciénagas de Rinconada y Tesca

La ciénaga de La Rinconada se encuentra comunicada con el brazo de Mompós del río Magdalena a través del caño Menchiquejo, el cual tiene una longitud aproximada de 15 km y muestra flujo bidireccional según la época del año. En su trayectoria atraviesa las pequeñas ciénagas de Sabato, Gaita y Mangle para terminar en la ciénaga de La Rinconada. Anteriormente existió otro caño denominado Lobato, que comunicaba el río Magdalena con la ciénaga de La Rinconada a través de la ciénaga Mangle. Este caño se encuentra actualmente completamente obstruido. La ciénaga de Tesca está comunicada con la ciénaga de La Rinconada mediante dos caños denominados Arenal y Tesca, cuyo flujo bidireccional de interconexión actualmente está limitado por la presencia de taruya (buchón de agua) en la totalidad de sus trayectorias. Las cuencas tributarias a estas ciénagas corresponden a las de caños como Surrabá y Nápoles y el arroyo Dividinal. El área tributaria a la ciénaga de La Rinconada es de 163.6 km² y el de la ciénaga de Tesca es de 27.4 km². Actualmente las ciénagas de este conjunto se encuentran con áreas sedimentadas, aparentemente como consecuencia de la obstrucción del caño Lobato. En la Figura 2 se muestra una esquematización similar a la de este sistema cenagoso.

Región de La Mojana

La región de La Mojana es un área que fisiográficamente pertenece a la denominada depresión Momposina, y abarca una extensión de aproximadamente 4,760 km². La

región limita por el oriente con el río Cauca que drena las cordilleras occidental y central, por el occidente con el río San Jorge que nace en la serranía de Ayapel, por el norte con el brazo de Loba del río Magdalena, y por el sur con las tierras altas de Caucasia y Ayapel. El área de La Mojana es una zona plana baja, donde se ubica el cono deltáico del río Cauca, cuyas características geomorfológicas han generado gran cantidad de ciénagas y pantanos sujetos continuamente a inundaciones generadas por los altos niveles del río Cauca durante los períodos invernales. Estas zonas de inundación son elementos de amortiguación temporal de las crecientes de los ríos Cauca, San Jorge y brazo de Loba, y de acumulación y depositación de sedimentos transportados por éstos. La región de La Mojana constituye un importante sistema regulador de las corrientes fluviales aguas abajo de la depresión Momposina, a la vez que un sistema fuertemente deteriorado por la intensa acumulación de sedimentos y contaminantes provenientes de sus cuencas tributarias. Las actividades antrópicas en la región influyen en, y a la vez son influidas por la dinámica del sistema de La Mojana. Las influencias negativas han implicado el deterioro progresivo del sistema. Estudios existentes demuestran que la región de La Mojana ha tenido cambios morfológicos importantes, debidos en parte por acción antrópica.

ESQUEMATIZACIÓN DE BALANCES HÍDRICOS DE CIÉNAGAS

Los balances hídricos de las ciénagas permiten identificar las direcciones principales de comunicación entre los distintos cuerpos de agua y la magnitud de los volúmenes de intercambio resultantes.

Cada ciénaga o conjunto de ciénagas interconectadas se considera compuesta por un conjunto de elementos que interactúan entre sí: la subcuenca de drenaje directo a través de ríos y caños que llegan a la ciénaga; el conjunto de cuerpos lagunares interconectados; los canales de conexión entre éstos, y los canales de interconexión con el río. En el caso de una ciénaga costera, un elemento adicional está constituido por el mar. Esto puede ser esquematizado como se muestra en las Figuras 1, 2 y 3, cuyas representaciones son la base para la modelación de los sistemas considerados en este trabajo. Los elementos identificados son:

- A. CUENCAS TRIBUTARIAS: Corresponden a las áreas que aportan escorrentía directa a la ciénaga. Estas pueden representarse mediante dos subelementos: uno que representa la escorrentía medida en una esta-

ción hidrométrica y otro que representa la escorrentía producida en el área tributaria entre la estación hidrométrica y la ciénaga.

- B. **CIÉNAGAS:** Cada cuerpo de agua representa un elemento de almacenamiento que interactúa a través de canales con otras ciénagas y eventualmente con el río, recibe aportes netos de otros elementos y está sujeto a evaporación y transpiración desde su superficie de agua. Además, recibe precipitación sobre el espejo de agua.
- C. **CONEXIONES:** Las ciénagas se comunican por medio de canales que normalmente transportan agua en los dos sentidos, dependiendo de los niveles relativos de la superficie de agua en los dos cuerpos. Los volúmenes de agua de intercambio son función de las diferencias de nivel entre los cuerpos de agua y su variación, además de las características hidráulicas de los canales.
- D. **SUBCUENCAS DE CAÑOS:** Los caños pueden recibir escorrentía directa de áreas que tributan directamente a ellos. En estas áreas se presentan los procesos de precipitación, evapotranspiración y transporte de agua hacia las ciénagas.
- E. **RÍO:** Condición de frontera que se caracteriza por medio del nivel en la boca del caño de conexión con la ciénaga.
- F. **MAR:** Condición de frontera que define las fluctuaciones periódicas del nivel del mar debido a las mareas, cuyo efecto en la ciénaga se transmite a través de la correspondiente boca de conexión.

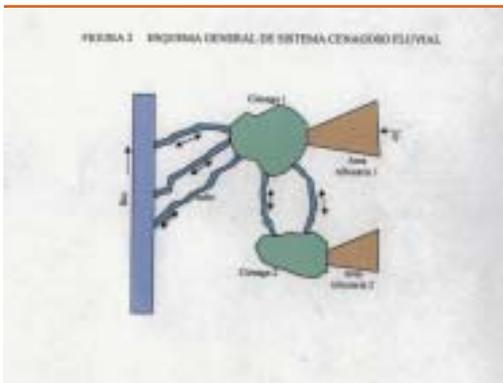


Figura 2

BALANCE HÍDRICO DE SISTEMAS DE CIÉNAGAS

Con base en lo anterior, se puede aplicar la ecuación de balance hídrico:

$$dS / dt = I - O \quad (1)$$

a la ciénaga, donde S es el almacenamiento en el cuerpo de agua (volumen de control), dS es el cambio de almacenamiento durante un tiempo dt , I representa las entradas al volumen de control durante dt y O las salidas de éste. Esta ecuación se puede aproximar para intervalos de tiempo finitos $\Delta\tau$ como $\Delta S / \Delta\tau = I - O$ la cual, aplicada a una de las ciénagas, resulta en:

$$\begin{aligned} \Sigma 2 = \Sigma 1 + K1E\sigma A\tau + K2\theta\tau\Delta\tau + 0.5K3(A\chi 2 + A\chi 1)(\Pi\chi - E\pi\chi) \\ \pm 0.5K2(\theta\chi\chi 2 + \theta\chi\chi 1)\Delta\tau \pm 0.5K2(\theta\rho\chi 2 + \theta\rho\chi 1)\Delta\tau \end{aligned} \quad (2)$$

donde S_1 es el almacenamiento en la ciénaga al comienzo del período, S_2 es el almacenamiento al final, E es la escorrentía directa a la ciénaga (subelemento 2 del elemento 1) en mm/período, A_i es el área tributaria del subelemento 2, Q_t es el caudal medio durante Δt de escorrentía directa aportada por el subelemento 1 del elemento 1, A_{c_1} y A_{c_2} son el área superficial de la ciénaga al comienzo y al final del período Δt , P es la precipitación directa sobre el espejo de agua durante Δt en mm/período, E_{vc} es la evapotranspiración desde el espejo de agua durante Δt en mm/período, Q_{cc_1} y Q_{cc_2} son el caudal de interconexión entre esta ciénaga y las otras conectadas a ésta, al comienzo y al final del intervalo Δt , Q_{rc_1} y Q_{rc_2} son el caudal de interconexión entre la ciénaga y el río, mar u otra ciénaga, al comienzo y al final del intervalo Δt , y K_1 , K_2 y K_3 son constantes para expresar el balance en metros cúbicos (m^3). Un algoritmo de solución del balance hídrico (Díaz-Granados, 1997) para un par de ciénagas interconectadas entre sí (como el la Figura 2), y conectadas a un río se muestra a continuación, donde se observa el proceso iterativo de convergencia requerido:

1. Suponer un nivel en la ciénaga 1 al final de Δt
2. Determinar A_{c_2} para la ciénaga 1 con el nivel supuesto en (1)
3. Suponer un nivel en la ciénaga 2 al final de Δt
4. Determinar A_{c_1} para la ciénaga 2 con el nivel supuesto en (3)
5. Con los niveles de las ciénagas 1 y 2 de (1) y (3) establecer el caudal de interconexión por los caños entre las ciénagas 1 y 2 al final del período Δt , Q_{cc_2}

6. Calcular S_2 para la ciénaga 2 con la ecuación de balance entre las ciénagas 1 y 2
7. Comprobar convergencia entre S_2 calculado en (6) y el S_2 supuesto en (3)
8. Si no hay convergencia, modificar el nivel supuesto en (3) y repetir el proceso. Si hay convergencia ir a (9)
9. Con el nivel del río al final de $\Delta\tau$ y el nivel supuesto en (1), establecer Qrc_2
10. Calcular S_2 para la ciénaga 1 con la ecuación de balance entre la ciénaga 1 y el río
11. Comprobar convergencia entre S_2 calculado en (10) y el S_2 supuesto en (1)
- 12 Si no hay convergencia, modificar el nivel supuesto en (1) y repetir el proceso. Si hay convergencia ir a (13)
- 13 Avanzar Δt en el tiempo y volver a (1)

Cuando algoritmos como el anterior se aplican a casos como el de la CGSM (Figura 1) o la región de La Mojana (Figura 3), resulta un procesamiento iterativo que crece notoriamente con el número de ciénagas interconectadas (Estudios y Asesorías, 1989). Debido a esto, un algoritmo alternativo resuelve el balance simultáneamente para todas las ciénagas, utilizando una representación simplificada de la hidráulica de los caños de conexión y de las curvas cota-área-volumen de las ciénagas (Uniandes, 1978). Para esto, se parte de la Ecuación 1 para cada ciénaga, y de la siguiente ecuación de energía para la velocidad de flujo en cada interconexión:

$$v = K(DH)0.5 \quad (3)$$

donde v es la velocidad del agua en el canal de conexión y ΔH es la diferencia de nivel de agua entre las dos ciénagas. Suponiendo que el área superficial de cada ciénaga (Ac) permanece constante con una variación de la profundidad, dS/dt puede expresarse como $Ac dh/dt$. En consecuencia, la ecuación de continuidad para la ciénaga i puede escribirse como (Uniandes, 1991; Díaz-Granados et al., 1992):

$$\frac{h_{fi} - h_{oi}}{\Delta t} Ac_i = \sum_{j=1}^{Nci} A_{ij} v_{ij} + Q_w \quad (4)$$

donde Nci es el número de ciénagas interconectadas con la ciénaga i , A_{ij} es el área mojada del canal de conexión entre las ciénagas i y j , v_{ij} es la velocidad del flujo en éste, h_{oi} y h_{fi} son los niveles al comienzo y al final de

Δt en la ciénaga i , y Q_w es el aporte neto de lluvia más escorrentía menos evapotranspiración de la cuenca tributaria a la ciénaga i . Reemplazando la Ecuación 3 en la 4, se obtiene:

$$h_{fi} - \sum_{j=1}^{Nci} z_{ij} \left[\frac{h_{fj} + h_{oj}}{2} - \frac{h_{fi} + h_{oi}}{2} \right]^{0.5} = h_{oi} + \frac{Q_w \Delta t}{Ac_i} \quad (5)$$

donde $z_{ij} = (A_{ij} K_{ij} \Delta t) / Ac_i$. La Ecuación 5 es no lineal, pero ésta se puede linealizar así:

$$h_{fi} - \sum_{j=1}^{Nci} z_{ij} \left[\frac{h_{fj} + h_{oj}}{2} - \frac{h_{fi} + h_{oi}}{2} \right] w_{ij}^{-0.5} = h_{oi} + \frac{Q_w \Delta t}{Ac_i} \quad (6)$$

con

$$w_{ij} = \left[\frac{h_{fjo} + h_{oj}}{2} - \frac{h_{fio} + h_{oi}}{2} \right]$$

donde h_{fjo} es un estimativo inicial del nivel final en la ciénaga k .

Al plantear la Ecuación 6 para todo el sistema de ciénagas interconectadas se obtiene un sistema de ecuaciones lineales simultáneas, que escritas en forma matricial tiene la forma $\mathbf{A}\mathbf{h}_f = \mathbf{b}$, el cual puede resolverse para el nivel final del intervalo simultáneamente en todas las ciénagas, calculando \mathbf{h}_f iterativamente, mediante el método de Cholesky (Uribe, 1991).

MODELACIÓN DE BALANCES HÍDRICOS

Ciénaga Grande de Santa Marta y complejo de Pajara

La modelación y estimación de los procesos hidrológicos involucrados en los balances hídricos de sistemas de ciénagas debe ser consecuente con la información hidroclimatológica disponible. En la cuenca tributaria de la CGSM y zonas aledañas existen 18 estaciones pluviométricas y 12 climatológicas, además de información hidrométrica en el río Magdalena en la estación Calamar y en los ríos de la Sierra en el piedemonte, a lo largo de la vía Ciénaga-Fundación. Los balances hídricos se realizaron (Uniandes, 1991; Díaz-Granados et al, 1992) para un nivel de agregación temporal decadal (10 días) a lo largo del período 1967 - 1984. La Figura 1 muestra la esquematización adoptada del sistema. Los aportes hídricos de la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta se estimaron como los excesos de los caudales de los ríos más la precipitación sobre la Zona Ba-

nanera después de descontar la evapotranspiración potencial. Esta última se estimó afectando la evaporación potencial por coeficientes de cultivo (1.042) y de Doorembos y Pruitt (0.75 a 0.85); de manera similar se estimó la evapotranspiración en cada una de las ciénagas. Los aportes de las cuencas tributarias de los caños se calcularon de igual forma que los de la Sierra. Los caudales derivados desde el río Magdalena hacia los caños se modelaron a partir de los niveles en el río y una representación de vertedero de cresta ancha en la derivación. Las series de tiempo de marea en la boca de Puente La Barra se calcularon usando los registros mareográficos de la estación Colón (Panamá) con correcciones por distancia y tiempo. Las características hidráulicas de los caños se determinaron de actividades de campo (aforos y batimetrías). Los balances se calcularon con la Ecuación 6, suponiendo áreas superficiales constantes en todas las ciénagas, y se realizaron adicionalmente balances de salinidad. Los resultados indican que el ciclo de llenado y vaciado de la CGSM es prácticamente anual, con un pequeño remanente positivo al final del año, presentando una descarga neta al mar (igual a la contribución neta de los ríos de la Sierra). Se modelaron tres escenarios relacionados con los aportes de agua del río Magdalena: condición reciente (1984), condición seca en la que estos aportes se reducen notoriamente, y condición húmeda en la cual se rehabilitan los caños que derivan agua hacia el complejo de Pajara. Para esta última condición, los volúmenes netos de salida hacia el mar se incrementan de 3,550 a 5,990 Mm³, disminuyendo favorablemente la salinidad en la CGSM debido al efecto del mayor volumen de agua fresca recibido. Para la condición seca se evidencia el deterioro de algunas ciénagas, incluyendo la CGSM y la ciénaga de Pajara (incremento de 8.3 ppm de salinidad actual a 11.7). La ciénaga de La Auyama es la que peores condiciones de salinidad presenta, estimándose hipersalinidad de 5 veces la salinidad marina para la condición seca, cuyas causas están asociadas con la desconexión de esta ciénaga con el río y con sus reducidos intercambios de agua con las ciénagas Grande y Pajara.

Ciénagas de Zapatosa y Rinconada-Tesca

Para realizar los balances hídricos de estas ciénagas se utilizó la Ecuación 2 y el algoritmo de solución correspondiente (Deeb Asociados, 1996; Díaz-Granados y Maestre, 2000). Se adoptó un período Δt decadal (10 días) y períodos de simulación de 1977 a 1994 para la ciénaga de Zapatosa, y de 1986 a 1994 para las ciénagas de La Rinconada - Tesca. A partir de la información

hidrometeorológica histórica existente se generaron series de entradas y salidas de cada subsistema como precipitación, evaporación, evapotranspiración y escorrentía, y se estimaron las cotas medias decadales en el río Magdalena en cada una de las bocas de los caños que conectan con las ciénagas utilizando la información histórica de lecturas de mira de estaciones hidrométricas ubicadas aguas arriba y aguas debajo de cada boca (Peñoncito y El Banco para Zapatosa, y San Roque y Santa Ana para La Rinconada - Tesca) y la historia del cero de mira correspondiente. Dentro de las actividades de campo se realizaron batimetrías de las ciénagas y de los caños de conexión (cada 100 metros) amarradas altimétricamente con poligonales a placas del IGAC, a partir de las cuales se elaboraron las respectivas curvas de cota-área-volumen y se modeló el comportamiento hidráulico de los caños para establecer los caudales y volúmenes de intercambio y simular diferentes escenarios de manejo y rehabilitación de caños. Usando el programa HEC-2 intensivamente se generaron curvas de entrega para cada uno de los caños que establecen el caudal de flujo en éstos para muchas combinaciones bidireccionales de cotas de agua en el río y en la ciénaga. Estas curvas son función del coeficiente de rugosidad, y por lo tanto se tomaron valores adecuados de éste como resultado de las apreciaciones del flujo en el terreno y de corridas de calibración y de sensibilidad. Se usaron valores del coeficiente de Manning de 0.025 para los canales con buenas condiciones de flujo y de 0.0375 y 0.05 para representar la fricción en los caños Arenal y Tesca donde hay presencia masiva de taruya. El caño Patón en la ciénaga de Zapatosa está actualmente obstruido por varios diques y terraplenes y no presenta flujo de agua; sin embargo, para establecer su comportamiento natural anterior, se desarrollaron curvas de entrega modificando las secciones transversales obstruidas.

Para la ciénaga de Zapatosa se elaboraron balances que representan la situación actual, en la cual el río Cesar constituye la única interconexión con el río Magdalena. A pesar de que el flujo por el río Cesar es bidireccional, claramente prevalece el flujo en la dirección ciénaga - río, indicando que la mayor parte del tiempo se están desalojando excesos de escorrentía de la cuenca del río Cesar, regulados por la ciénaga. El caudal neto medio anual de salida está entre 125 y 185 m³/s, con volúmenes de salida medios anuales entre 4,600 y 6,520 Mm³ y volúmenes de entrada medios anuales entre 1,435 y 2,300. Los meses en los cuales se presenta normalmente flujo río-ciénaga son marzo a mayo. El nivel medio anual de la ciénaga es de 25.93 msnm, con variaciones decadales entre 23.5 y 29.03 msnm. El nivel medio anual del río en la boca es de 25.59 msnm, con variaciones deca-

dales entre 22.59 y 28.64 msnm. Adicionalmente, se elaboraron balances para el escenario con el caño Patón funcionando hidráulicamente antes de ser obstruido, los cuales indican que éste funcionaba fundamentalmente como una interconexión río-ciénaga, y que no siempre existía flujo. Esto indica que el caño Patón constituía un elemento importante para el amortiguamiento de crecientes en el río Magdalena (algo similar podría inferirse para el caño Tamalacué). Los meses durante los cuales era normal la entrada de agua por el caño Patón son mayo, junio, julio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. Los estimativos indican que el caudal medio anual neto de entrada por el caño Patón era del orden de 15 m³/s, con volúmenes de entrada de 450 Mm³. Debe añadirse que la capacidad hidráulica de conducción de agua del caño no era muy grande (se estima entre 30 y 35 m³/s) y por lo tanto en períodos muy húmedos no era capaz de conducir la totalidad del caudal que le aportaba el río Magdalena (hasta del orden de 150 m³/s), lo cual implicaba necesariamente su desbordamiento por los albardones hacia depresiones y pequeñas ciénagas laterales, tal como se aprecia en algunas fotografías aéreas anteriores al taponamiento del caño.

Para las ciénagas de La Rinconada - Tesca se elaboraron balances hídricos para dos escenarios de capacidad de conducción de agua en los caños por la presencia o ausencia de taruya: a) situación actual en la que el caño Menchiquejo no tiene mucha taruya pero en los caños Arenal y Tesca su presencia es masiva; b) no hay presencia notoria de taruya en ninguno de los tres caños. Los análisis establecen que el caño Menchiquejo tiene flujo bidireccional permanente, con épocas de entrada y salida de agua coincidentes con otras ciénagas del sector, consecuentes con las variaciones hidrológicas concurrentes de sus áreas tributarias y del río Magdalena. El flujo en los caños Arenal y Tesca también es bidireccional y permanente, coincidiendo aproximadamente las épocas de entrada y salida de agua de la ciénaga de Tesca con la de La Rinconada. El flujo por el caño Tesca es en general de mayor magnitud que el del caño Arenal, destacándose que usualmente los volúmenes netos por el caño Arenal son de la ciénaga de La Rinconada hacia la ciénaga de Tesca, mientras que los volúmenes netos por el caño Tesca son en sentido inverso. Por otro lado, el comportamiento del sistema indica que independiente si los caños Arenal y Tesca están o no invadidos de taruya, el caudal y los volúmenes netos de intercambio entre el río y la ciénaga de La Rinconada no varían, siempre y cuando el caño Menchiquejo permanezca sin presencia de taruya. La presencia masiva o no de taruya en los caños Arenal y Tesca sí influye notoriamente en los caudales medios

anuales y en los volúmenes netos de intercambio entre las dos ciénagas. Por una parte, el efecto de la taruya es disminuir el caudal neto en los caños, inclusive con un cambio de dirección en el sentido del volumen neto de intercambio en el caño Arenal. Para la situación actual, el caudal medio en el caño Menchiquejo es de 1.54 m³/s netos de salida de la ciénaga de La Rinconada hacia el brazo Mompós (100 Mm³ anuales de salida y 52 de entrada), el caudal medio en el caño Arenal oscila entre 0.08 m³/s netos de Tesca a La Rinconada (6.67 Mm³ anuales de Tesca a La Rinconada y 4.22 de La Rinconada a Tesca) y 0.19 m³/s netos de La Rinconada a Tesca (3.33 Mm³ anuales de Tesca a La Rinconada y 8.33 de La Rinconada a Tesca), y el caudal medio en el caño Tesca está entre 0.15 y 0.39 m³/s netos de la ciénaga de Tesca hacia la ciénaga de La Rinconada (26 Mm³ anuales de Tesca a La Rinconada y 17.5 de La Rinconada a Tesca).

Región de La Mojana

La esquematización hidrológica de la región de La Mojana se realizó con base en la información cartográfica disponible (deficiente altimétricamente), información secundaria (Hidroestudios, 1995, Roveda et al., 1997, entre otros), análisis geomorfológicos (madurez del sistema y zonas de rompimiento potencial de albardones), análisis temporal de fotografías aéreas disponibles y consideraciones hidrológicas observadas en el terreno (Uniandes, 1998). Esta esquematización (ver Figura 3) está compuesta por seis subsistemas: (1) Río Cauca, (2) Brazo de Loba, (3) Río San Jorge, (4) Caños San Matías, Rabón y Viloría, (5) Caño Mojana, y (6) Caño Panceguita. El modelo está conformado por una red de 35 tramos y 30 nodos interconectados, con cuatro nodos de entrada (estaciones hidrométricas) y un nodo de salida (estación hidrométrica de verificación de la calibración global del balance). Los balances hídricos decadales se realizaron con una actualización del programa MIHS, desarrollado por Uniandes (1992), cuyo algoritmo de solución es similar al utilizado en las ciénagas de Zapotosa y La Rinconada - Tesca. Dada la incertidumbre en la altimetría asociada con la red de drenaje, fue necesario realizar alrededor de 20 versiones de la topografía de ésta, buscando corregir problemas de convergencia y continuidad hídrica. Esto demostró que el balance de la región es sensible de manera notoria a la altimetría de la red, debido a su condición de ser una zona muy plana, por lo cual se le dio especial importancia a su definición final dentro de las grandes limitaciones de información. Para la convergencia numérica se adoptó un error máximo de 10 m³/s en el caudal o un máximo de 1,000 iteraciones en cualquier nodo de la malla. El criterio de calibración del modelo fue la comparación de los caudales

simulados con los históricos en las estaciones hidrométricas ubicadas sobre el río Cauca y el brazo de Loba. La estación de Magangué, nodo final del modelo, se tomó como estación de verificación global, donde se resume el balance integral de la red de drenaje y donde existe información de niveles y caudales históricos confiables y completos.

Con el modelo calibrado se realizaron una serie de análisis para determinar el comportamiento hídrico de los ríos y caños principales que conforman la red de drenaje de la región. Los más representativos corresponden a la variación temporal de caudales y niveles decadales, e histogramas de frecuencia. Los resultados de simulaciones de 21 años de información permiten describir la dinámica actual del transporte y almacenamiento temporal de agua en cauces y ciénagas, las áreas de regulación y los cauces de mayor capacidad de evacuación de aguas dentro de la región. La dinámica es compleja, con presencia de flujos bidireccionales que constituyen conductos de regulación dentro de la región y con ciénagas que efectivamente realizan esta función. Se logró identificar el régimen hidrológico de los componentes de la red de drenaje, cuantificar los volúmenes de intercambio entre los diferentes cuerpos de agua, y determinar la variación de niveles de las ciénagas y su capacidad de amortiguación. Esto es de particular importancia en los caños y ciénagas dentro de la región de La Mojana, donde prácticamente no existen registros hidrométricos históricos. A modo de ilustración, el caño Mojana muestra en su primer tramo (desde su derivación en el río Cauca hasta la difluencia del caño Panceguita) un comportamiento similar al observado en el río Cauca con un régimen bimodal de caudales, descrito por período de aguas bajas en los meses de enero a marzo, un primer periodo de invierno en los meses de mayo y junio, una leve recesión en los caudales y un segundo período húmedo ligeramente mayor que el primero en los meses de octubre y noviembre. Los caudales medios decadales multianuales estimados varían entre 75 y 120 m³/s. El caño Panceguita tiene una dinámica temporal similar a la observada en el caño Mojana, con una variación en los caudales decadales entre 30 y 90 m³/s. El primer tramo de este caño, que va hasta el sitio Orejero, lugar donde se comunica con la ciénaga de Las Islas, muestra durante los primeros tres meses del año un caudal muy constante, mientras que el segundo tramo que va hasta la ciénaga Murciélagos presenta un descenso progresivo de los caudales durante estos meses, notándose el efecto amortiguador de la ciénaga de Las Islas. Cuando el caño Panceguita llega al brazo de Loba se observa un comportamiento de flujo bidireccional que en promedio indica aportes netos del caño Panceguita al brazo de Loba (caudales entre 100 y 200 m³/s),

desalojando agua almacenada en la ciénaga de Murciélagos. Durante los meses de invierno, es decir mayo y octubre principalmente se presentan los aportes del Magdalena al caño (pueden entrar hasta 500 m³/s cuando el Magdalena crece). Los resultados obtenidos constituyen una primera aproximación al comportamiento hídrico de la región y representan una base preliminar para la definición de medidas de manejo del recurso hídrico tanto desde el punto de vista de inundaciones como de aprovechamiento sustentable de los recursos.

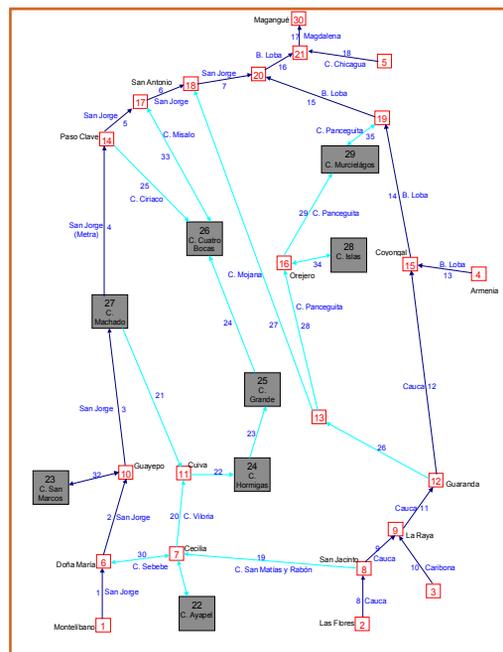


Figura 3 Esquematización del modelo de balance hídrico de la región de la mojana

CONCLUSIONES

Los balances hídricos de sistemas lagunares complejos constituyen una herramienta de mucho valor para soportar decisiones relacionadas con su manejo y su potencial socioeconómico y ecológico. Igualmente son elementos de apoyo en el diseño de obras de infraestructura, pues permiten analizar diferentes escenarios de condiciones hidráulicas, hidrológicas y ambientales, asociadas a diferentes alternativas de manejo tendientes a su conservación, recuperación y uso. La calidad de los resultados de un modelo de balance hídrico depende fundamentalmente de la calidad y cantidad de información disponible, y de las hipótesis y suposiciones adoptadas. Adicionalmente, los resultados mismos

pueden indicar necesidades prioritarias de información, tanto en espacio y en tiempo, con el fin de mejorar o validar el modelo existente. Los resultados presentados en este trabajo representan una aproximación cualitativamente válida del comportamiento de los sistemas.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Deeb Asociados, Proyecto Piloto de Recuperación de Ciénagas - Sur de los Departamentos de Cesar y Magdalena, Proyecto Piloto de Recuperación de Ciénagas, 1996.
- 2 Díaz-Granados, M., L. A. Camacho, J. I. Ordóñez y A. Deeb, Modelación del Balance Hídrico y Salino de Sistemas Lagunares Costeros, XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena, 1992.
- 3 Díaz-Granados, M., Estudios hidrológicos e hidráulicos para la modelación de balances hídricos de las ciénagas Grande de Lorica y Betancí, Urrá S. A., 1997
- 4 Díaz-Granados, M. y A. Maestre, Modelación del Balance Hídrico de Ciénagas Fluviales, XIV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Villa de Leiva, 2000.
- 5 Estudios y Asesorías Ltda, Experimentos Numéricos para el estudio del Comportamiento Hídrico de las Ciénagas de Pajara y la Ciénaga Grande de Santa Marta, Bogotá, 1989.
- 6 Hidroestudios S. A., Proyecto Piloto de La Mojana, Bajo Cauca y Bajo San Jorge, INAT, Bogotá, 1995
- 7 Hinestrosa, R., Proyecto Piloto para la Recuperación Ambiental y el Establecimiento de Condiciones Básicas para la Producción Pesquera. Sur de los Departamentos de Cesar y Magdalena, 1994.
- 8 Roveda, G., J. León, C. Salvatierra, H. Carrillo y E. Villaneda, Estudio Multitemporal de la Biosfera con el Uso de los Sistemas Remotos y Sistemas de Información Geográfica en la región de La Mojana, Adaptabilidad de la Producción Agropecuaria Sostenible en los Ecosistemas de la Región de La Mojana, Convenio Corpoica-Igac, Santa Fe de Bogotá, 1997.
- 9 Universidad de los Andes, Diagnóstico sobre el Comportamiento de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Centro de Estudios Técnicos e Investigaciones Hidráulicas, CETIH, Facultad de Ingeniería, Bogotá, 1978.
- 10 Universidad de los Andes, Modelación Integral Hidrológica e Hidráulica de la Cuenca del Río Sinú, Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, CIFI, Facultad de Ingeniería, Bogotá, 1992.
- 11 Universidad de los Andes, Modelación Hidrodinámica de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, CIFI, Facultad de Ingeniería, Bogotá, 1991.
- 12 Universidad de los Andes, Modelación Hidrológica y Dinámica Fluvial, Adaptabilidad de la Producción Agropecuaria Sostenible en los Ecosistemas de la Región de La Mojana, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Facultad de Ingeniería, 1998.
- 13 Uribe, J., Análisis de Estructuras, Ediciones Unian-des, 1991.

LA ACUMULACIÓN DE BASURAS COMO MATERIAL GEOTÉCNICO I: FUNDAMENTOS TÉCNICOS

Augusto Espinosa Silva.¹

Alvaro J. González García.²

Abstract

Human wastes constitute an evergrowing by-product of civilization. Several catastrophic landslides have taken place in these so-called sanitary landfills. It is apparent that geotechnical and environmental engineers follow divergent paths to solve the related technical problems. Part I of this paper addresses the development of mechanical sciences leading to Soil Mechanics (1925) and Rock Mechanics (1960). Part II is dedicated to show how these sciences and arts or geomechanics are applied to huge accumulations of garbage of what could be referred to as anthropic waste deposits.

Palabras Claves

Depósito de basuras, desechos antrópicos, sólidos, materiales particulados, presión de poros, presión de gases, composición y descomposición de basuras, desechos sólidos, esfuerzos efectivos, resistencia deformación y consolidación, geopiezococono, influencia del tiempo.

1. INTRODUCCION

Los materiales naturales de la corteza del planeta Tierra generalmente se dividen en rocas y suelos; la humanidad ha creado un tercer tipo de material, cuya presencia ha comenzado a ganar en importancia en la medida en que el crecimiento de los hombres sobre la tierra se ha hecho exponencial. Este tipo de material está constituido por acumulaciones de basuras, que más elegantemente podrían bautizarse como desechos antrópicos.

Por su parte, las rocas se clasifican en ígneas, sedimentarias y metamórficas, según su formación. Las rocas ígneas, formadas de la solidificación de una solución silícea a altas temperaturas, comprenden cerca del 80% de toda la corteza terrestre continental y sub oceánica que se conoce; las rocas metamórficas corresponden a un 15% y las sedimentarias a sólo 5%. Sin embargo, el

75% de la superficie de las plataformas continentales, y una proporción más alta de los pisos oceánicos, están cubiertos por una delgada capa de sedimentos [Winterkorn y Fang, 1991]

En cuanto a las basuras, debe decirse que su acumulación ha pasado a ser un indicador arqueológico de la presencia de antiguos asentamientos humanos, a partir del descubrimiento de ciertas colinas en los alrededores de la Roma imperial, que, al fracasar su interpretación desde el punto de vista geológico, resultaron ser los despojos mortales del imperio. Este mismo criterio viene siendo aplicado en el descubrimiento de otros restos en la península de Anatolia y en la antigua Media luna Fértil. En los Estados Unidos las estadísticas indican que en 1920 la unidad familiar promedio generaba 2.7 lbs (1.22 kg) de basuras por día. Al llegar a 1970 la cifra fue de 5.3 lbs (2.40 kg) por día. En 1980 se llegó a 8.0

¹ Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. Master of Science, University of Illinois, USA. Profesor de tiempo parcial Universidad de los Andes por 16 años.

² Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. Master of Science, Universidad de Londres. Diploma del Imperial College. Profesor asociado de la Universidad Nacional desde 1975

lbs (3.63 kg). Si, además, se agregaran los desechos industriales -de minas y fábricas- la cifra per cápita se acercaría a 50 lbs por día (22.7 kg). [Ward y Dubos, 1972]

Tchobanoglous et al, (1993) recogen cifras de 6 lbs (2.7 kg) per capita al día en 1990, de sólo desechos urbanos sólidos en los EE.UU.

En Bogotá D.C., los desechos sólidos, familiares y urbanos varían entre 0.8 kg per cápita al día y 1.5 kg según el vecindario y la época del año.

Desde 1925 con la publicación de *Edbaumechanik* por Karl Terzaghi se reconoce una rama de la mecánica que se aplica a los suelos, entendiendo por éstos, desde el punto de vista de ingeniería, como el conjunto de materiales encontrados en la capa superficial de la tierra, suficientemente blandos como para ser removidos mediante pala o azadón [Winterkorn y Fang, 1991] o, más técnicamente, como el agregado natural de granos minerales que puede ser separado por medios mecánicos suaves como la agitación en agua [Terzaghi, Peck y Mesri, 1996]. Con todo y su mayor presencia en la corteza terrestre, la mecánica de las rocas sólo puede ser identificada a partir de 1960 [Goodman, 1980]. Con métodos de éstas dos disciplinas, algunos de cuyos puntos sobresalientes se presentan a continuación, se ha venido formulando una mecánica de las basuras, aún incipiente. [Landva y Knowles 1990; Tchobanoglous et. al., 1993;].

2. MATERIALES SÓLIDOS

2.1 División

La división de los sólidos desde el punto de vista de ingeniería se hace comúnmente en metálicos, cerámicos y poliméricos.

- i. Sólidos Metálicos.* En los sólidos metálicos la principal característica es el orden generalizado. Las moléculas o átomos se extienden en un arreglo regular que cubre el cristal. Los enlaces son a nivel atómico y forman los cristales metálicos que se obtienen en estado natural o por metalurgia..
- ii. Sólidos Cerámicos.* A diferencia de los anteriores en los vidrios el arreglo ordenado no tiene largo alcance sino que se extiende a reducidos espacios de la materia. Se dice de los vidrios que son líquidos supercongelados. También se describen como sólidos amorfos. Los enlaces son predominantemente

covalentes o iónicos En este grupo quedan los vidrios, las cerámicas, el concreto, las rocas y los suelos.

- iii. Sólidos Poliméricos.* Se caracterizan por formar largas cadenas de uniones químicas cruzadas. A una temperatura inferior a la crítica se comportan como vidrios; a temperaturas superiores a esa crítica, se comportan como cauchos. Los enlaces predominantes son de van der Waals. El ejemplo en este caso, es el polietileno, que literalmente significa muchos etilenos.

2.2 TIPOS DE ENLACES

El tipo de enlace es fundamental en la conformación del sólido y en la determinación de sus propiedades mecánicas. Se distinguen los siguientes tipos de enlaces, del más débil al más fuerte:

- **ENLACES DE VAN DER WAALS.** Son enlaces secundarios entre las moléculas debidos fundamentalmente a la atracción entre cargas eléctricas de signos diferentes. Debe anotarse que se atraen, en este caso, las moléculas y no los iones.. En el caso de moléculas vecinas del HCl la atracción será proporcional a x^{-7} , donde x es la distancia entre moléculas.
- **ENLACE IÓNICO.** Enlace entre los iones metálicos y no metálicos en el que el metal cede uno o varios electrones, de los cuales se apropia la capa externa del no metal. El resultado es que se producen iones negativos del no metal y iones positivos del metal, los cuales al atraerse generan el enlace. Las fuerzas resultantes del enlace varían con x^{-2} , donde x es la distancia entre iones.
- **ENLACE COVALENTE.** Es un enlace en el cual los átomos de un mismo elemento comparten electrones, dando como resultado un enlace fuerte. Es pués un enlace atómico, cuyas fuerzas caen rápidamente con la separación entre los átomos. Las fuerzas se distinguen como fuerzas de valencia. Las fuerzas resultantes del enlace varían con x^{-3} para el hidrógeno en cortas distancias, donde x es la distancia entre átomos.
- **ENLACE METÁLICO.** Es el enlace en el cual los átomos del metal ceden sus electrones a una nube de electrones común y adoptan un ordenamiento regular usualmente con máximo empaquetamiento. Las fuerzas resultantes del enlace metálico también varían con x^{-3} , en muchos casos. La fuerza de la atracción produce la **resistencia**, mientras la movilidad de los electrones produce la **conductividad**.

En un granito los enlaces son esencialmente covalentes al igual que los enlaces del silicio en las partículas de cuarzo y los enlaces de carbono en un diamante.

En las arcillas los enlaces son iónicos y covalentes dentro de la partícula y de van der Waals entre las láminas.

Se han seguido de cerca para estas descripciones, las obra de Flinn & Trojan, 1991-1989 y la clásica obra de Tabor, 1979. (Cuadros Nos. 1 y 2)

2.3 Comportamiento Mecánico de los Sólidos

2.3.1 GENERALIDADES

Interesa conocer cómo se comportan los sólidos ante sollicitaciones mecánicas. Para estos efectos, primero debe analizarse cómo responden ante un régimen de esfuerzos: tracción, compresión y cortante; en segun-

do término, debe estudiarse la deformación bajo carga del sólido; en tercer lugar debe relacionarse el esfuerzo con la deformación correlativa, para observar el tipo de comportamiento que permita un ordenamiento y una clasificación de la forma de respuesta particular. Se estudiarán entonces, los modos de comportamiento y la forma en que se ha decidido su representación práctica. Solo después de lo anterior se entrará de lleno en las llamadas **teorías de falla** que se han propuesto para explicar en últimas el comportamiento bajo carga de los diferentes materiales. A propósito, no debe confundirse la representación del comportamiento con la teoría que explica su rotura.

Luego, debe hacerse referencia a ciertas discontinuidades que se observan, desde la escala molecular hasta los macizos rocosos. Se mencionarán aquí el clivaje, el maclaje, las fisuras y las diaclasas. Las fallas geológicas quedan fuera de los alcances del presente trabajo.

CUADRO No.1 PRINCIPALES TIPOS DE ENLACES			
ENLACE	CARACTERÍSTICA	EJEMPLOS	ESTADO CRISTALINO
Van der Waals	Débil	H ₂ sólido, K _r Parafinas	Empaque apretado de unidades débilmente atraídas.
Iónico	Fuerte	N _a CL	Enormes agregados de iones positivos y negativos, firmemente empacados en forma consistente con la neutralidad de la carga.
Covalente	Fuerte	Diamante, S _p , G _e	Moléculas gigantes con enlaces direccionales, empaquetamiento dependiente del número de la valencia y de su dirección.
Metálico	Fuerte	Metales	Electrones de valencia dejados por átomos, resultan en iones en un mar de electrones

Modificado de Tabor, D. Gases, Liquids and Solids (1.979)

2.3.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Los principios que se recogen enseguida estrictamente se aplican a cualquier cuerpo compuesto por una **distribución continua** de materia tal como acero, roca, madera o plástico, según advierten Obert & Duvall (1967). Más adelante se recogen las discontinuidades presentes en estos materiales que obligan a plantear ciertas restricciones a los planteamientos generales que se van a formular.

CUADRO No. 2 EJEMPLOS DE FUERZAS INTERMOLECULARES				
TIPO	NATURALEZA	EJEMPLOS	MODO DE SEPARACIÓN	ENERGÍA POR ENLACE Jx10 ²¹
Van der Waals	Igual que en átomos	Metano sólido CH ₄	Ruptura en el CH ₄ ⁺	3
Iónico	Idéntica al de Fuerzas Interatómicas Cristal	N _a F	Ruptura entre los iones N _a ⁺ y F ⁻	300
Covalente	Moléculas gigantes sost.s por fuerzas covalentes	Diamante,	Ruptura dentro de los átomos de C	600
Metálico	Iones metálicos en un mar de lectrones libres con valencia	K	Vaporización entre iones metálicos + electrones	500

El término **esfuerzo** tiene unidades de fuerza por unidad de área. Así, puede escribirse que el esfuerzo S_n debido a una fuerza F en cualquier punto P de un plano de área A cuya normal es n está dado por:

$$S_n = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

y sus componentes cartesianos por x , y y z .

Ahora, la fuerza incremental ΔF puede resolverse en sus dos componentes: DF_n normal al plano dado y ΔFt paralelo a dicho plano. Por definición se tiene:

$$\sigma_{nn} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A}$$

$$\tau_{nt} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta Ft}{\Delta A}$$

donde t es en la dirección de la intersección del plano formado por σ_{nn} y S_n y el plano tangente al área ΔA en el punto P .

Un esfuerzo perpendicular a un área será el esfuerzo normal a esa área y será denotado por σ . Un esfuerzo paralelo a dicha área será el esfuerzo cortante y será denotado por τ . La resultante de σ_{nn} y tnt es también S_n ; por tanto estos esfuerzos estarán relacionados por:

$$S_n^2 = \sigma_{nn}^2 + \tau_{nt}^2$$

$$\sigma_{nn} = S_n \cos(S_n, n)$$

$$\tau_{nt} = S_n \cos(S_n, t)$$

De la misma manera se puede demostrar que los esfuerzos sobre un plano cuya normal hace un ángulo θ con la horizontal, sumando los esfuerzos por σ_θ y por τ_θ e igualando a cero, son:

$$\sigma_\theta = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\tau_\theta = \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) - (\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta$$

y con la ayuda de identidades trigonométricas:

$$\sigma_{max} = P = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{min} = Q = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

Derivando con respecto a θ e igualando a cero, se termina por obtener los esfuerzos máximo y mínimo en el plano de interés, que son:

$$\sigma_{max} = P = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{min} = Q = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

Como se ve, los esfuerzos máximo y mínimo han sido bautizados P y Q , respectivamente.

Por convención, en geomecánica, se adoptan como **positivos** los esfuerzos y deformaciones de **compresión**, mientras que en otras ramas de la ingeniería, lo usual es que los esfuerzos y deformaciones de tracción sean los positivos.

2.3.3 EL CÍRCULO DE MOHR PARA ESFUERZOS

De las anteriores ecuaciones se deriva que:

$$\sigma_\theta = \frac{P+Q}{2} + \frac{P-Q}{2} \cos 2\theta$$

$$\tau_\theta = \frac{P-Q}{2} \sin 2\theta$$

Así el esfuerzo normal a cualquier ángulo θ con la horizontal y el esfuerzo cortante correspondiente, han sido expresados desde tiempo atrás en el círculo de Mohr. (Figura 1)

Sin necesidad de círculo, así ha terminado representándose la relación τ - σ , ya sea para ilustrar disquisiciones teóricas o para recoger ordenadamente la información acumulada en forma experimental.

Cabe anotar, además, que el círculo de Mohr es una manera conveniente de representar vectores tridimensionales y también es aplicable, por ejemplo, a momentos y productos de inercia.

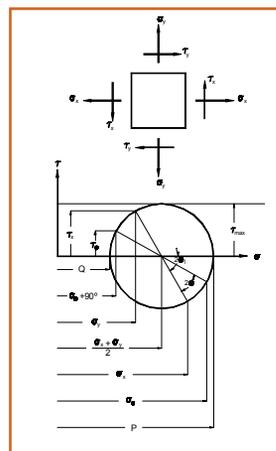


Figura 1 - Círculo de Mohr

2.3.4 ANÁLISIS DE DEFORMACIONES

Todo material sólido, al ser sometido a esfuerzo, se deforma y absorbe la energía impuesta. Si a un prisma inconfinado de base cuadrada $B \times B$ y longitud L_{z0} , se le aplica un esfuerzo de compresión σ_z en la misma dirección z , se deforma ΔL_z . La deformación unitaria ϵ_z se define en ingeniería como:

$$\epsilon_z = \Delta L_z / L_{z0}$$

Al mismo tiempo el prisma sufre expansiones iguales a $-\Delta B$ en las otras dos direcciones, las cuales resultan en deformaciones unitarias laterales:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = -\Delta B / B$$

La relación esfuerzo-deformación ($\sigma-\epsilon$) entonces puede catalogarse como una curva de densidad de energía elástica, en la cual la energía elástica U por unidad de volumen V viene dada por (Figura 2):

$$U = Y/\zeta = \int \sigma \delta \epsilon$$

2.3.5 COMPORTAMIENTOS ESFUERZO - DEFORMACIÓN

En forma teórica ideal se pueden distinguir dos casos de carga: **carga-descarga** y **carga monotónica** (González, 1990).

En **carga-descarga** pueden presentarse dos casos extremos: (A) que al descargar el sólido retorne totalmente la energía elástica que absorbió y recupere la deformación, lo cual se denomina **comportamiento elástico** (Figura 3a) o (B) que el sólido absorba totalmente la energía impuesta, el retorno sea nulo y al completar la descarga el sólido quede permanentemente deformado, caso de comportamiento plástico (Figura 3b).

En **carga monotónica** también puede haber dos situaciones extremas al llegar al esfuerzo máximo que resiste el sólido $\sigma_{m\acute{a}x}$: (A) que el sólido se deforme indefinidamente manteniendo la carga máxima, lo cual se denomina **comportamiento dúctil** (Figura 4a) o (B) que el sólido se deforme pero reduzca la carga que acepta, gradual o bruscamente, hasta cero, situación que corresponde a un **comportamiento totalmente frágil** (Figura 4b).

En la ductilidad el sólido sigue absorbiendo energía para deformarse, mientras que en fragilidad el sólido, luego de cierta deformación crítica, correspondiente al esfuerzo máximo, no acepta más carga y entonces se presenta una diferencia de energía elástica, entre el esfuerzo impuesto y el esfuerzo aceptado por el material, diferencia que se libera en otras formas de energía y se gasta en: la creación de superficies de falla al romperse los enlaces, en energía cinética que hace moverse al sólido, en energía vibratoria, energía térmica, electromagnética y hasta nuclear.

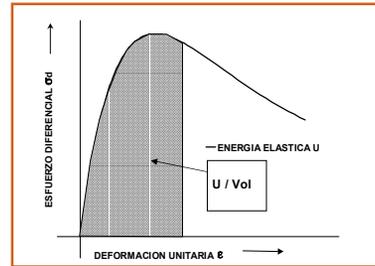


Figura 2 - Esfuerzo-deformación y Energía Elástica

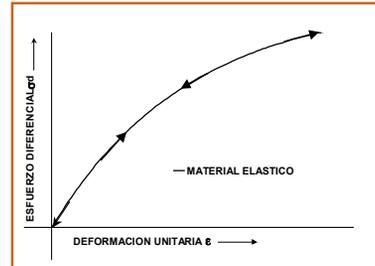


Figura 3a - Comportamiento elástico

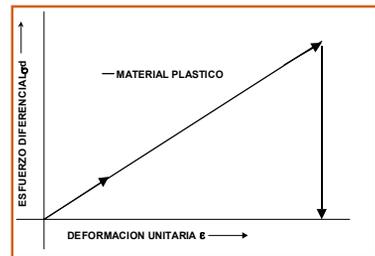


Figura 3b - Comportamiento plástico

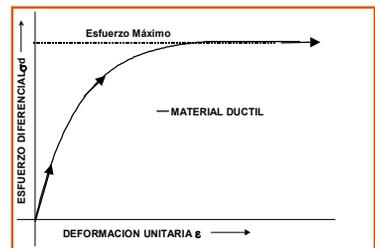


Figura 4a - Comportamiento dúctil

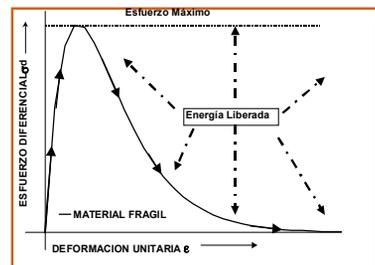


Figura 4b - Comportamiento frágil

Los materiales elásticos reales usualmente tienen una relación σ - ϵ lineal, por lo que comúnmente se tiende a relacionar la linealidad con la elasticidad. Por otro lado los materiales dúctiles, luego de entrar en la fase de esfuerzo máximo constante, al descargarlos, son totalmente plásticos, por lo que los términos dúctil y plástico tienden a hacerse equivalentes y esto es una actitud generalizada en toda la literatura técnica sin considerar las relaciones energéticas.

2.3.6 ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN SÓLIDOS REALES

No todos los materiales sólidos siguen idéntico patrón de esfuerzo-deformación y dependiendo del tipo de material, los niveles de esfuerzos, tanto de confinamiento como diferencial, los niveles de deformación y las condiciones ambientales, se presentará uno o secuencialmente varios de los tipos de comportamientos mencionados .

Dentro de la tipología de materiales ya mencionada, los materiales metálicos tienden a ser elásticos y dúctiles, los materiales cerámicos a ser elastoplásticos y parcialmente frágiles y los materiales poliméricos a presentar comportamientos plásticos y dúctiles.

Por ejemplo, Hendron (1970) reprodujo la tipología propuesta para materiales rocosos por Miller en su tesis en la U. de Illinois, que va desde materiales **elásticos** (lineales) como el **basalto** (Tipo I), hasta **elastoplástico con fluencia** (lineal-dúctil) en el caso de la **sal gema**, (Tipo VI), pasando por **plastoelastoplástico** en el caso del **esquistos** (Tipo V) (Figura 5)

En un régimen de esfuerzo-deformación, sólidos frágiles pueden hacerse dúctiles, lo cual es de extraordinaria importancia para comprender el comportamiento de los materiales de la corteza terrestre. Para comodidad de la explicación, es útil considerar el comportamiento de un espécimen metálico homogéneo, de sección transversal uniforme, que es sometido a tracción (Figura 6 -Tabor, 1979):

- **COMPORTAMIENTO DÚCTIL.** En el diagrama σ - ϵ inicialmente se producirá una deformación para cada incremento de esfuerzo, hasta el punto A, de tal manera que la representación es lineal y en cualquier punto en que se decida retirar el esfuerzo, la deformación retornará al punto inicial; el régimen es elástico. Si se continúa incrementando el esfuerzo, se llega al punto Y, o de fluencia, a partir del cual la relación no es lineal y una eventual descarga a partir de B, mostrará una deformación remanente en O' y O'B será aproximadamente paralela a OA. Entre Y y Z el material sufrirá una deformación plástica. Ahora, si el espécimen es sometido a una presión hidrostática

(presión ambiente igual en todas direcciones), el punto de fluencia no ocurrirá sino hasta que se haya excedido tal presión. Esta condición de deformación plástica de Y a Z, lleva a un endurecimiento por trabajo (work hardening), y se ha entrado en la ductilidad

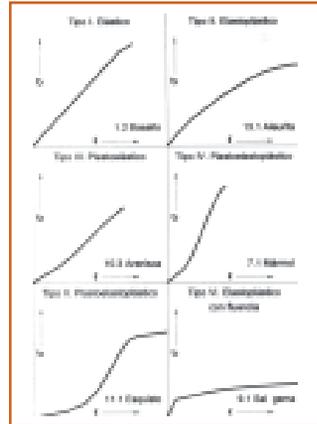


Figura 5 - Materiales Rocosos

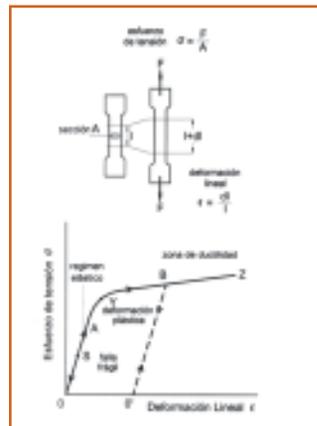


Figura 6 - Comportamiento σ - ϵ de un metal

- **COMPORTAMIENTO FRÁGIL.** Aprovechando la misma figura, si el material no muestra ninguna ductilidad, se aplicará la tracción hasta llegar a un punto S en el cual el material fallará súbitamente. Se dirá entonces que su comportamiento es frágil.

Si el espécimen es sometido a una condición hidrostática P, la falla frágil tendrá lugar a un esfuerzo P+S. Ahora bien, si se considera la muestra cargada a P+S, estará sometida a un esfuerzo cortante iguala 1/2 (P+S). Si el esfuerzo se mantiene ligeramente por debajo del anterior, la falla frágil no ocurrirá y el material fluirá en forma dúctil.

Esta es la explicación por la cual las rocas en la corteza terrestre, aún siendo materiales frágiles en superficie, debido al esfuerzo de confinamiento, el cual aumenta con profundidad en la corteza, pueden deformarse plásticamente como si de materiales dúctiles se tratara. Adicionalmente la temperatura también hace más dúctiles los materiales rocosos y la temperatura también crece con profundidad y por eso la fragilidad de las rocas necesaria para producir energía vibratoria (léase sismos) tiene un límite de profundidad: no se conocen hipocentros sísmicos de más de 850 km de profundidad.

2.3.7 TEORÍAS DE FALLA

El término **falla** de un material denota una casi total pérdida de integridad en una muestra bajo análisis [Goodman, 1980] o lo mismo, **la rotura** de la muestra. Esto ocurre cuando el **comportamiento es frágil**, en donde el excedente de energía elástica permite la destrucción de los enlaces y la creación de superficies de ruptura, las cuáles sólo pueden presentarse en este tipo de comportamiento. Por el contrario, en **comportamiento dúctil**, el material puede deformarse bajo carga sin que presente una pérdida catastrófica de sus propiedades. En realidad la rotura del material bajo carga depende del mecanismo de aplicación y de las condiciones ambientales ya discutidas y no es una verdadera propiedad intrínseca del material.

En términos más generales y ya al referirse a obras, una falla en ingeniería se puede considerar como la pérdida o disminución significativa de una o varias de sus características deseables, todas ellas interrelacionadas entre sí (González, 1974):

- 1 **SEGURIDAD:** es decir que en ningún momento de su existencia, la obra vaya a causar desastres (pérdidas irre recuperables)
- 2 **ESTABILIDAD:** o sea que la obra debe permanecer dentro de ciertos límites físicos y energéticos.
- 3 **CAPACIDAD DE SERVICIO:** o su propiedad de cumplir el propósito asignado en el periodo establecido para su existencia.
- 4 **DURABILIDAD:** o la facultad para permanecer durante el tiempo previsto (vida útil).

Entonces, desde el punto de vista mecánico, en algunos casos se podrá hablar de máximo esfuerzo, en otros casos de máxima deformación, de manera que no se altere el correcto desempeño de la instalación bajo análisis. Unos serán los criterios para una central atómica, y otros para una instalación temporal de barracas de madera.

Los materiales sólidos sólo pueden romperse por esfuerzos de **tracción** o de **cortante**. Fallas por sollicitaciones de flexión, compresión, torsión o aplastamiento, siempre se pueden interpretar en términos de los antedichos esfuerzos y tienen lugar en la naturaleza. Por lo tanto o con mayor razón, en obras construídas por el hombre o derivadas de su acción directa.

Por todo é ello, es deseable disponer de una teoría mecánica de falla, basada en resultados teóricos o experimentales, donde se establezca cómo los materiales son afectados hasta rebasar su resistencia, por el estado de esfuerzos, el tiempo transcurrido, la temperatura y otros factores determinados por la necesidad específica.

Algunas de la teorías de falla que se han postulado a lo largo del tiempo para materiales sólidos son:

- **TEORÍA DE COULOMB (EN HEYMAN, 1972).** Coulomb presenta "el efecto de la fricción y la cohesión en algunos problemas de estática" y postula que la resistencia de la mampostería y de los suelos se compone de las fuerzas pasivas de cohesión y fricción, la primera de ellas proporcional al área de la superficie de falla y la segunda proporcional a la fuerza normal sobre el mismo plano de falla, "de acuerdo con lo ya encontrado por Amontons". Se llega al equilibrio cuando en ese plano del material "las componentes de las cargas resueltas paralelas al plano inclinado sean exactamente iguales a la resistencia" es decir cuando se llegue a un esfuerzo cortante dado
- **TEORÍA DE MOHR.** Mohr postula que el material se fracturará o sufrirá una deformación permanente, siempre y cuando el esfuerzo cortante exceda un cierto valor τ_0 , dependiente del esfuerzo normal al mismo plano, o cuando el máximo esfuerzo de tensión llegue a un valor predeterminado T_0 .
- **TEORÍA DE GRIFFITH.** Griffith formuló para metales la hipótesis de una fracturación frágil en tracción originada al propagarse las microfisuras existentes en los materiales, hasta convertirse en una falla macroscópica. Posteriormente Hoek la extendió a la falla en compresión en materiales rocosos.
- **TEORÍA DE MOHR-COULOMB.** La denominada por muchos teoría de Mohr-Coulomb, en realidad combina lo encontrado por éstos dos autores y basada en experimentaciones reales, en especial de suelos, postula una resistencia al esfuerzo cortante s , tal que al excederse se origina la falla. Dicha expresión adopta la forma lineal de: $s = c + \sigma \tan \phi$, donde c es la cohesión y ϕ es el ángulo de fricción interna.

- **TEORÍAS EMPÍRICAS DE FALLA.** Se han planteado varias teorías empíricas de falla que consideran, con base en los postulados de Mohr-Coulomb, la realidad de un conjunto de muestras de laboratorio cuya envolvente de falla en el diagrama τ - σ será ligeramente convexa y no lineal. Dentro de estas envolventes se encuentran las de enrocados, las de materiales rocosos y las de discontinuidades en roca.
- **OTROS CRITERIOS (TRESKA, VON MISES, ETC).** Los criterios de von Mises y Tresca pertenecen ya a la explicación de la cedencia de los materiales en el ámbito de la plasticidad. Se basan en una observación previa según la cual los materiales sólidos, en especial los metales, sometidos a esfuerzos de confinamiento perfectamente hidrostáticos, no muestran ninguna tendencia a la deformación o a la reptación; se concluye pues, que la deformación plástica debe estar asociada a cierta distorsión o esfuerzo cortante.

2.3.8 DISCONTINUIDADES

Los postulados teóricos son planteados para medios homogéneos e isotrópicos. Se sabe, sin embargo, que las masas de sólidos de común ocurrencia en la naturaleza poseen discontinuidades. Se mencionan, dentro de los alcances de este trabajo, las siguientes:

- **CLIVAJE.** Es la propiedad de muchos minerales de romperse en ciertas direcciones predominantes, a lo largo de planos regulares, como resultado del arreglo atómico particular que en esa dirección presenta una debilidad. Ocurre a escala intracrystalina.
- **MACLAJE.** Es una deformación plástica que ocurre en la formación de los cristales de manera que cada átomo se corre en proporción a la distancia al límite del maclaje y se forma así una estructura cristalina que semeja una flor.
- **DIACLASADO.** Es una rotura o conjunto de roturas dentro de la masa de rocas sólidas, a lo largo de las cuales no ha ocurrido movimiento. Tienen lugar por enfriamiento del material rocoso, o por fuerzas tectónicas coetáneas con doblamientos, y convierten el macizo rocoso en un conjunto de bloques apretados entre sí, pero sin estricta continuidad entre ellos.

2.3.9 RUGOSIDADES DE DIACLASAS

Patton (1966), presentó una serie de ensayos controlados en diaclasas secas, aserradas e intactas, de los cuales le fué posible deducir un comportamiento al corte, modificando el postulado de Mohr-Coulomb así:

$$\tau = \sigma \tan (\phi_u + i)$$

donde:

- τ = esfuerzo cortante
- σ = esfuerzo normal
- ϕ_u = ángulo de fricción en la superficie
- i = ángulo de las asperezas

Lo anterior quiere decir que el cizallamiento a lo largo de una diaclasa sin pulir, no solo debe sobrepasar el ángulo de fricción interna ϕ_u , sino además remontar las asperezas o irregularidades de la misma diaclasa, representadas por i . Converge este hallazgo con el concepto de **dilatancia**, o la **resistencia al cambio de volumen**, ya expresado anteriormente por Reynolds en sus clásicos experimentos con arenas sueltas y densas,

3. MATERIALES PARTICULADOS

3.1 Generalidades

Hasta este punto, los materiales sólidos han dominado el panorama de lo que se viene exponiendo, de una mecánica del medio continuo, con irregularidades y discontinuidades que, mal que bien, se ha podido manejar con ciertas correcciones y ajustes a las teorías y postulados iniciales.

A partir de Terzaghi, todo cambia. Ya no se trata de resolver un continuo, sino una masa donde la ley son las discontinuidades distribuidas en toda ella de manera más o menos aleatoria, pero también continua.

Entonces, es necesario hacer referencia a los materiales particulados, compuestos por fragmentos sólidos y con interacción esencialmente mecánica entre ellos.

Marsal inició en 1963 la presentación de sus profundas investigaciones sobre enrocados y más adelante Harr (1977) escribió un libro que tituló precisamente *Mechanics of Particulate Media*, en la cual trata la interacción mecánica entre partículas con modelos probabilísticos. Muchos otros autores también han investigado este asunto, entre ellos Trollope quién ha postulado una **mecánica clásica de las rocas**, dado que éstas estarían compuestas por clastos (en griego fragmento). Pese a que estos esfuerzos se realizaron en los 60s, la mecánica de las rocas no se desarrolló por este camino, aunque sus fundamentos son dignos de tomarse en cuenta.

Posteriormente Jiménez Salas (1982) haría referencia a la **Mecánica de los Conjuntos Particulados**: "Esto nos conduce de lleno en un concepto que fue fundamental para los primeros que se ocuparon de estos temas, pero que muchas veces ha quedado relegado a segundo pla-

no. El suelo no es un continuo sino un conjunto particulado. El modo de tratamiento habrá de ser una Mecánica de los Conjuntos Particulados, que podremos llamar, quizás con una denominación demasiado enfática, mecánica del suelo cuántica, pues tenemos un cuanto, que es la partícula".

3.2 Principio de los Esfuerzos Efectivos

Este, que algunos llaman la Ley de Terzaghi fue intuído desde antes de su formulación explícita en 1936, por otros investigadores que lo precedieron, como Reynolds. Sin embargo, fue Terzaghi quien primero entendió cabalmente sus consecuencias para materiales particulados que además llevan fluidos en sus poros, de manera que:

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

donde

σ = esfuerzo total

σ' = esfuerzo efectivo

μ = presión de poros o de fluidos o esfuerzo neutro.

La consecuencia trascendental de esta formulación es que cualquier deformación, distorsión o cambio de la resistencia al corte de un medio particulado es resultado únicamente de un cambio en el esfuerzo efectivo σ' , que interesa a los contactos entre sólidos y no al esfuerzo total σ que se aplica también parcialmente a la fase fluida.

La extensión del principio a otros materiales sólidos porosos como rocas o concreto ya no es tan directa y requiere de formulaciones algo diferentes (i.e. Skempton, 1964)

3.3 La Deformación Diferida

La teoría de la deformación diferida o consolidación también se debe a Terzaghi. Precisamente porque el medio es particulado, y porque existen enlaces entre las partículas -algunos de los cuales son viscosos-, cualquier cambio en la presión de poros se traducirá en cambios en el esfuerzo efectivo y se representará en un acomodamiento de la estructura del material, que dependerá del tiempo transcurrido desde la aplicación de la carga y la transferencia de ésta del medio fluido al medio sólido, por movimiento del fluido en los poros. La respuesta del material, suelo en este caso, será su consolidación bajo carga. Siguiendo los postulados de la teoría de Terzaghi, junto con las contribuciones de

otros investigadores, es posible calcular los asentamientos que sufrirá una masa de suelo sometida a cargas y en cuánto tiempo ocurrirán.

3.4 Resistencia en Medios Particulados

La resistencia de los materiales particulados, se puede considerar entonces con tres componentes: cohesión (c), dilatancia ($v = \tan i$) y fricción ($\mu = \tan \phi$)

Aunque la separación de estas componentes no es fácil se puede postular el siguiente comportamiento esfuerzo-deformación de cada una de ellas (González, 1990) (Figura 7):

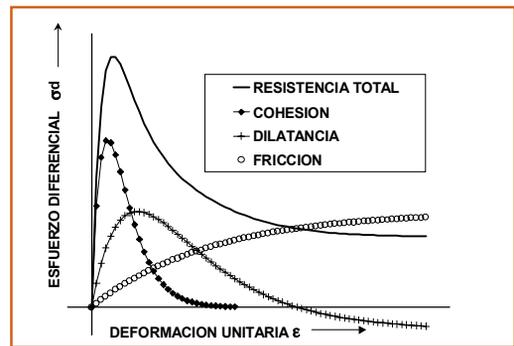


Figura 7 - Componentes de Resistencia

- Cohesión: rígida, elasto-plástica y frágil
- Dilatancia: relativamente rígida, elastoplástica y frágil. Puede ser negativa.
- Fricción: poco rígida, plástica y dúctil.

Los materiales puramente particulados o **materiales granulares gruesos** como enrocados, gravas o arenas poseen únicamente dilatancia y fricción. Si están totalmente sueltos tienen fricción y eventualmente dilatancia negativa, lo que lo hace plásticos y dúctiles. Si son densos tienen fricción y dilatancia positiva, lo que lo hace frágiles y elasto-plásticos.

Los materiales particulados finos como limos, por su alta superficie específica ya tienen fuerzas electroquímicas de superficie que les dan algo de fuerzas cohesivas. Por su parte las arcillas tienen enlaces de van Der Waals y eventualmente iónicos entre partículas, lo que las provee de una cohesión verdadera, la cual sin embargo, depende de las condiciones físico-químicas del fluido de los poros.

Los materiales orgánicos, como las turbas, también considerados por la geomecánica, son conjuntos parti-

culados que provienen de descomposición especialmente de vegetales (materiales poliméricos), tienen una estructura intrínseca altamente porosa y sufren procesos bioquímicos de cambio que las transforman. Son dúctiles, altamente compresibles y tienen resistencias inicialmente friccionantes que se van transformando a cohesivas y en conjunto reduciendo a medida que su descomposición aumenta.

Por su lado, las basuras, compuestas por materiales particulados también orgánicos en su mayoría, relativamente frescos inicialmente y mezclados con otro tipo de sólidos, especialmente papel y plásticos (poliméricos) tienen parecido en su comportamiento con las turbas, pero son más heterogéneas y variables y su proceso de descomposición ocurre en los rellenos casi en su totalidad y en ambientes no totalmente saturados, como sí es el caso de los depósitos de turbas.

Finalmente es necesario recordar que los medios particulados no son exclusividad de la geomecánica, sino también de otras disciplinas que involucran este tipo de materiales, como procesos industriales de polvos y granulados; granos en silos; etc.

En la segunda parte de este trabajo se hará referencia específica a las propiedades de las basuras dentro del ámbito descrito aquí y en especial para las basuras del Relleno Sanitario Doña Juana en Bogotá D.C..

REFERENCIAS

- FLINN, R. & TROJAN, P. Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones. 3a Edición, McGraw Hill. 1991
- GONZALEZ, A. J. Safety Factors - A Conceptual Review - M.Sc. Thesis- Imperial College, 1974
- GONZALEZ, A. J. Curso de Mecánica de Rocas -Notas sin publicar- Universidad Nacional de Colombia, 1990
- GOODMAN, R. Introduction to Rock Mechanics. Wiley. 1980
- HARR, M.E. Mechanics of Particulate Media. John Wiley & Sons, 1977
- HENDRON, A, J. Propiedades Mecánicas de las Rocas. Capítulo 2 Mecánica de las Rocas en la Ingeniería Práctica, Stagg & Zienkiewicz, Ed. Blume, 1970
- HEYMAN, J. Coulomb's Memoir on Statics Imperial College Press, 1972
- JIMÉNEZ SALAS, J. El lugar de la Geotécnica en el Panorama de la Ciencia. Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos. México, 1982
- LADNVA, A; KNOWLES, G. F. Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice ASTM STP 1070, 1990
- OBERT, L.; DUVALL, N. Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock. Wiley. 1967
- PARRY, R.H.G. Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics - E & FN Spon -London, 1993
- PATTON, F, D. Multiple Modes of Shear Failure in Rock. 1ST. IntL Congress on Rock Mechanics, Lisbon. 1966
- SKEMPTON, A. W. Effective Stress in Soils, Concrete and Rocks. Pore Pressure and Suction in Soils Butterworths, London, 1961
- TABOR, D. Gases Liquids and Solids. 2a, Ed, Cambridge University Press. 1979
- TCHOBANOGLIOUS, et. al. Integrated Solid Waste Management. McGraw Hill. 1993
- TERZAGHI, K.; PECK, R.B. MESRI, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley Interscience. 1996
- WARD, B; DUBOS, R. Only One Earth. Norton, 1972
- WINTERKORN; FANG. Soil Technology and Engineering Properties of Soils. Ch 3. Foundation Engineering, Van Nostrand, Reinhold. 1991