

## CONTROL DE EROSIÓN SUPERFICIAL EN PLANTA DE BENEFICIO EMPLEANDO GEOMANTA TRIDIMENSIONAL REFORZADA

E. Ramírez Torres, Maccaferri de México Sa de CV, Querétaro, México.

M. Miuzzi, Maccaferri de México Sa de CV, Querétaro, México.

P. Dos Santos, Maccaferri do Brasil, Jundiaí, Brasil.

### RESUMEN

El sector minero es uno de los principales motores económicos de México, su desarrollo genera beneficios sociales como lo es la generación de empleos y de inversión atrayendo empresas constructoras de gran envergadura en el sector. El aporte en generación de divisas en México por parte del sector minero se ubica comúnmente en el cuarto puesto remarcando notablemente su participación en el Producto Interno Bruto principalmente en 24 de los 32 estados de la República Mexicana donde existe un rico potencial minero.

Dicho lo anterior, es necesario mantener siempre en operación todas las áreas involucradas en el proceso minero por más simples que éstas parezcan. Caso particular se tuvo en la mina polimetálica Rey de Plata ubicada en el estado de Guerrero cuyo proyecto aportará 4.7 millones de onzas de plata, aquí se tenía el problema en la plantas de beneficio donde se procesa el material extraído de la zona de mineralización, éstas sufrieron erosión superficial de sus taludes debido principalmente a los agentes naturales extremos de agua y viento que poco a poco robaron material fino y propiciaron la formación de trayectorias preferenciales (surcos).

La solución empleada para contrarrestar este proceso erosivo refiere al trabajo de un geocompuesto tridimensional de alta flexibilidad que presenta más de 90% de vacíos en conjunto con anclajes de barras de acero las cuales se colocan en forma de tresbolillo para garantizar la adecuada fijación a la cara del talud. Posteriormente el sistema beneficiará el crecimiento de la vegetación y con ello una estabilización superficial con anclaje natural por medio de raíces.

Palabras claves: Minería, Control de erosión, Geocompuesto, Talud.

### ABSTRACT

The mining sector is one of the main economic engines of Mexico, its development generates social benefits such as the generation of jobs and investment attracting construction important companies. This sector contributes substantially on the Gross Domestic Product being the fourth item, with the contribution of twenty-four of the thirty-two states of the Mexican Republic with the richer mining potential.

Due to this importance of the mining economy, it is necessary to always keep all the areas involved in the mining process in operation. A specific case was the "Rey de Plata" polymetallic mine project, located in the state of Guerrero (Mexico), that will provide 4.7 million ounces of silver per year. The problem was affecting the slopes of the beneficiation plants, where the product extracted from the mineralization zone is processed. These slopes suffered superficial erosion mainly due to extreme natural agents as water and wind that little by little stole fine material and favored the formation of preferential trajectories (furrows).

The solution used to counteract this erosive process involve the use of a high-flexibility three-dimensional geocomposite that presents more than 90% of voids in conjunction with anchors of steel bars which are placed in a staggered pattern to ensure proper fixation to the superficial part of the slope. Later the system will benefit the natural growth of the vegetation and a superficial stabilization through the anchoring of grass and plant roots.

Keywords: Mining, Erosion control, Geocomposite, Slope.

## 1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de suelos reforzados o protegidos por elementos naturales no es reciente si no que se ejerce desde tiempos muy atrás incluso desde antes de cristo como lo fue la muralla China, construida en el año 2,000 A.C. la cual poseía bloques con secciones de arcilla y grava reforzada con fibras naturales como lo es el trigo; esta combinación de arcilla y tiras de trigo también fue utilizada para revestir sus taludes y brindarles una capa más resistente contra la intemperie. Por su parte, el impero romano utilizaba material vegetal como estibas de junco, bambú, troncos de árboles y paja para sus edificaciones y vías de comunicación reforzando su superficie de rodamiento, así como los pequeños terraplenes formados en zonas de topografía abrupta.

Tomando como referencia lo que rudimentariamente se utilizaba, surgieron elementos más resistentes y durables como son los geosintéticos los cuales según la ASTM D4439 son productos planares fabricados a partir de material polimérico utilizado junto al suelo, roca, tierra u otro material relacionado con la ingeniería geotécnica como parte integrante de un proyecto o un sistema desarrollado por el hombre. Por su parte Suárez, 2001 los define como productos de ingeniería los cuales en su mayoría se fabrican en rollos y se utilizan en obras en contacto con suelo.

Dentro del mundo de los geosintéticos se encuentran las geomantas tridimensionales antierosivas reforzadas las cuales son fabricadas a partir de filamentos poliméricos fundidos en todos los puntos de contacto; presentan elevada flexibilidad, son tridimensionales y presentan más del 90% de vacíos lo que favorece al reposo de suelo fino entre estos vacíos lo que al final del día se transforma en zonas adecuadamente vegetadas que protegen superficialmente a los taludes contra los embates ambientales de lluvia y aire. Gracias a su configuración de creación, estas geomantas se pueden considerar como soluciones permanentes ya que se ha demostrado que las fibras poliméricas son generalmente resistentes al ataque químico con excepción de ambientes extremadamente agresivos (Geotechnical engineering office, 1993), además que estas soluciones deben de estar cubiertos con una pequeña capa de material orgánico el cual se va acumulando de manera natural por reposo de suelo fino que es arrastrado por el aire.

El efecto culminante en la implementación de un geosintético antierosión sobre un talud es que se genere la fusión entre la vegetación, la geomanta y el suelo del talud ya que este conjunto representa la mejor protección contra los embates erosivos. Las observaciones de los taludes naturales muestran que estos son más estables con vegetación que sin ella. Otro beneficio observado en este tipo de soluciones es que la vegetación es multifuncional, se auto repara, es visualmente atractiva y no requiere generalmente, de equipos pesados o complejos para su instalación.

En toda obra siempre es importante tener cuidado en el desarrollo de esta y para el caso de la protección de taludes con fines de vegetación no es la excepción, ya que la utilización de elementos vivos en ingeniería civil es más difícil de manejar que las obras de concreto o tierra, debido a que se tiene menos experiencia en ellas, y no existen modelos matemáticos precisos para su análisis. En este sentido, la vegetación implantada sobre taludes debe de considerarse como un material de ingeniería, y por lo tanto se debe establecer especificaciones consistentes y monitoreable que permitan verificar la calidad de ejecución de obra y del desarrollo de la vegetación.

## 2. ANTECEDENTES

La erosión es un proceso en el cual se presentan principalmente tres etapas, la primera es el desprendimiento de suelo o roca, esta etapa ocurre después de la acción del viento o agua, la manera en que estos agentes naturales impactan al terreno provoca paulatinamente surcos de dimensiones pequeñas las cuales se transforman en grandes cavidades si no se atienden oportunamente. La segunda etapa es el transporte de partículas de suelo, una vez que el material está separado del resto de la masa de suelo su transporte es mucho más fácil, el recorrido dependerá de las condiciones locales principalmente por lo accidentado de la topografía, los obstáculos físicos o la abundancia de vegetación presente en su recorrido normal en la pendiente descendente. Relacionada a la etapa dos, la etapa tres comprende el depósito de dicho suelo en movimiento, se estima que del total de erosión que se produce en el mundo cerca de un 25 al 30 por ciento es transportado hasta el mar y el 70 por ciento restante se deposita a lo largo de su trayectoria principalmente en canales de ríos, lagos y embalses los cuales provocan reducción de áreas hidráulicas y por ende planos de inundación (Suárez, 2001).

Las zonas que por lo general sufren mayores pérdidas por erosión son aquellas que presentan pendientes altas, climas secos, fuertes vientos y lluvias intensas. En este sentido, podemos tener áreas propensas a erosionarse como lo son las no habitables, zonas naturales ocupadas por los hombres y zonas artificiales construidas por el hombre como lo es el caso de la formación de terraplenes necesarios para alcanzar rasantes de caminos o para logra niveles de desplantes para zonas aprovechables como es el presente caso en una zona minera donde se necesita suelo para conformar la plataforma de la planta de beneficio (erosión laminar en surcos) donde se lleva a cabo un proceso indispensable de selección de elementos aprovechables y elementos residuales. Con base al principio antes descrito, la Figura 1 nos muestra las etapas del proceso erosivo desde el desprendimiento de las partículas hasta su sedimentación en el mar.

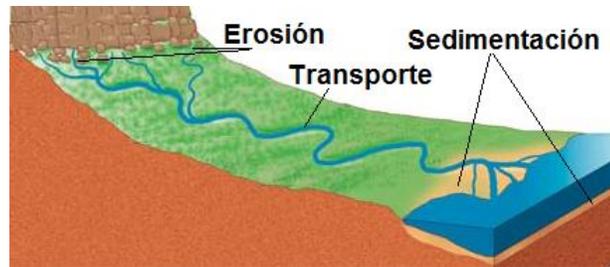


Figura 1. Trayectoria del proceso de erosión (Suárez, 2001).

Se conocen varias variables que participan en el proceso erosivo de un suelo, en este caso se mencionaran dos ecuaciones que describen algunas de ellas, la ilustrada en la Ecuación 1 es la indicada según Ayres (1960).

$$E = f(R, G, S, V) \quad [1]$$

E = Rata de erosión

R = Factor que depende de la cantidad e intensidad de la lluvia.

G = Factor que depende de la pendiente y topografía del terreno.

S = Factor que depende de las propiedades físicas y químicas del suelo.

V = Factor que depende de las características de la cobertura vegetal.

Por su parte, la Ecuación 2 es conocida como Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) (Wischmeier y Smith 1965, 1978).

$$A = R, K, LS, C, P \quad [2]$$

A = Tasa de erosión anual (ton/ha.año).

R = Factor de erosividad de la lluvia (MJ.mm/ha.h).

K = Factor de erodabilidad del suelo (ton.h/MJ.mm).

LS = Factor topográfico longitud-pendiente.

C = Factor de vegetación y cultivo.

P = Factor de prácticas de conservación.

De la Ecuación 2 se puede apreciar que la mayoría de las variables son conocidas a excepción del factor K el cual indica el grado de susceptibilidad o resistencia de un horizonte específico del suelo a la erosión. La erodabilidad del suelo es una propiedad compleja y se concibe como la facilidad con la cual es desprendido por: 1) el salpicado de las gotas durante un evento de lluvia, 2) el flujo superficial o 3) por la acción de ambos fenómenos. Sin embargo, desde el punto de vista cuantitativo, la erodabilidad del suelo puede entenderse como el cambio en la pérdida de suelo por unidad de fuerza o energía externa aplicada (Montes, 2002).

Como se pudo observar, la variable lluvia es de gran importancia por ello merece ser mencionada con más detalle ya que junto con la variable viento son los dos fenómenos que más influyen en la erosión.

### 2.1. Erosión por agua

El agua es un elemento natural que siempre está en continuo movimiento, inicia en las nubes como vapor de agua, posteriormente la precipitación en forma de lluvia, granizo o nieve, la infiltración, la evapotranspiración, la escorrentía superficial, las corrientes subterráneas, los acuíferos, los ríos, los lagos y culmina en los mares, este proceso es cíclico y se le conoce como ciclo hidrológico. Para el caso que puntualmente nos atañe, la Figura 2 representa el proceso de erosión de suelos iniciando con la precipitación, la generación de surcos, posteriormente cárcavas y finalmente culmina en canales.

En esta dirección, se deben de conocer algunos aspectos relacionados con la precipitación del lugar en estudio (por mencionar algunos):

- Promedio de lluvia acumulada anual.
- Distribución promedio de lluvias a lo largo del año, periodos lluviosos y periodos secos.
- Lluvias máximas históricas en 24 horas y frecuencia de ocurrencia de grandes lluvias en 24 horas.
- Intensidad y duración máxima histórica de lluvia / hora y frecuencia de ocurrencia.

- Duración y volumen total de lluvia de la tormenta de diseño.
- Hietograma de intensidad de la lluvia con el tiempo para la lluvia de diseño.
- Curvas intensidad – duración – frecuencia.

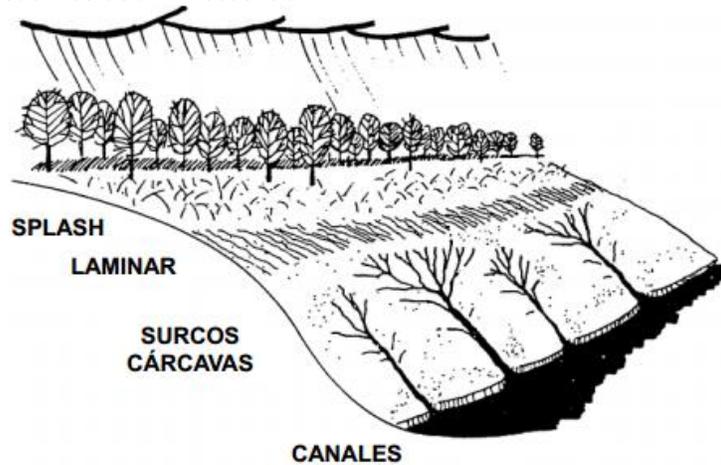


Figura 2. Ciclo hidrológico erosivo en taludes (Dunne y Leopold, 1978).

La erosión por golpeo de la lluvia (Splash) ocurre por el impacto de las gotas sobre una superficie desprotegida, el cual produce el desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo (Ver Figura 3).

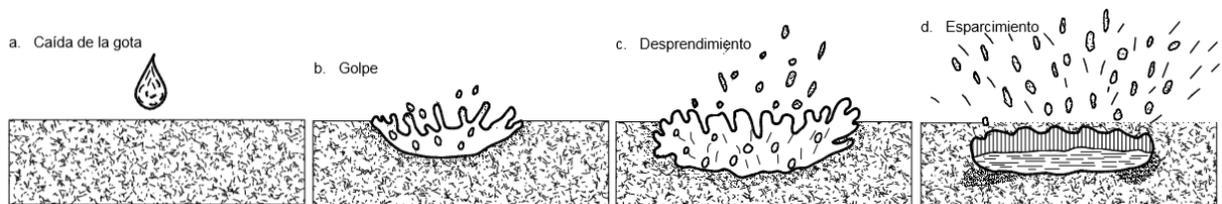


Figura 3. Erosión por golpeo de una gota de lluvia (Wischmeier y Smith, 1965).

Al caer una gota de lluvia levanta partículas del suelo y las reparte en un área de aproximadamente un metro cuadrado. Parte de la lluvia se infiltra y parte fluye sobre la superficie.

En un suelo sin protección vegetal se calculan hasta cincuenta metros cúbicos de suelo removido por hectárea en una lluvia fuerte de una hora de duración.

La erosión causada por la lluvia está determinada por la cantidad, intensidad y duración, de aquí que el tamaño de las partículas de lluvia varía de 0.5 a 5 mm de diámetro, de acuerdo con la intensidad de la lluvia. Durante una lluvia las gotas son de diferente tamaño tal cual lo muestra la Figura 4.

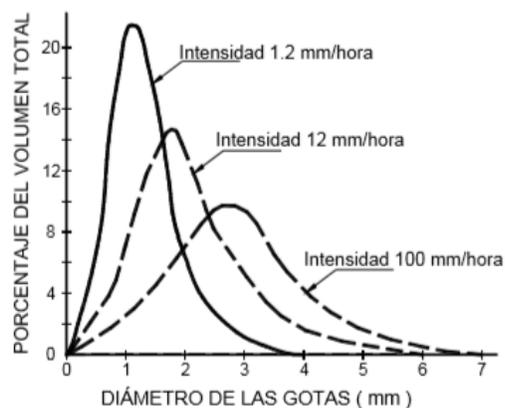


Figura 4. Distribución de las gotas en una lluvia (Wischmeier y Smith, 1965).

La velocidad de las gotas varía generalmente de 3 a 10 metros por segundo, Atlas y Ulbrich (1987) sugieren la Ecuación 3 para su cálculo.

$$V_t = 3.86d_r^{0.67} \quad [3]$$

$V_t$  = Velocidad en metros/segundo  
 $d_r$  = Diámetro en milímetros

Con el tamaño y la velocidad de las gotas puede calcularse la energía cinética, la cual es generalmente superior a la de una escorrentía normal. Wischmeier y Smith (1965) calcularon la energía cinética dependiendo del tamaño o masa de las partículas de agua y su velocidad (Ecuación 4).

$$K_e = 916 + 330\log_{10}i \quad [4]$$

$i$  = Intensidad de la lluvia en pulgadas/hora  
 $K_e$  = Energía cinética de la lluvia en pie – Ton por acre – pulgada de lluvia

Aparte de la precipitación ya mencionada, el tema de la escorrentía se debe de tomar en cuenta, El camino y el tiempo que toma el agua desde que cae en forma de lluvia hasta que llega a su destino final (canal, río o mar) depende en mayor medida a la topografía, pero no debemos subestimar la cobertura vegetal y el tipo de suelo ya que esto cambiara considerablemente el proceso de erosión y sedimentación.

La magnitud de los caudales de escorrentía puede ser determinada referenciándose al hidrograma unitario; sin embargo, esta metodología no es recomendado para áreas pequeñas por lo que para este caso se recomienda el Método Racional, el cual es práctico y presenta resultados satisfactorios.

No menos importante tenemos la infiltración la cual se da de manera variable según el tipo de suelo, el agua en exceso que no puede infiltrarse se queda en la superficie para comenzar el proceso de escorrentía superficial (erosión laminar), las magnitudes y velocidades de este proceso estarán relacionadas con la capacidad del suelo para infiltrar agua, tipo y magnitud de vegetación y pendiente del terreno (Figura 5). Las arenas y las grava poseen una capacidad mayor de infiltración por lo que su saturación resulta en un periodo mucho más largo que el medido por suelos arcillosos los cuales son más impermeables y permiten una escorrentía mucho más abundante y de mayor velocidad.

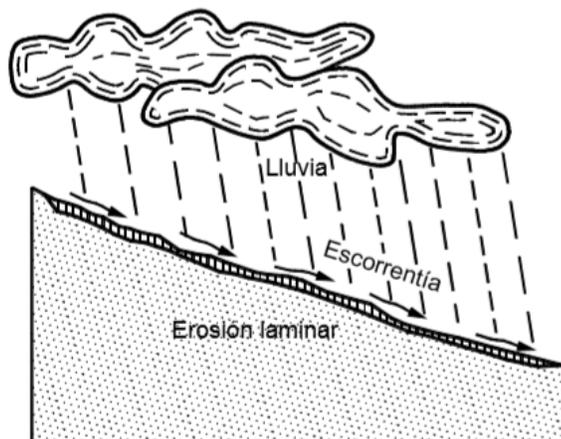


Figura 5. Proceso de erosión laminar en taludes (Wischmeier y Smith, 1965).

Como última etapa del proceso hidrológico erosivo, tenemos la generación de surcos o cárcavas las cuales ocurren cuando el flujo superficial empieza a concentrarse sobre la superficie del terreno, debido a la irregularidad natural de la superficie. Inicialmente, los pequeños canales presentan una forma en V la cual pasa a formar en U tal cual lo muestra la Figura 6.



Figura 6. Proceso de formación de surcos y cárcavas (Schwab et al, 1981).

Según Schwab *et al* (1981), la erosión en surcos es la causante del mayor porcentaje de producción de sedimentos sobre la superficie de la tierra. Si los canales de erosión tienen profundidades de menos de 30 centímetros se les califica como surcos y si la profundidad es mayor serán cárcavas.

Los suelos más susceptibles a formación de surcos son los suelos expuestos al agua sin cobertura vegetal alguna, entre mayor sea la cobertura vegetal superficial, la formación de surcos disminuye.

La lluvia es entonces la fuente más importante de erosión, medida en volumen de suelo desprendido. Para el control de la erosión por gotas de lluvia es necesario garantizar la cobertura vegetal lo cual se puede lograr mediante la utilización de una geomanta tridimensional reforzada que evita el impacto directo de las gotas.

## 2.2 Erosión por viento

La erosión por viento ocurre cuando los suelos sin o con poca vegetación son expuestos a altas velocidades del viento. Cuando la velocidad del viento genera una fuerza tractiva superior a las fuerzas gravitacionales y cohesivas de las partículas del suelo, el viento desprende las partículas y las transporta en suspensión. Las partículas de menor tamaño (0.1 a 0.5mm) son movidas por el viento en una forma de saltos o brinco. Las partículas gruesas se mueven rodando y las finas son transportadas en suspensión (Figura 7). La acción más visible es la suspensión en la cual se puede observar tormentas de polvo.

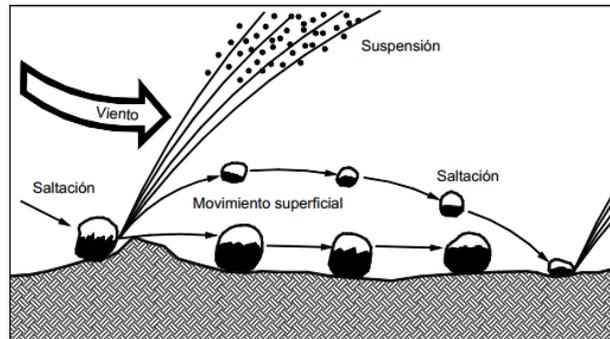


Figura 7. Mecanismos de erosión por acción del viento (Gray y Sotir, 1996).

La erosión por viento es muy común en áreas de baja precipitación pluvial (menos de 375 mm / año) con suelos arenosos y bajos niveles de materia orgánica, estas últimas características son las que rigen en el material conformado de terraplenes para las plantas de beneficio utilizadas en el sector minero.

Otro ejemplo de erosión por viento es el presentado en los desiertos en la generación de dunas, estas se van formando por la sedimentación de las partículas transportadas por el viento. Las dunas generalmente están alineadas con la dirección principal del viento y tienen una forma de U en la sección inferior de la duna, generando una especie de embudo para el viento, aumentando su velocidad.

La longitud y la pendiente de los taludes tiene poca importancia en el caso de la erosión por viento. Los factores más importantes son la humedad y la temperatura. Solamente los suelos secos son susceptibles a erosión por viento.

Al igual que el proceso erosivo por agua, existen tres fases distintas de erosión por viento.

1. Desprendimiento.

El movimiento del suelo por acción del viento es un resultado de la turbulencia de la velocidad. Para la mayoría de los suelos la velocidad de inicio de movimiento es de aproximadamente 20 km/h a una altura de 30 centímetros por encima de la superficie (Gray y Sotir, 1996).

2. Transporte.

La velocidad para el transporte es menor que la necesaria para el desprendimiento. La mayor parte de las partículas del suelo se transportan cerca de la superficie de la tierra a una altura no mayor a 1.0m. Aproximadamente del 62 al 97 por ciento del total de las partículas es transportado en esta zona cerca de la superficie (Gray y Sotir, 1996). Este hecho sugiere la necesidad de instalar controles de erosión en la superficie del suelo a proteger lo cual se puede realizar por medio de geomantas tridimensionales reforzadas las cuales

favorecen el crecimiento de la vegetación y con ello impide el movimiento de las partículas (reducir la erosión superficial).

### 3. Depositación.

Al disminuir la velocidad del viento o al encontrarse las partículas con una barrera estas caen o se sedimentan por acción de las fuerzas de gravedad.

#### 2.3 Falla en taludes o terraplenes causada por la erosión pluvial y de viento

El proceso de saturación y ascenso del nivel freático puede determinar el mecanismo de falla de un talud por efecto de lluvia. El agua infiltrada puede inestabilizar el talud de dos formas diferentes: eliminación de tensiones negativas y ascenso del nivel freático, para el presente caso nos enfocaremos a la primer acción.

Al avanzar el frente húmedo por efecto de la infiltración, se eliminan las tensiones negativas y la cohesión aparente. La eliminación de las tensiones negativas ocurre de arriba hacia abajo y alcanza una determinada profundidad dependiendo de la intensidad y duración de la lluvia, de la conductividad hidráulica (permeabilidad) y de la profundidad del perfil permeable (Figura 8).

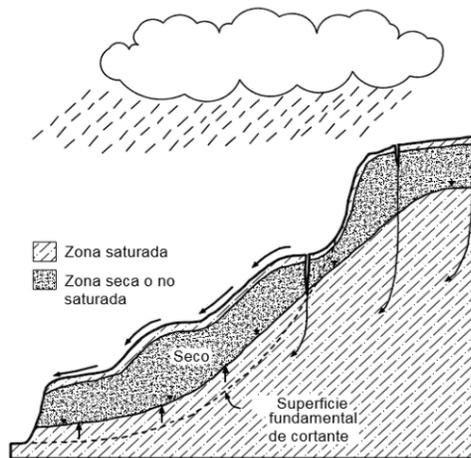


Figura 8. Diagrama conceptual del proceso de saturación en el deslizamiento de La Cinchita en 2005 (Jibson, 2006).

En British Columbia (Cánada), Church y Miles (1987) encontraron que una lluvia antecedente en 24 horas de 50 a 150 mm no es suficiente criterio para determinar la falla de un talud y que el factor más importante es la intensidad de la lluvia superior a 20 mm/hora. Este es el caso de los rellenos estructurales los cuales están formados de material areno limoso los cuales son muy susceptibles a fallar por la intensidad de la lluvia que se presentan en zonas montañosas.

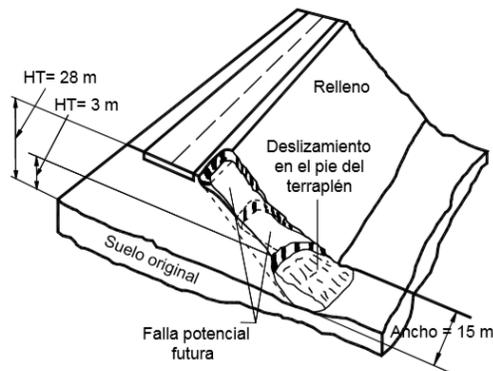


Figura 9. Falla por saturación subsuperficial del terraplén en el momento de mayor intensa y duración (Miles et al, 1987).

De la Figura 9 se puede afirmar que, en los suelos o formaciones permeables, la intensidad de la lluvia es un factor importante, mientras que en los suelos arcillosos la intensidad no es un factor relevante.

3. CASO PRACTICO, CONTROL DE EROSIÓN A BASE DE GEOCOMPUESTO TRIDIMENSIONAL EN PLANTA DE BENEFICIO EN LA MINA POLIMETÁLICA REY DE PLATA.

En la naturaleza son muy escasos los metales puros o nativos por lo que ocasionalmente se hallaran concentraciones de ellos. La mayoría de los metales se encuentran asociados químicamente con otros elementos formando compuestos conocidos como minerales los cuales deben ser extraídos de sus menas, refinarlos y prepararlos para su uso. El proceso consiste en modificar la naturaleza química de los minerales para separar el metal de sus compuestos sulfúricos, óxidos, silicatos o carbonatos; Para todo lo anterior es necesario contar con un espacio físico que nos permite realizar fervorosamente estos procesos, a dicha área se le conoce como “planta de beneficio o refinamiento” que básicamente es donde se llevan a cabo los proceso por los cuales se separa la mena y la ganga. Los procesos que se pueden llevar a cabo en esta área es el lavado del mineral, triturado, molienda, homogenización, clasificación y finalmente el concentrado en seco para fundición (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

Conociendo lo anterior, la Figura 10 nos muestra la sección tipo de uno de los taludes generado para poder construir la plataforma donde se cimentará la planta de beneficio para el caso de la minera Rey de Plata (Capela).

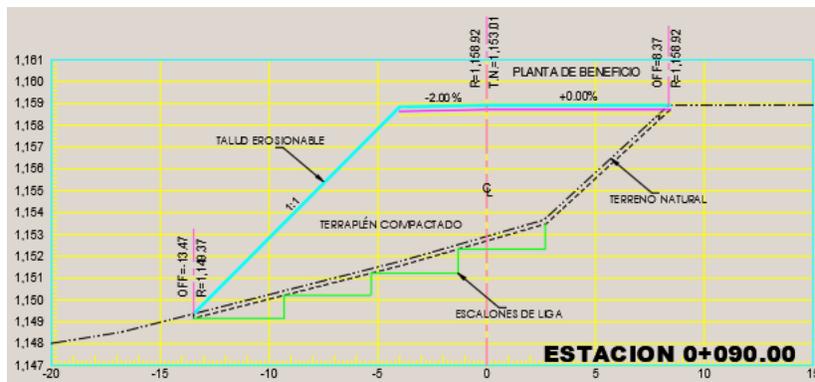


Figura 10. Sección tipo de talud erosionable en Estación 0+090.00 (Elaboración Propia)

Considerando las variables que intervienen en los proceso erosivos tanto por acciones de agua como de viento, el paso siguiente fue la elección del material adecuado para contrarrestar la erosión de los taludes de la planta de beneficio; En este sentido y tomando en cuenta las grandes precipitaciones que se presentan en la zona montañosa de Telloapán Guerrero punto preciso de ubicación de la mina, se optó por colocar una geomanta antierosiva reforzada fabricada a partir de filamentos poliméricos fundidos en todos los puntos de contacto con una resistencia a la tensión longitudinal de 4kN/m; Gracias a su flexibilidad y forma tridimensional esta manta presenta más del 90% de vacíos los cuales a la postre se llenarán de suelo fino que favorecerá la creación de vegetación la que se fusionará de buena manera al suelo del talud; Así pues, lograremos una estructura resistente formada por la fuerza de la manta y el anclaje natural de la vegetación en el talud (Figura 11).



Figura 11. Geomanta antierosiva reforzada (Izquierda) fusionada con la vegetación (Derecha) (Maccaferri 2019).

El proceso constructivo de la geomanta es muy sencillo y está limitado únicamente por la inclinación del talud, ya que entre mayor sea su ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, la demanda de grapas (alambrón o estacas de

madera) para mantener unida la manta al suelo será mayor. Para el caso que nos atañe, la inclinación mínima encontrada fue de taludes 2:1 incrementándose hasta taludes de 1:1 lo que nos demandaba colocar grapas en la cara del talud a una separación no mayor de 1m de distancia entre ellas con una formación en tres bolillo; La longitud de las grapas varia de entre 15 a 30cm de longitud dependiendo de la dureza del suelo, para el presente caso fueron necesarias grapas con longitud promedio de 30cm pero en ocasiones estas distancias subieron hasta 50cm ya que el suelo del talud era muy blando y ante todo se debe de garantizar la correcta sujeción de la manta al talud (Figura 12).

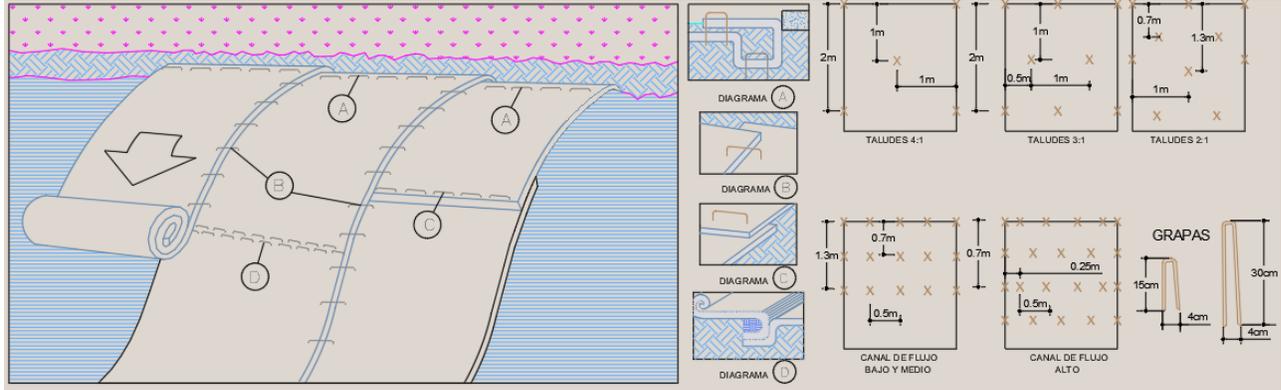


Figura 12. Distribución, colocación y dimensiones de grapas para fijación de geomanta (Elaboración Propia).

Adicional a las grapas, se colocó una trinchera de sujeción en la parte superior de los taludes, esta ayudará a mantener la geomanta en su posición para que posteriormente se coloquen las grapas sin ningún problema; Esta trinchera debe de contar con una longitud de desarrollo de 1.2m con un empotre en trinchera mínimo de 30cm, posterior a ello la trinchera deberá ser llenada y compactada con material producto de la excavación. Para lograr una continuidad de la solución, es necesario realizar traslapes mínimos entre paños de rollos extendidos, esta distancia no deberá de ser menor a 10cm tal cual se puede apreciar en la Figura 13.

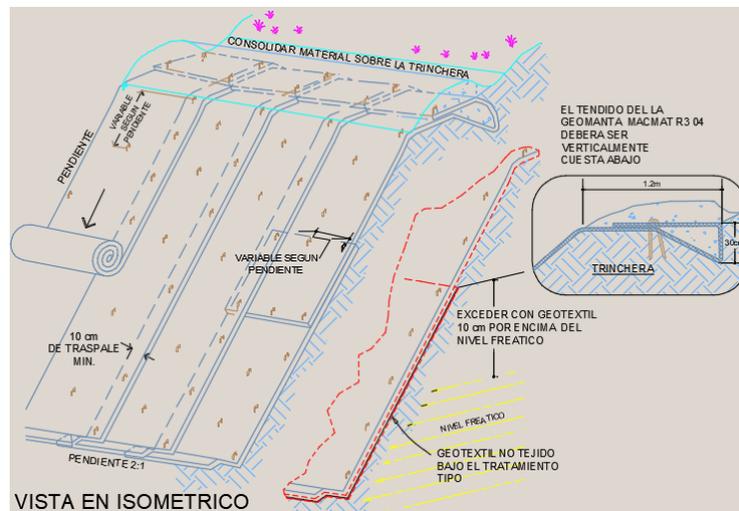


Figura 13. Detalles de anclaje superficial y tendido de la geomanta sobre el talud (Elaboración Propia).

Conociendo el material indicado para controlar la erosión, así como el proceso constructivo para su correcta ejecución, la Figura 14 nos muestra la cara frontal (superior derecha) y posterior (inferior derecha) de la planta de beneficio a proteger; Por su parte la imagen superior derecha representa a una de las trincheras de sujeción en la parte superior del talud, donde se puede apreciar que aún falta hacer la compactación del suelo de relleno, en este caso se le metió un suelo-cemento ya que no se tenía mucho espacio de anclaje y su peso volumétrico es mayor que el suelo natural. La imagen inferior derecha esquematiza el tendido de la manta por rollos a lo largo de la cara del talud faltando solamente la colocación de las grapas que fijaran a la geomanta y las irregularidades del terraplén logrando así una fusión de mejor calidad y evitando fugas de finos en los lugares donde la malla pudiera quedar despegada del suelo.



Figura 14. Taludes erosionados a la izquierda e instalación de la geomanta sobre el terraplén a la derecha (Capela).

Finalmente la Figura 15 nos muestra la cara frontal de la planta de beneficio la cual se encuentra totalmente protegida por la geomanta tridimensional, esta vista es la que se tiene inmediatamente después de la colocación de la manta, posteriormente esta misma área se encontrara con un gran desarrollo de vegetación la cual además de darle una vista agradable nos dará seguridad de saber que tenemos un refuerzo superficial a lo largo del talud gracias a la fusión de las raíces de la vegetación con los vacíos de la manta tridimensional y estos dos elementos sujetos de manera natural (raíces) y artificial (grapapas) a la cara del talud. Los impactos ambientales debemos de reducirlos en lo más que podamos por ello en la instalación de este tipo de solución, no es necesario extraer o cortar la vegetación existente tal como se puede apreciar en la imagen derecha, un pequeño tronco el cual se convertirá en un frondoso árbol que desde su punto de existencia aportará a la reducción del calentamiento global tal cual lo hará toda la vegetación formada sobre la manta



Figura 15. Culminación de instalación de geomanta tridimensional en taludes de planta de beneficio (Capela).

#### 4. CONCLUSIONES

El mundo ha experimentado un incremento notable en la frecuencia e intensidad de los fenómenos naturales (lluvia y viento) dichos eventos se dan y se seguirán presentando a lo largo del tiempo por lo que las obras civiles deben estar cada vez más protegidas para enfrentar estos embates de los cuales se debe de pensar en prevenir y no remediar. Los taludes expuestos ya sean naturales o artificiales (planta de beneficio en la minería) resultan seriamente dañados por estos embates por lo que la importancia de las obras que están sobre ellos demanda que se protejan adecuadamente contra la erosión evitando inicialmente las fallas locales que pueden transformarse en fallas críticas globales.

La geomanta tridimensional reforzada ha mostrado grandes aptitudes tanto físicas como químicas para controlar la pérdida de suelo que se tienen en taludes mineros como lo es el de la planta de beneficio en Capela, la ventaja de favorecer la vegetación entre sus elementos termofusionados brindar un aporte estético, pero sobre todo ambiental lo cual es importante y más aún necesario en estos tiempos para poder aportar positivamente en el fenómeno de cambio climático.

La posible falla superficial de los taludes de la planta de beneficio de la minera Rey de Plata (Capela) estarán controlados de manera artificial por la resistencia aportada de los filamentos de la geomanta tridimensional, pero con un gran aporte natural debido a la fusión que esta ejerce con el anclaje propio de la vegetación por medio de sus raíces.

El control de erosión en taludes por medio de geomantas trabajando en conjunto con la vegetación nativa presenta un gran potencial para el resguardo de todas las obras que se desplantan sobre declives naturales (laderas) o artificiales (terraplenes), de aquí la importancia de poder enfocar cada vez más temas de investigación que fructifiquen matemáticamente lo que el día de hoy poco se tiene. El favorecimiento de un armado estructural que beneficie la vegetación en taludes debe considerarse como una verdadera rama de la ingeniería para que de esta manera se multiplique su conocimiento y se exponencie su implementación en todas las obras que así lo requieran.

#### REFERENCIAS

- Atlas D., Ulbrich (1987), "*Path and Area-Integrated rainfall measurement by Microwave attenuation in the 1-3 cm band*" Journal of applied meteorology. Vol. 16, pp. 1322-1331.
- ASTM D4439-20, *Standard Terminology for Geosynthetics*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- Ayres Q.C. (1960), "La erosión de suelo y su control". Ediciones Omega S.A. Barcelona. Church, M. y Miles J.M. (1987). "Meteorological antecedents to debris flows in south western British Columbia: some case study". Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology*, VII: 63 – 79.
- Dunne T., Leopold L.B. (1978), "Water in environmental planning" Freeman, San Francisco. MONTES, L.M.A.L. Predicción de la erosión hídrica para la elaboración de planes de conservación de suelos a nivel cuenca. Tesis de Grado Maestría. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro, México, 2002.
- Geotechnical engineering office (1993) "*Review of granular and geotextil filters*". Civil engineering department Hong Kong. Geo publication No. 1/93. P.141.
- Gray D. H., Sotir R.B. (1996), "*Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization*". John Wiley & Sons. P.378,
- Jibson R. W. (2006). "The 2005 La Conchita, California, Landslide". *Landslides* (2006) 3: pp. 73–78.
- Schwab G.O., R, K. Frevert, T.W. Edminster and K. K. Barnes (1981), "*Soil and Water Conservation Engineering*", 3a. ed. John Wiley & Sons.
- Servicio Geológico Mexicano (2017), Beneficio y transformación de minerales.
- Suárez Díaz J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. ISBN 958-33-2734-4. División editorial y de publicaciones Universidad Industrial de Santander. Librería UIS. Bucaramanga, Colombia.
- Wischmeier W. H., Smith D.D. (1965) "*Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation*", Department of agriculture, Washington, DC. Agriculture handbook No. 282.
- Wischmeier W. H., Smith D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Department of agriculture, Washington, DC., Agriculture handbook. No. 537.