

" EL USO DE CAL EN EL DISEÑO DE RELLENOS DE TIERRAS PARA DISPOSICION DE --  
DESPERDICIOS "

Por Philips G. Malone y James -  
H. May.

Resumen: La cal y los productos conteniendo cal han sido ampliamente usados en rellenos Sanitarios. Se exponen ejemplos del uso de la cal en recubrimientos, desechos y planchas de relleno. La cal puede proveer una valiosa barrera química para el transporte de contaminantes específicos. Los cementantes de cal-puzolana puede usarse para mejorar el manejo de desechos y reducir la compactación del de secho. Las mezclas de cal-suelo puede emplearse como revestidores químico-reactivos impermeables.

Introducción: La cal (hidróxido de calcio) y materiales de cal revueltos han tenido por largo tiempo un importante papel en la disposición de desechos, por que pueden ser usados a bajo costo para neutralizar la acidez y controlar el pH de los materiales silicosos, finamente divididos, para producir cementantes que unan partículas de desecho para mejorar el manejo o ayudar a aislar compuestos potencialmente tóxicos, rodeándolos con un complejo inerte de silicatos de calcio. La cal sin apagar, o cal viva, puede usarse para remover agua de los desechos semi sólidos, y mejorando sus características de manejo.

El propósito de este trabajo es revisar y evaluar las aplicaciones de la cal en los proyectos de rellenos de tierras, tal como son reportados en la literatura técnica y de ingeniería, y discutir cómo los productos de cal y las mezclas de de sechos/cal pueden usarse ventajosamente en los entierros de desperdicios sólidos. La cal es una familia de productos que pueden ser usados mejor cuando la ingeniería de diseño de una área para disposición toma ventaja de las diferentes propiedades de los distintos productos y mezclas de cal, para producir las condiciones químicas y físicas que favorecen la reducción del desecho.

Tipo de cal: Se ha discutido mucho sobre el uso de la cal en el tratamiento y disposición de desechos, incluyendo todos los productos de cal como un sólo material, o diferenciando sólo entre cal viva y cal hidratada, o discusiones sobre los materiales de desecho conteniendo cal como si fueran productos de cal. Muchos productos de cal y sub-productos se comportan en forma diferente, y es importante hacer distinciones en el tipo de material empleado. La tabla 1 enlista los principales productos, sub-productos y desperdicios empleados en el tratamiento de desechos, y el resumen de sus propiedades. Muchos de los sub-productos y productos de desecho están probablemente definidos; y el uso de esos materiales en lugar de la cal, muchas veces requiere que los sub-productos sean analizados sobre la base de lote por lote, para asegurarse que hay suficiente cal aprovechable para producir la neutralización o cementación que se desea.

Tipo de Desechos: Las leyes actuales reconocen dos niveles de operaciones de disposición de desechos en tierras: las de desperdicios peligrosos, y las de desechos no peligrosos (3). Los desechos peligrosos están definidos como:

- 1) Derivados de un proceso industrial conocido por producir residuos tóxicos o peligrosos.
- 2) Que contengan una sustancia clasificada como definitivamente tóxica
- 3) Que se crea que puede ser tóxica, sobre la base de pruebas que demuestran que el desecho muestra alguna característica peligrosa como toxicidad, reactiva o corrosividad.

Todo desecho que sean peligroso sólo puede ser colocado en rellenos de tierra - especialmente diseñados, que incluyen reservas para el contenido de efluentes - en el desecho, y tengan materiales de recubrimiento que puedan minimizar el ---

movimiento de la humedad dentro del desecho. Asimismo, se requiere un estricto programa de monitoreo de aguas freáticas en cualquier relleno de tierras de desechos peligrosos. Dichos rellenos, actúan como almacenes soterrados de desechos industriales, y se asume que los rellenos de tierras de desechos peligrosos continuarán siendo peligrosos en un futuro indefinido.

Los desechos convencionales, los que no requieren de un manejo especial, también deben ser colocados en rellenos de tierras que estén diseñados para ofrecer protección para las aguas freáticas locales. Debido al menor riesgo, los requerimientos de contaminación a aplicar son menos estrictos y los esfuerzos de monitoreo son menos intensos, los rellenos de tierras de desechos convencionales, aceptan mucho del desperdicio biodegradable, como alimento, papel y basura casera. El desecho experimenta una descomposición o estabilización durante el enterramiento, y la naturaleza del desecho drenado a través del relleno de tierras cambia con el tiempo. La descomposición microbial de la barrera enterrada produce una mezcla de dióxido de carbón y gas metano, así como una variedad de productos de descomposición solubles en agua; ácidos orgánicos en su mayoría. Los metales en el relleno de tierras son conducidos dentro de la solución en el ácido de los efluentes y en los niveles de metales de éstos, provenientes de un relleno de tierras convencional.

El desecho en si mismo cambia durante la descomposición, volviéndose generalmente más denso y más compacto. La superficie del relleno de tierras, frecuentemente se asienta (más del 3-4% durante los primeros dos o tres años), conforme el desecho de abajo se va compactando. Las estructuras construidas sobre el relleno de tierras pueden verse afectadas durante este asentamiento, los cimientos pueden agrietarse y las lîmas de servicio público pueden romperse.

Los dos tipos más grandes de rellenos de tierras representan dos filosofías de disposición muy diferentes, y dos diseños con diferentes requerimientos.

El relleno de tierras de desechos peligrosos es un sitio enterrado a perpetuidad, con un total de contaminantes y no tiene un segundo uso para la tierra de encima. El relleno de tierra convencional es un sistema de descomposición activa que produce productos de descomposición en agua o gases dejados en el relleno. Después de que cesa la descomposición activa, frecuentemente es posible un uso secundario de relleno de tierras. La cal, debido a que puede ser usada para controlar la solubilidad de contaminantes potenciales, y puede tomar parte en reacciones cementantes, puede ser útil en los dos tipos de diseño de relleno de tierras.

Diseño de Rellenos de Tierras. Tanto los diseños de rellenos de tierra convencionales, como peligrosos, contienen tres componentes específicos (Fig. 1):

- 1) Un sistema revestidor desarrollado para <sup>ε</sup>prevenir que los contaminantes se muevan hacia dentro del suelo y a las aguas freáticas debajo del relleno.
- 2) El material de desecho compactado que sostiene la cubierta.
- 3) Un sistema de sobrecapa desarrollada para evitar la precipitación proveniente del movimiento dentro del desperdicio relleno.

Estos tres componentes básicos del relleno pueden ser mejorados llevando a cabo cuidadosamente los requerimientos. Por ejemplo, en muchos rellenos de tierras no es necesario hacer un revestidor completamente hermético, si el material del revestimiento puede hacerse para detener el movimiento contaminante, mientras se permita agua para el drenado del relleno. La cal debido a su capacidad para controlar el carácter químico del agua en contacto, ha sido valiosa en los tres componentes para el relleno de tierras.

TABLA 1 - CARACTERISTICAS DE LA MAYORIA DE PRODUCTOS DE CAL, Y PIEDRA CALIZA, Y SUB-PRODUCTOS

Reactivo	Fórmula Química o Compresión Aproximada	Densidad a Granel	pH Lechada
Cal viva alta en calcio	CaO	769-1121	10.5-12.4
Cal viva dolomítica	CaO·MgO	790-1400	9.0
Hidrato alto en calcio	Ca(OH) <sub>2</sub>	400-641	10.5-12.4
Hidrato dolomítico normal	Ca(OH) <sub>2</sub> ·MgO	400-560	9.0
Hidrato dolomítico presurizado	Ca(OH) <sub>2</sub> ·Mg(OH) <sub>2</sub>		
Piedra caliza alta en calcio	CaCO <sub>3</sub>	---	6.5
Piedra caliza dolomítica	CaCO <sub>3</sub> ·MgCO <sub>3</sub>	---	---*
Polvo de horno de cal	Generalmente 10-15% de cal---		Varía arriba de 12.4
Polvo de horno de cemento	Varía el contenido de cal ---		Varía arriba de 12.4
Cenizas volátiles **	Varía el contenido de cal --- con el tipo de carbón		Varía arriba de 12.4
Desperdicios	Varía el contenido de cal --- con su origen		Varía arriba de 12.4

\* No reactiva

\*\* Las cenizas volátiles pueden tener arriba de 2.4% de CaO(3) sin combinar.

Los recubrimientos alcalinos conteniendo capas de cal o piedra caliza han sido probados tanto para los rellenos de tierras convencionales, como peligrosos.

Los resultados iniciales indican que los metales tóxicos son precipitados y los desechos ácidos son neutralizados al pasar a través de una capa de cal o piedra caliza debajo del desecho.

Los investigadores Artiola y Fuller (4.5) hicieron investigaciones sobre el uso de la cal agrícola (carbonato de calcio) como una barrera Química debajo de un relleno de tierras convencional.

Los efluentes acidificadores filtrados dentro del agregado alcalino y los metales potencialmente tóxicos fueron precipitados en la capa caliza filtradora. La piedra caliza es un reactivo relativamente inefectivo para la neutralización de ácidos (2); pero la adición de cal hidratada mejora su actuación un recubrimiento del suelo con cal hidratada ha sido probado para usarse en contenidos de metales tóxicos provenientes de pilas de desecho de usuario (6). La prueba del recubrimiento fue hecha mezclando 5% (por peso) de cal hidratada finamente molida (malla 200), con arcilla arenosa local. Agua acidificadora, rica en metal proveniente de los depósitos de desechos de usuario fue pasada a través de la arcilla arenosa con, y sin, adición alcalina, la arcilla arenosa tuvo poca efectividad sobre la solución química. Después de pasar 17 partes por volumen de agua a través del suelo sin tratar, el total de contenido de sólidos disueltos (TSD) del efluente fué más alto que el líquido en el afluente. En contraste, el suelo corregido con cal, continuó reduciendo el TSD del efluente aún después de haber pasado también 17 partes por volumen de agua a través del suelo. La porosidad y permeabilidad del suelo corregido se redujo enormemente mediante la precipitación de contaminantes en espacios intergranulares en el suelo. Inicialmente el suelo encalado tuvo una permeabilidad de  $3.5 \times 10^{-6}$  cm/seg. después de pasar 20 partes por volumen de desecho ácidos la columna de permeabilidad disminuyó a  $4 \times 10^{-8}$  cm/seg. En contraste, el suelo sin tratar mostró una permeabilidad de aproximadamente  $3.5 \times 10^{-6}$  cm/seg. al inicio de la prueba, y las permeabilidades fluctuaron de ---

$4 \times 10^{-6}$  cm/seg. a  $1 \times 10^{-6}$  cm/seg! después de tener contacto con 24 volúmenes de desechos ácidos. El suelo reformado con cal, no sólo redujo la cantidad de líquidos pasando la capa de prueba (mediante reducir la permeabilidad), sino - que también se redujo el contenido de TSD, los rostros de metal y las concentra ciones radionucleicas en el desecho que se movió a través del revestimiento. El revestimiento corregido con cal fué considerado como un exitoso método para re ducir la descarga de contaminantes provenientes de las pilas de desechos ácidos.

La cal viva mezclada con suelos arcillosos se ha usado para producir recubrimientos de suelos duros e impermeables en tanques de almacenamiento, pequeñas represas de tierra y canales de irrigación (7). En 1972, un proyecto a gran escala - para el recubrimiento de un canal, se llevó a cabo usando suelos corregidos con cal viva. La cal viva fué mezclada con el suelo pesado arcilloso (usando 4% de  $\text{CaO}$ ), compactando el fondo y los lados del canal. La prueba consistió en tratar un tramo de 3.3 km de canal. La tierra compactada y tratada con cal viva probó- ser un revestimiento fuerte e impermeable. No se notaron mayores filtraciones o fallas en los taludes a lo largo de la sección del canal, conteniendo 5.7 metros de agua por 10 meses aproximadamente cada año.

Los revestimientos de cal-cenizas volátiles-agregados, también se han empleado -- con éxito en la construcción de represas para almacenaje de agua limpia. Típica-- mente, se trata de un revestimiento de 15 a 30 cm. de ancho, de cal, cenizas vo-- látiles y agregados que se mezclan en sitio y se compactan. La cal y las cenizas voladoras experimentan una reacción puzolánica, y el concreto resultante comun-- mente tiene mucho más resistencia compresiva que los revestimientos de cal-suelo.

Para un relleno de tierras de desechos peligroso se contruyó en la isla de ---- Flotzgron, Alemania (8). La superficie del suelo fué construida sobre la tabla- de agua y se usó una capa de 50 cm. de ancho de cal bajo la mayor parte del desecho. El desperdicio industrial se seleccionó cuidadosamente, para incluir una al ta proporción de materiales inorgánicos. Las aguas freáticas se mantuvieron fue- ra de los desechos, y cualquier descarga proveniente del desperdicio debía pasar

por debajo dentro del revestimiento con cal, donde cualquier ácido es neutralizado, y los metales pesados son precipitados y retenidos.

La Cal en los Rellenos de Tierras de Desechos: Frecuentemente, la cal se usa en el tratamiento de aguas, para precipitar los metales potencialmente tóxicos y neutralizar el ácido (2). La aplicación de cal para la precipitación de los metales requiere ajustar el pH, para producir la solubilidad más baja. La mayoría de los metales potencialmente tóxicos (como el cadmio, cromo, plomo y níquel) son anfóteros; esto es, que los hidróxidos de metal muestran una solubilidad que aumenta a un pH muy bajo o muy alto. La Figura 2 muestra la variación en solubilidad con el pH y los típicos rangos de pH alcanzados durante la neutralización con cal. La adición directa de cal al derecho puede ayudar a mantener un hidróxido de metal en el desperdicio, en un rango de pH que resulte en una baja solubilidad del hidróxido.

Crowley, Brown y Anderson (10) esbozaron técnicas para el uso de cal hidratada alta en calcio para el tratamiento de lodos ácidos y producir lodos aceptables para rellenos de tierras. La acción correctiva usando inyecciones de cal hidratada, que probaron ser muy efectivas para detener la contaminación de aguas -- freáticas, debajo y alrededor de los pozos de desechos ácidos. La neutralización de los lodos con cal se llevó a cabo para taponar la neutralización en dos pozos de disposición de ácidos, y en lodos para relleno de tierras. La lechada de cal fué bombeada directamente dentro de los desechos ácidos captados y mezclados usando aereadores. El pH de los desechos se elevó a 6.7.

Una vez que los depósitos de cal fueron llenados y tapados, se obtuvieron corazonas del suelo debajo del desecho. Este suelo tenía un pH tan bajo como 4.0. La inyección a alta presión de lechada de cal en hoyos a espacios cercanos --- (1.6 m uno de otro fué bombeada directamente dentro de los desechos ácidos captados y mezclados usando aereadores. El pH de los desechos se elevó a 6.7



Una vez que los depósitos de cal fueron llenados y tapados, se obtuvieron corazones del suelo debajo del desecho. Este suelo tenía un pH tan bajo como 4.0. La inyección a alta presión de lechada de cal en hoyos a espacios cercanos (1.6 m - uno de otro) fué utilizada para neutralizar los suelos contaminados con ácidos. - debajo del pozo cerrado.

Los desechos industriales convencionales (no peligrosos), también han sido tratados mediante la adición de cal o sub-productos conteniendo cal. Morgan, Novoa y Halff (11) desarrollaron y probaron una variedad de mezclas de cal y sub-productos para ser usadas en el tratamiento de lodos en una refinería de petróleo. El sistema final de tratamiento consistió en mezclar polvo viejo y fresco de horno de cemento en una proporción de 3 a 1 cm el lodo de petróleo. Los lodos mezclados produjeron un sólido moldeable que endureció para producir un resistente material para relleno de tierras.

Las técnicas para mezclar cal cenizas voladoras y desechos, para producir un desperdicio peligroso cementado y puzolánico endurecido para relleno de tierras, -- han sido resumidas por Colussi y Mullen (12). Las mezclas de puzolanas y desechos con concreto han sido producidas para que tengan suficiente resistencia para soportar el relleno y proveer una buena estabilidad al talud. En un relleno estructural el desecho tratado fué colocado sobre terreno alto, al menos 1.6 m. arriba de la tabla de agua. Los desechos tratados con cal-cenizas voladoras son colocados a 0.6 m. de elevación y compactados para producir una capa cementada con una resistencia compresiva no confinada de forro, comparable al suelo cemento, y con una impermeabilidad de menos de, o igual a  $1 \times 10^{-5}$  cm/seg. Cada capa del relleno es un alcalino amortiguado y un concreto puzolánico de baja permeabilidad. Un relleno de tierras estructural está hecho de múltiples cubiertas como capas de concreto puzolánico. Todos los taludes son cubiertos y sembrados con vegetación para reducir en el futuro el contacto del desecho con el agua.

Las puzolanas de cal - cenizas volátiles también han sido empleadas para resolver problemas relacionados con sedimentación y producción de gases en los rellenos de tierra que contienen desperdicios municipales. Los investigadores Blacklock,

Soslani y Wright (13, 14) describieron una técnica para inyectar una lechada de cal-cenizas voladoras dentro del relleno de tierras conteniendo desperdicios--municipales. La lechada es inyectada hasta que el desperdicio esté empleando--presiones por arriba de 689 Pa (100 psi). Los hoyos fueron espaciados a 3 me--tros de sus centros y la lechada fué inyectada al fondo del relleno. La lecha--da se dispuso y endureció dentro del centro de las masas segregadas del desper--dicio. El material del relleno de tierras fué concentrado y la liberación de me--tano en la superficie del relleno fué casi eliminado totalmente.

Adición de cal a las cubiertas de relleno de tierras: En los casos donde no es práctico inyectar directamente cal dentro de un relleno de tierras, la acidez--del agua que entra al relleno puede controlarse mediante añadir cal o mezclas de materiales a base de cal al recubrimiento. Francis (15) reporta una intere--sante aplicación de cal y piedra caliza al recubrimiento de relleno de tierras para mantener las condiciones alcalinas dentro de un relleno de desecho indus--trial. Se añadió una mezcla de conchas de ostiones trituradas (carbonato de cal--cio) y cal hidratada a un recubrimiento colocado arriba de un relleno de dese--chos peligroso que contenían desperdicios hidróxidos de metal. La capa de cal--piedra caliza aseguró que toda la precipitación infiltrada en el desecho se ha--bía elevado a un pH que no hubiera motivado una solución y transportación de--metales tóxicos potenciales.

Resumen La cal y los productos conteniendo cal pueden ser incorporados para to--mar ventajas en todos los componentes mayores (planchas de relleno desechos y--recubrimientos), tanto en rellenos convencionales, como en rellenos peligrosos. La cal puede controlar el pH del agua existente o infiltrada y puede proveer --una barrera química a la transportación de metales tóxicos. Las reacciones cal--puzolanas pueden usarse para proporcionar estabilidad estructural en el desecho y evitar su consolidación y la disrupción de la cubierta del relleno. La cal--también puede usarse para controlar la actividad biológica en el relleno, contro--lando el pH y la disponibilidad de los nutrientes críticos.

## REFERENCIAS

- [ 1] Boynton, R. S. "Chemistry and Technology of Lime and Limestone," 2nd Ed. John Wiley and Sons. N. Y., 1980.
- [ 2] Lewis, C. J. and Boynton, R. J. "Acid Neutralization with Lime for Environmental Control and Manufacturing Processes." National Lime Association, Bull. 216, 1976.
- [ 3] U. S. Environmental Protection Agency. "Hazardous Waste and Consolidated Permit Regulations," Federal Register Vol. 45, No. 98, Book 2, 1980. pp. 33063-33285.
- [ 4] Artiola, J. and Fuller, W. H. Jour. Environmental Quality. Vol. 8, 1979, pp. 503-510.
- [ 5] Artiola, J. and Fuller, W. H. Soil Science. Vol. 129, 1980, pp. 167-179.
- [ 6] Opitz, B. E. and Sherwood, D. R. "Neutralizing Barrier for Reducing Contaminant Migration from a Uranium Mill Tailings Disposal Pond." Reprint of presentation at the Sixth Annual Management of Uranium Mill Tailings, Low-level Waste, and Hazardous Waste Symposium, Fort Collins, Colorado. Feb. 1-3, 1984. 10 pp.
- [ 7] Gutschick, K. A. "Lime Stabilization under Hydraulic Conditions." Reprint of presentation at 4th International Lime Congress, Hershey, Pa. Sept. 21-22, 1978. 20 pp.
- [ 8] BASF Corporation. "A Green Hill by the Year 2000" (Public Affairs information). BASF Aktiengesellschaft, West Germany, 1983, 4 pp.
- [ 9] Blythe, M., Schwitzgebel, K. et al. "Characterization of Boliden's Sulphide-Lime Precipitation System," EPA-600/S-81-081, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, 1981.
- [ 10] Crawley, Wayne, Brown, K. W. and Anderson, David. "Inplace Closure of Previously Backfilled and Active Surface Impoundments." Paper presented at the 5th National Conference on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites, Washington, D. C. November 7-9, 1984. 4 pp.
- [ 11] Morgan, D. S., Novoa, J. I. and Halff, A. H. Jour. Environmental Engineering (ASCE). Vol. 10, No. 5. 1984. pp. 935-948.
- [ 12] Colussi, J. J. and Mullen, Hugh. "The Theory and Design of Structural Landfill as Applied to Stabilized Hazardous Wastes." Reprint of paper presented at the Workshop on Hazardous Waste Stabilization, Alberta Environmental Centre, Vegreville, Canada. Nov. 13-14, 1983. 11 pp.

- [13] Blacklock, J. R., Joshi, R. C. and Wright, P. J. "Pressure Injection Grouting of Landfills using Lime and Fly Ash." Paper presented at the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering. New Orleans, La. February 10-12, 1982.
- [14] Blacklock, J. R., Joshi, R. C. and Wright, P. J. 1984. "Pressure Injection Grouting of Landfills." Reprint from Public Works, May, 1984. 4 pp.
- [15] Francis, G. Z. Pollution Engineering. Sept. 1984. pp. 37-39.

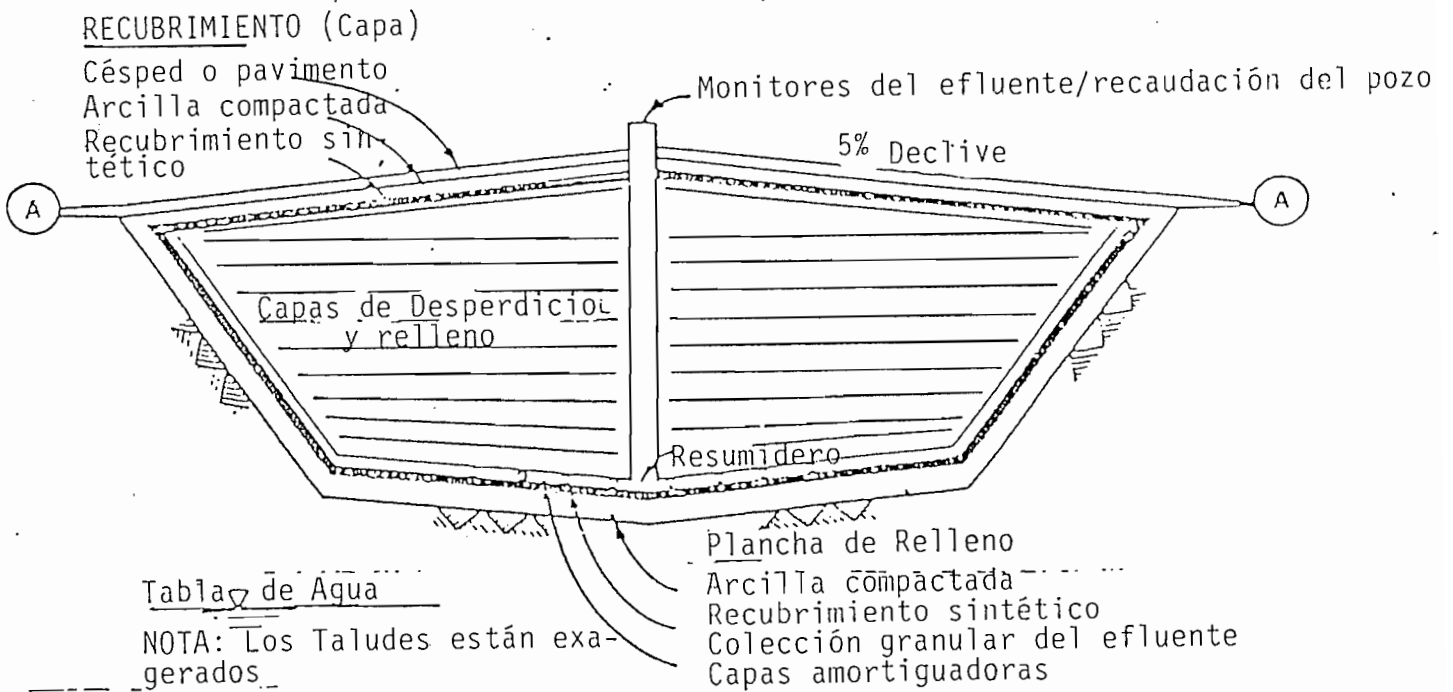
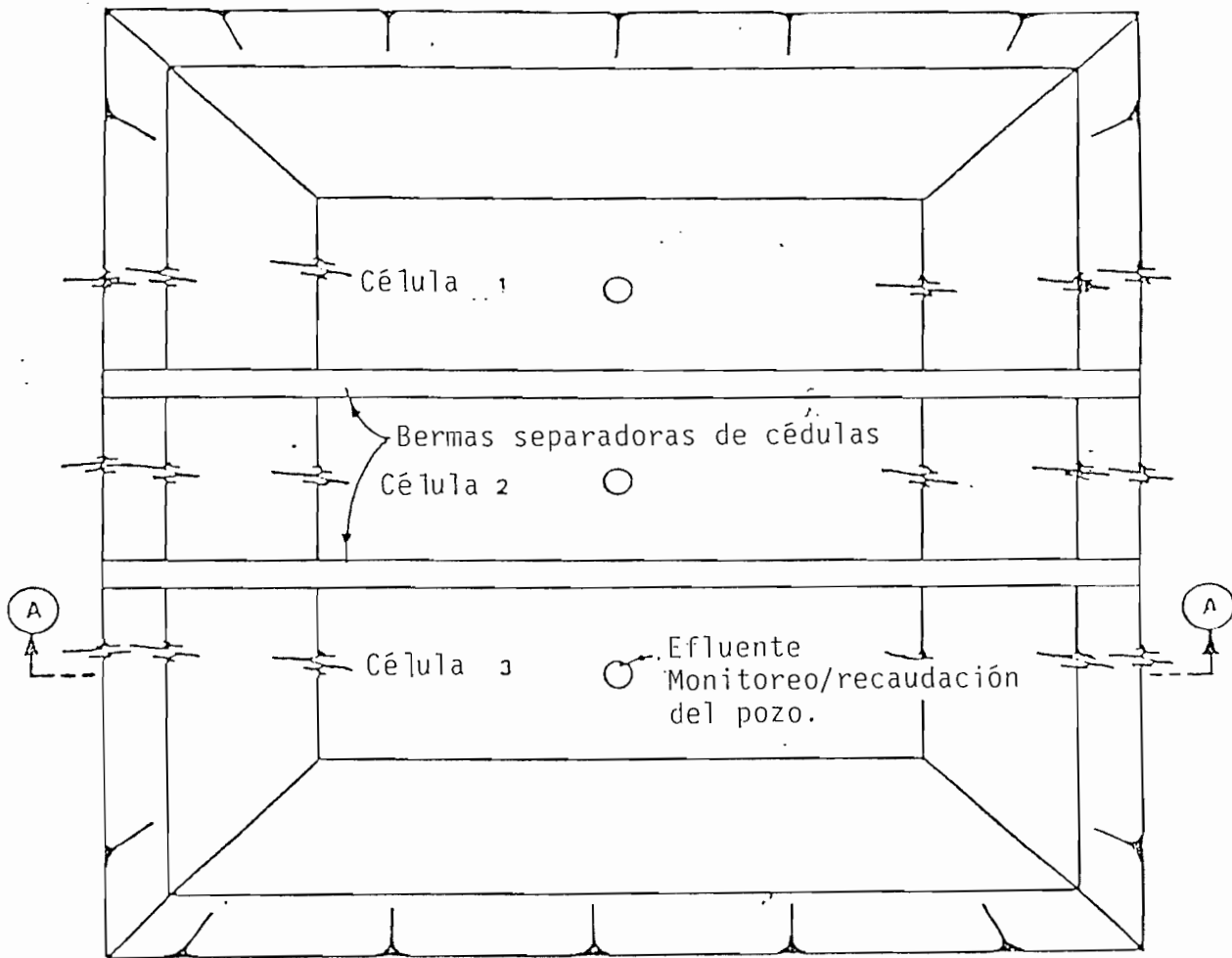


Fig. 1 Diagrama del diseño de un relleno de tierras generalizado, mostrando la cubierta, el desecho y la plancha de relleno.

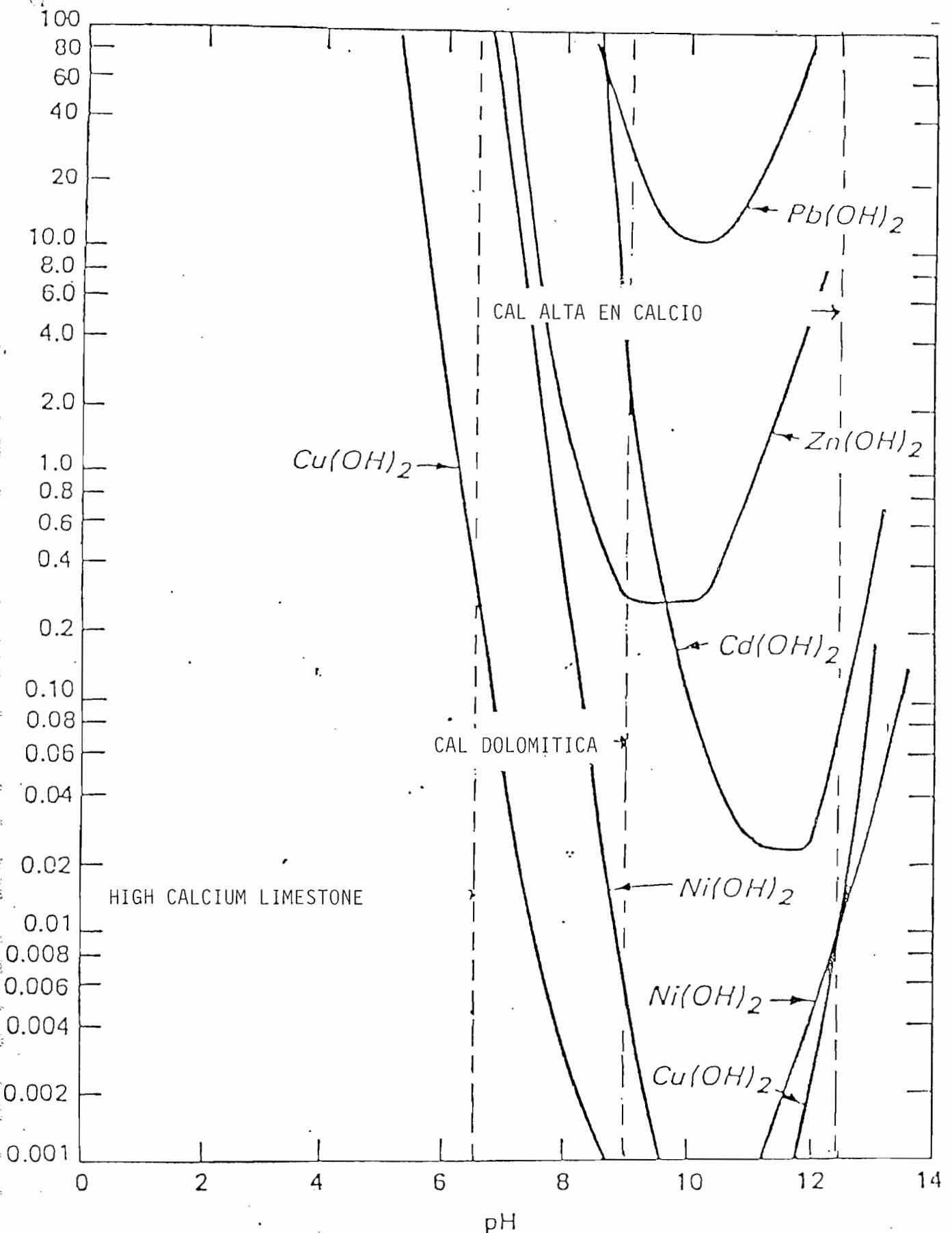


FIG. 2 VARIACION DE SOLUBILIDADES TECNICAS DE HIDROXIDO DE METALES CON pH. LAS LINEAS PUNTEADAS MARCAN LOS NIVELES DE pH OBTENIDOS CON PIEDRA CALIZA, CAL DOLOMITICA Y CAL ALTA EN CALCIO. LOS NUMEROS PROVIENEN DE LAS REFERENCIAS (2), (9).