

CAPITULO 1
INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCION

Uno de los problemas más importantes que conlleva la disposición final de los residuos sólidos municipales en rellenos sanitarios es la generación de lixiviados, que pueden convertirse en fuente de peligro potencial para el agua superficial y subterránea principalmente, por lo que sería oportuna su reducción hasta un mínimo posible, para lo cual es necesario conocer el balance de agua en el relleno sanitario.

Para la descripción del balance de agua y la estimación de la probable cantidad de lixiviados generados en el relleno sanitario, existen diferentes métodos y fórmulas. Sin embargo, por la complejidad del caso en particular y por el gran número de factores influyentes, los modelos siempre representan una simplificación, por lo que los resultados obtenidos serán una estimación o aproximación de la realidad hasta ciertos límites, cuyo éxito debe probarse después, con la aplicación, en el relleno sanitario en función.

Modelos para la descripción del balance de agua

Existen diferentes modelos para la descripción del balance de agua, los cuales dependen básicamente del intervalo de tiempo y las condiciones físico-matemáticas que se consideren y se pueden clasificar en tres tipos principales:

- 1.- Modelos de capas
- 2.- Modelos estadísticos y
- 3.- Modelos de balance.

Los modelos de capas son los más viejos y se desarrollaron en los años sesentas y setentas usando pocos parámetros¹. Los modelos de capas y modelos estadísticos prácticamente no consideran las características hidráulicas de los residuos, e ignoran el proceso del flujo del líquido a través del medio poroso; por lo tanto, los modelos de capas y modelos estadísticos ya no se usan, sin embargo, ciertas partes de ellos se pueden incorporar en otros modelos.

Hoy día, los métodos más conocidos y usados se basan en el balance geohidrológico, tendiendo cada vez más hacia la descripción más puntual de los procesos hidráulicos dentro del relleno.

El objetivo principal de la presente investigación es determinar cuantitativamente la producción de lixiviados en la primera etapa del Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. misma que comprende de la celda uno a la dieciocho.

Con el conocimiento de la cantidad de lixiviado se podrá hacer una evaluación de la contaminación del agua subterránea principalmente en la zona del relleno sanitario.

Recomendar también algunas estrategias para el manejo adecuado de lixiviados.

EL funcionamiento del relleno sanitario, desde 1990 hasta el año 2000, se puede describir en tres etapas de la siguiente manera:

¹ Gábor Kiss. Ingeniería y Ciencias Ambientales, noviembre-diciembre. 1999

En la etapa uno, que comprende de la celda uno a la dieciocho, no se colocó la infraestructura adecuada para la captación tanto de lixiviados como de biogás, y todos los residuos se depositaban en el relleno sin hacer una clasificación previa.

En la segunda etapa se colocó la infraestructura adecuada para la captación y monitoreo de lixiviados y de biogás; además, cada trinchera se recubre en el fondo y taludes con una geomembrana de polietileno de alta densidad de un milímetro de espesor la cual es protegida con dos capas de arcilla, mezclada con bentonita sódica al 7.5% de 15 cm de espesor, para la protección de los mantos acuíferos, haciéndola inocua para el subsuelo.

La tercera etapa comprende la disposición de residuos municipales y los residuos industriales no peligrosos. Los desechos que se reciben cuyo origen es considerado como no peligroso se identifican desde su llegada para poder ubicarlos en un espacio adecuado, para ello, el relleno sanitario cuenta con una trinchera recubierta de una geomembrana de polietileno de alta densidad, de un milímetro de espesor, especial para los residuos no peligrosos, con lo cual se garantiza la impermeabilidad establecida por las normas oficiales mexicanas.

El relleno sanitario cuenta también con una planta clasificadora de residuos; se seleccionan al azar los camiones de un municipio y pasan a la planta clasificadora para seleccionar los residuos reciclables y el resto de los residuos pasa a la disposición final en el relleno sanitario; es así como estaba operando la planta clasificadora hasta el año 2000.

Además, el relleno sanitario cuenta con un laboratorio de verificación de residuos y compatibilidad que garantiza la seguridad. Las trincheras se subdividen en celdas diarias, que contienen los residuos recibidos durante el día, los cuales son distribuidos de acuerdo con sus características físico-químicas particulares.²

Hasta el año 2000, el relleno sanitario es el método que más se utiliza para la eliminación de residuos sólidos municipales. Hoy día, para su disposición final, los residuos se vierten en un lugar previamente elegido y construido de manera adecuada.

Hasta antes de 1994 no existían Normas Oficiales Mexicanas para el diseño y construcción de rellenos sanitarios, por lo que la mayor parte de los rellenos sanitarios construidos antes de 1994 se construyeron y operaron de forma incorrecta.

La disposición final de los residuos sólidos municipales genera un líquido con alto contenido de elementos contaminantes, lo que llamamos lixiviado. La generación de este líquido es una fuente de peligro potencial al medio ambiente y requiere de un manejo adecuado y seguro.

Con la intención de reducir al mínimo la contaminación del ambiente por la disposición de los desechos sólidos municipales, en la construcción y funcionamiento de un relleno sanitario es imprescindible el conocimiento de la cantidad y calidad que se esperan de lixiviado generado.

² SIMEPRODESO

El presente trabajo se enfoca a investigar la cantidad de lixiviado generado y a la posible contaminación del agua subterránea durante la primera etapa de construcción y operación del Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. El presente estudio no presenta datos sobre las características químicas del lixiviado generado en el relleno sanitario; sin embargo, es de suponer que tiene un alto contenido de elementos tóxicos y peligrosos, ya que en la primera etapa se depositaron gran cantidad y diversidad de residuos, además, no sólo se recibieron los residuos generados en ese momento, sino que también se recibieron residuos que formaban parte de tiraderos a cielo abierto, por lo que se requiere conocer la cantidad de generación para darle un manejo adecuado y eficaz.

Para el cálculo de la producción de lixiviado en el relleno sanitario, se usó una combinación de los modelos de capas con los modelos de balance, ya que se analizaron cada una de las capas del relleno y se consideraron diferentes parámetros para el balance de agua. Los parámetros más importantes son:

- La precipitación.
- El escurrimiento superficial.
- La evaporación (evapotranspiración real).
- La infiltración de humedad en los desechos.
- La cantidad de lixiviado generado.

Los datos para calcular los parámetros antes mencionados fueron tomados de la Estación Meteorológica Monterrey, ubicada en la Av. Universidad, en San Nicolás de los Garza N.L. y es controlada por la Comisión Nacional del Agua. De esta estación se recopilaron los datos de precipitación y temperatura para el periodo de 1990 a 1998.

El cálculo de la generación de lixiviado, en el fondo del relleno, se realizó por medio de un procedimiento que comprende dos etapas: en la primera etapa se calculó la generación de lixiviado, una capa por año, desde el año 1 (1991) hasta el año 5 (1995), año en que se terminó de operar la primera parte del Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. La segunda etapa comprende del año 6 (1996) hasta el año 8 (1998) y para cada año se calculó la generación de lixiviado en todas las capas; es decir, para el año seis se calculó la generación de lixiviado para las capas 5, 4, 3, 2 y 1 y así sucesivamente para los años siete (1997) y ocho (1998).

El trabajo está estructurado en cuatro capítulos:

- 1.- **INTRODUCCION.** Se describe en forma general la organización de la presente tesis, así como la justificación, los objetivos y las metas de la investigación
- 2.- **RELLENOS SANITARIOS Y LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS.** En este capítulo se describe en forma general la construcción y operación de los rellenos sanitarios, así como la generación y composición de los lixiviados.

Se da una descripción de los factores que intervienen en el balance de agua en un relleno sanitario, así como los elementos que intervienen para la formación de lixiviados.

- 3.- **EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, NUEVO LEON.** Se da una descripción del área de estudio, las características del relleno sanitario, descripción de los rasgos físicos de la zona de estudio y se presentan los cálculos para determinar la producción de lixiviados y el movimiento de los mismos en forma vertical.
- 4.- **METODOS Y TECNICAS PARA EL CONTROL DE LIXIVIADOS.** Se presenta en forma detallada el control de lixiviados para el relleno sanitario, los sistemas para el control del agua superficial, la supervisión ambiental en el relleno y las estrategias para neutralizar los impactos negativos que pueden presentar los lixiviados.

1.2 JUSTIFICACION

El relleno sanitario es una de las técnicas que se utilizan en el país como destino final de la basura doméstica. Esta técnica tiene sus ventajas y desventajas: por un lado, se reducen los tiraderos a cielo abierto, disminuye la propagación de enfermedades, entre mucha otras ventajas y, por otro lado, si los rellenos sanitarios no se construyen y se operan de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas que existen para tal caso, los lixiviados generados se infiltrarán al subsuelo y traerán como consecuencia el deterioro de la calidad del suelo y del agua subterránea, principalmente.

El agua subterránea es una fuente importante de abastecimiento de agua para las comunidades, de ahí, su importancia para mantenerla en las condiciones óptimas para cada uso en particular; para mantener esas condiciones, se debe prevenir su contaminación, ya que su remediación o descontaminación tendría un costo muy elevado.

El Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-084-ECOL-1994, que establece los requisitos para el diseño de un relleno sanitario y la construcción de sus obras complementarias, fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de junio de 1994, y la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales; fue publicada en el mismo órgano de difusión el 25 de noviembre de 1996. Por lo tanto, algunos de los rellenos establecidos, antes de estas fechas, no se construyeron en forma correcta.

En muchas ciudades de la República Mexicana existen "Rellenos Sanitarios" que no cumplen con las condiciones mínimas para prevenir la contaminación del aire, el agua y el suelo, y su operación es tan deficiente que se convierten muy fácilmente en tiraderos a cielo abierto, con sus consecuentes problemas ambientales y sociales.

El Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. ha estado funcionando desde 1990 y su operación se puede dividir en tres etapas; la primera, en la cual no se construyeron las obras necesarias para la captación de lixiviados; la segunda, que se encuentra en operación y en la cual se utilizaron las técnicas y los materiales adecuados para la construcción de obras para la captación y recolección de lixiviados y captación de biogás; y la tercera etapa, parte integral de la segunda, en la cual una parte de la basura que llega al relleno pasa por una planta clasificadora y recuperadora de material (cartón, vidrio, plástico, aluminio, etc), y el resto de la basura pasa al relleno sanitario.

La presente investigación se enfoca, específicamente, a la primera etapa de construcción del Relleno Sanitario. En la primera etapa, que a la fecha ya está terminada (2000) como se mencionó anteriormente, no se construyeron las obras necesarias para la captación de lixiviados; ésto es importante, ya que el relleno se encuentra en una zona en donde existen pozos de agua que, algunas comunidades, la utilizan para consumo humano, abrevadero o para riego. Este es solamente un caso de los muchos rellenos sanitarios que existen en la República Mexicana, en condiciones semejantes.

1.3 OBJETIVO GENERAL

- **Cuantificar los lixiviados generados en el Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. en el área de estudio, la cual comprende de la celda 1 a la 18, y las cuales ocupan una superficie de 42 hectáreas.**

- **Detectar las posibilidades que pudiesen existir para la contaminación del suelo y agua subterránea en ese lugar.**

- **Conocer el comportamiento normal de los lixiviados según las variables:**
 - **Capacidad del relleno (área de estudio)**
 - **Cantidad de desechos recibidos**
 - **Características de los desechos**
 - **Condiciones climáticas**
 - **La inclusión de agua de distintas procedencias.**

- **Explicitar algunos métodos para el control de lixiviados.**

- **Sugerir algunas estrategias para controlar y neutralizar los impactos negativos que pudiera presentar la generación de lixiviados.**

1.4 HIPOTESIS

Los líquidos lixiviados pueden ser un potencial contaminante que se puede desarrollar en los rellenos sanitarios e infiltrarse al subsuelo dependiendo de la movilidad y concentración del lixiviado; la calidad y concentración pueden variar dependiendo de los diferentes factores que intervienen para su formación, en tanto la movilidad dependerá de la transmisibilidad del suelo.

Si se controla la producción y se mejoran los sistemas para evitar la infiltración del lixiviado hacia el subsuelo en el relleno sanitario, se evitará la contaminación del suelo y del agua subterránea.

CAPITULO 2

LOS RELLENOS SANITARIOS Y LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS

2.1 GENERALIDADES SOBRE RELLENOS SANITARIOS

La creciente cantidad de los desechos de la civilización y el cambio en su composición causan una preocupación cada vez más grande, al igual que el empeoramiento progresivo del estado del medio ambiente, tanto en México como en cualquier otra parte del mundo.

Durante mucho tiempo, el medio ambiente daba cabida a los residuos sin ninguna limitación, pero, actualmente, esta carga ha alcanzado un máximo soportable y la introducción adicional descontrolada de los materiales contaminantes en el ambiente ya puede causar efectos catastróficos. Para evitarlo, la protección del medio ambiente obliga a que el tratamiento, reutilización o disposición final de los residuos, forme parte integral del proceso de producción, elaboración y consumo. Es decir, se deben tratar los residuos y, a causa de la falta de condiciones técnicas o económicas, no hay otra posibilidad para su eliminación o reutilización; entonces se debe encontrar la solución más adecuada para su disposición final. Pero, ello exige una gestión profesional y segura, cuyo aspecto principal es la protección del medio ambiente, es decir, impedir la contaminación del suelo, de las aguas y del aire.

Respecto al manejo de los residuos sólidos, existen varios métodos para su disposición final entre los que se encuentran: la incineración, el compostaje aerobio, los basureros a cielo abierto, el relleno sanitario, la recuperación y la reducción.

El relleno sanitario es, en la actualidad, el método más usado en México para la eliminación de residuos sólidos municipales; en el mismo, los residuos recolectados se vierten en un lugar,

adecuadamente elegido y construido para la disposición final de los desechos, que son compactados con maquinaria especial y cubiertos con material inerte, bajo un continuo control y monitoreo ambiental, en la misma planta y sus alrededores.

Con lo anteriormente expuesto, se nota claramente cuál es la diferencia entre los rellenos sanitarios y los basureros descontrolados, que están contaminando continuamente el medio ambiente.

La disposición final de los residuos, en un relleno sanitario, tiene las siguientes ventajas respecto a los otros métodos de tratamiento:

- Una inversión comparativamente pequeña y un funcionamiento relativamente barato y sencillo.
- Una gran capacidad e independencia de las fluctuaciones cuantitativas.
- Aptitud para recibir cualquier tipo de residuos sólidos municipales no peligrosos.
- La no urgencia de métodos especiales en la recolección y el transporte de los residuos.
- La posible eliminación total y final de los residuos.

- La posibilidad de aprovechamiento del biogás generado en los procesos de consolidación y degradación de la basura.
- La viabilidad de la reutilización futura del lugar.

El relleno sanitario tiene, a la vez, algunas desventajas:

- La necesidad de un terreno adecuado, que acoja grandes cantidades de desechos y cumpla con todos los requisitos que marca la Legislación Mexicana.
- Se requieren lugares alejados de los lugares poblados, lo que representa más gastos de transporte.
- El riesgo de contaminación del suelo, de las aguas superficiales y subterráneas, y del aire.
- El gasto del tratamiento de los lixiviados generados por la basura.

Según el número de razones, en pro y en contra, pareciera que el relleno sanitario fuera una solución muy ventajosa, pero ésto demuestra solamente lo indispensable del método.

Evidentemente, la elección de la forma de tratamiento de los desechos depende de muchos factores locales y de otras condiciones técnicas, económicas y políticas; sin embargo, hay que comprender que el relleno sanitario siempre será un método imprescindible para la eliminación de los residuos, sea como método general único o como método complementario.

Las consecuencias negativas que surgirían, en caso de no cumplir con los requisitos que marcan las Normas Oficiales para Rellenos Sanitarios, serían las siguientes:

- Como consecuencia directa de la disposición final inadecuada de los residuos de diferentes orígenes, se contamina el suelo, el agua, el aire y se produce un peligro directo para la salud pública, en forma de infecciones y epidemias.
- De la disposición de residuos en terrenos sin protección geológica existente o sin obras de ingeniería para el control de la salida de materiales contaminantes, resulta la contaminación del suelo y de las aguas freáticas, lo que también significa peligro para la salud pública, por vía indirecta y a largo plazo. Este peligro requiere una seria consideración porque, la contaminación que ocurra, afectará grandes territorios y su rehabilitación requerirá de un largo periodo de tiempo y de grandes presupuestos.
- En lugares donde se vierte la basura sin control, los incendios y sus productos (humo, ceniza, olores ofensivos, gases tóxicos, etc.), pueden causar seria contaminación del aire.

- **La fermentación de materias orgánicas, cuya degradación genera gases y líquidos tóxicos, o por lo menos, desagradables, también constituyen una amenaza para la salud pública en la zona.**
- **El polvo también contamina el aire, y los desechos ligeros, como el papel y el plástico que pueden ser arrastrados por el viento, llegan a los terrenos de cultivo y a las carreteras cercanas lo que ocasiona, aparte del impacto estético negativo, un estorbo a la actividad agrícola y el tráfico vehicular; a veces, pueden contener también elementos tóxicos.**
- **La materia orgánica que se fermenta y los restos de alimentos en la basura favorecen la proliferación de roedores e insectos, que son propagadores de enfermedades y epidemias. Para eliminar estos animales, se requiere el tratamiento profesional de la basura, con el cubrimiento diario de la misma, usando material inerte.**
- **Tampoco se debe dejar de considerar el impacto estético negativo que representa un tiradero incontrolado, no sólo por la gente que vive en la zona, que requiere que existan condiciones óptimas ambientales, sino también por razones de turismo.**

"Hay que señalar que los rellenos sanitarios quitan recursos valiosos a las generaciones actuales y futuras y, son métodos de salida que promueven la producción de basura, en vez de la

reducción de la misma"¹. Pero es un método de disposición final económico y seguro, desde el punto de vista de la salud pública, y su uso se está generalizando en México.

2.1.1 CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

Otro problema muy importante de los rellenos sanitarios es la contaminación de las aguas freáticas y superficiales. Cuando la lluvia se infiltra por un relleno, lixivia tintas, compuestos metálicos hidrosolubles y otros materiales tóxicos. Esto produce un lixiviado contaminante, que se infiltra desde el fondo de los tiraderos no recubiertos o por grietas en el revestimiento de los sí recubiertos. La contaminación de aguas subterráneas y aguas superficiales próximas es un problema grave, en especial, con los muchos rellenos y antiguos tiraderos abandonados que no tenían recubrimiento. Por otra parte, los rellenos con recubrimiento también pueden presentar fugas por fallas en el revestimiento.

La contaminación del agua subterránea es mucho más difícil de detectar y controlar que la contaminación del agua superficial. Muchos pozos deben ser vigilados por medio del monitoreo del agua subterránea, aún y cuando este método es muy caro.

Debido a su localización bajo tierra, bombear el agua subterránea contaminada, sacándola a la superficie, limpiarla y regresarla al acuífero, generalmente es demasiado costoso. Bombear y tratar acuíferos contaminados con flujo lento, requiere décadas; incluso, cientos de años de bombeo antes de que toda la contaminación aflore a la superficie.

¹ G. Tyler Miller Jr. *Ecología y Medio Ambiente*. 1994

Por lo tanto, evitar la contaminación es la única manera efectiva de proteger los recursos del agua subterránea, y ésto requerirá monitorear los acuíferos cercanos a los rellenos sanitarios.

2.2 GENERACION Y COMPOSICION DE LIXIVIADOS

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente considera al lixiviado como el líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos.

En la mayoría de los rellenos sanitarios, el lixiviado está formado por el líquido que entra en el relleno desde fuentes externas (drenaje superficial, lluvia, aguas subterráneas, aguas de manantiales subterráneos) y, en su caso, el líquido producido por la descomposición de los residuos.

Los diversos materiales confinados en los rellenos sanitarios hacen que la composición de los lixiviados sea variable, de acuerdo con la naturaleza de los mismos desechos (pH, edad, temperatura, etc.); también influyen aspectos externos ambientales (meteorología), así como la edad del relleno, la tecnología usada en la planta y la fase de estabilización en que se encuentre el desecho.

La degradación de los desechos se presenta en dos fases: aeróbica y anaeróbica

Fase aeróbica: En el caso de que haya bastante oxígeno disponible, los microorganismos presentes en los residuos o provenientes del ambiente, contribuyen a la descomposición aerobia de la materia orgánica. El proceso es fomentado, parcialmente, por el aire atrapado en el relleno, mientras las capas superficiales, incluso, reciben cierta aireación desde la atmósfera. Un factor importante es, además, la humedad, que para estos microorganismos es óptima si está en el nivel de 60%, ya que, por lo general, el contenido de humedad de los residuos sólidos municipales es de 15 a 40%², así el agua pluvial que cae al relleno tiene un papel importante en alcanzar la humedad necesaria para los bioprocesos.

Los productos de la descomposición aerobia generalmente son: dióxido de carbono, amoníaco (que después se transformará en nitrato) y agua, así como lo que resulta de la oxidación de los diversos componentes originales de los desechos. Ya que las reacciones de oxidación generalmente son exotérmicas, la temperatura interna del relleno, en corto tiempo, puede superar los 60°C. En tal temperatura, la mayor parte del contenido de humedad se evapora, por lo que, generalmente, directamente del proceso de la descomposición aerobia no se genera lixiviado.

Fase anaeróbica: La materia orgánica de los residuos también se descompone en ausencia de oxígeno, pero en forma más lenta que en condiciones aerobias. La descomposición anaerobia llega a prevalecer después del agotamiento del aire atrapado, y en las partes más profundas del relleno que están aisladas de la recarga de aire proveniente de la atmósfera. La

² George Tchobanoglous, "Gestión Integral de Residuos Sólidos", 1994

influencia del ambiente externo aquí ya no prevalece, por lo tanto, los procesos bioquímicos pueden mantener la temperatura elevada. Ya que en estos niveles ya no hay posibilidad de evaporación del ambiente y además la temperatura de 35° a 50°C es inferior a las condiciones de oxidación; así, con la descomposición anaerobia ya se produce cierta cantidad de lixiviado.

La transformación inicialmente genera ácidos orgánicos, después metano y dióxido de carbono, mientras se lleva a cabo la desnitrificación y la reducción de los diversos componentes, sobre todo de los sulfatos.

Durante todo esto, el relleno está expuesto a la precipitación, por lo que una cantidad considerable de agua pluvial llega a infiltrarse en la masa de los desechos. Esta agua percola la materia depositada y disuelve los diferentes componentes de los residuos; a la vez que se lleva los productos de las reacciones anteriormente mencionadas, se acumula en la base del relleno como lixiviado el cual, tomando en cuenta su considerable cantidad, es mucho más que los líquidos generados en los otros procesos.

2.2.1 FACTORES QUE AFECTAN LA GENERACION DE LIXIVIADOS

Para este efecto, se considerarán dos tipos de factores: aquéllos que dependen del tipo de desecho y que se consideran internos por ser inherentes al desecho; y los externos, es decir, aquéllos que no dependen de la naturaleza de los residuos.

Factores internos. Los factores internos que afectan la generación de los lixiviados son:

- a) La composición de los residuos. Esta varía de desecho a desecho y sólo es posible conocer las características en un confinamiento controlado, en donde se tiene una planeación de los desechos que se depositarán en el lugar.

- b) La degradación de los residuos. Esto influye mucho en la concentración del lixiviado, pues varía según la naturaleza de los desechos, si son orgánicos o inorgánicos, ya que los primeros se degradan fácilmente y hacen que la generación de lixiviados sea mayor en un poco tiempo y, por lo tanto, su concentración será mayor.

- c) El tamaño y composición de los residuos. Algunas veces, para facilitar la operación de los desechos, éstos se fragmentan, haciéndolos de un tamaño uniforme; a este proceso se le llama trituración y provoca que se acelere la generación de lixiviado.

Factores externos. Independientemente de la naturaleza de los desechos, de los líquidos retenidos en éstos y de las reacciones fisico-químicas que se presentan en el confinamiento, existen diversos factores externos que pueden afectar la formación de lixiviados, como:

- a) La capacidad de intercambio catiónico. Los suelos orgánicos y las arcillas tienen una gran capacidad de intercambio de cationes, lo que hace que se retengan los metales contenidos en el lixiviado, retardando su tránsito hacia el subsuelo y, consecuentemente, hacia los mantos acuíferos.

- b) La geohidrología local y regional. Esta comprende las zonas permeables e impermeables del subsuelo, la localización de los mantos acuíferos y la dirección del flujo subterráneo, si éste existe, así como la capacidad de infiltración y la capacidad de campo del suelo.

- c) El clima. Por clima debemos entender aquellos factores climatológicos que afectan a la región; estos factores son: el régimen de precipitación pluvial y el de evapotranspiración, los vientos dominantes y las temperaturas que se presentan en el transcurso del año.

- d) El diseño y la operación de sitios de disposición. La tecnología usada en el depósito del relleno también influye en el desarrollo de los procesos de descomposición. La altura de las unidades, o bien, la altura o profundidad total del relleno, la tecnología de la compactación y la calidad del material de cubierta, influyen en el prevalecimiento de los factores ambientales. Por otra parte, es frecuente que en los confinamientos la operación sea incorrecta y no se atiendan las normas de operación que se tomaron en cuenta para el diseño, por lo que la

generación de lixiviados varía la forma cuantitativa prevista.

- e) El tipo de superficie de evaporación. Es un hecho que la evaporación depende de la superficie expuesta a la luz solar, por lo que las superficies planas ofrecerán un mayor espejo de agua, lo que redundará en una mayor evaporación y una menor infiltración.

2.2.2 COMPOSICION DE LIXIVIADO

Al filtrarse el agua a través de los residuos sólidos en descomposición, se lixivian en solución materiales biológicos y constituyentes químicos. En la tabla 1 se presentan datos representativos sobre las características de los lixiviados en rellenos nuevos y antiguos.

TABLA 1
Datos típicos sobre la composición de los lixiviados
procedentes de rellenos sanitarios nuevos y antiguos.

Constituyente	Relleno sanitario nuevo (menos de 2 años)		Relleno sanitario antiguo (mayor de 10 años)
	Rango	Típico	
DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno)	2,000-30,000	10,000	100-200
COT (carbono orgánico total)	1,500-20,000	6,000	80-160
DQO (demanda química de oxígeno)	3,000-60,000	18,000	100-500
SST(sólidos suspendidos totales)	200-2,000	500	100-400
Nitrógeno orgánico	10-800	200	80-120
Nitrógeno amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	5-40	25	5-10
Fósforo total	5-100	30	5-10
Ortofosfato	4-80	20	4-8
Alcalinidad como CaCO ₃	1,000-10,000	3,000	200-1,000
pH	4.5-5.7	6	6.6-7.5
Dureza total como CaCO ₃	300-10,000	3,500	-
Calcio	200-3,000	1,000	100-400
Magnesio	50-1,500	250	50-200
Potasio	200-1000	300	50-400
Sodio	200-2,500	500	100-200
Cloruros	200-3,000	500	100-400
Sulfatos	50-1,000	300	20-50
Hierro total	50-1,200	60	20-200

Todos los valores están en mg/L, excepto el pH que no tiene unidades.

Tomada de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Tchobanoglous G. 1994

TABLA 2
Parámetros de muestreo de los lixiviados

Físicos	Orgánicos	Inorgánicos	Biológicos
Aspecto	Químicos orgánicos	Sólidos en suspensión (SS), sólidos totales disueltos (STD)	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
pH	Fenoles	Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), Sólidos Disueltos Volátiles (SDV)	Bacterias coliformes (totales, fecales y estreptococo)
Potencial de reducción oxidación	Demanda química de oxígeno (DQO)	Cloruros	Recuento sobre placas estándar
Conductividad	Carbono orgánico total (COT)	Sulfatos	---
Color	Acidos volátiles	Fosfatos	---
Turbiedad	Taninos, ligninas	Alcalinidad y acidez	---
Temperatura	N-orgánico	N-Nitrato	---
Olor	Aceites y grasas (solubles en éter)	N-Nitrito	---
---	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	N-Amónico	---
---	Grupos funcionales orgánicos según sean requeridos	Sodio	---
---	Hidrocarburos clorados	Potasio	---
---	---	Calcio	---
---	---	Magnesio	---
---	---	Dureza	---
---	---	Metales pesados (Pb, Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Fe, Mn, Hg, Ba, Ag, As, Se)	---
---	---	Cianuro	---
---	---	Flúor	---

Tomada de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Tchobanoglous G. 1994

2.2.3 VARIACIONES EN LA COMPOSICION DE LOS LIXIVIADOS.

La composición química de los lixiviados variará mucho, según la antigüedad del relleno sanitario y la historia previa al momento de muestreo. Por ejemplo, si se recoge una muestra de lixiviados durante la fase ácida de la descomposición, el pH será bajo y las concentraciones de DBO_5 , COT, DQO, nutrientes y metales pesados serán altas. Por otro lado, si se recoge una muestra de lixiviados durante la fase de fermentación del metano, el pH estará dentro del intervalo de 6.5 a 7.5 y los valores de concentración de DBO_5 , COT, DQO y de los nutrientes serán, significativamente, más bajos. Similarmente, serán más bajas las concentraciones de metales pesados, porque la mayoría de los metales son menos solubles para valores de pH neutros. El pH del lixiviado dependerá no solamente de la concentración de los ácidos que están presentes, sino también de la presión parcial del CO_2 en el gas del relleno sanitario que está en contacto con el lixiviado³.

La biodegradabilidad del lixiviado variará con el tiempo. Se pueden supervisar los cambios en la biodegradabilidad del lixiviado mediante el control de la relación DBO_5/DQO . Inicialmente, las relaciones estarán en el nivel de 0.5, o más. Las relaciones en el intervalo de 0.4 a 0.6 se toman como un indicador de que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable. En los rellenos sanitarios antiguos, la relación DBO_5/DQO está, a menudo, en el intervalo de 0.05 a 0.2. La relación cae porque los lixiviados procedentes de rellenos antiguos normalmente contienen ácidos húmicos y fúlvicos, que no son fácilmente biodegradables.

³ George Tchobanoglus "Gestión Integral de Residuos Sólidos". 1994

Como resultado de la diversidad de las características del lixiviado, el diseño de los sistemas de tratamiento del mismo es complicado. Por ejemplo, una planta de tratamiento diseñada para tratar lixiviado, con las características presentadas por un relleno nuevo, sería bastante diferente de una diseñada para el lixiviado procedente de un relleno antiguo. El problema de interpretación de los resultados analíticos es todavía más complicado, por el hecho de que el lixiviado que está generándose, en un momento dado, es una mezcla de lixiviado derivado de residuos sólidos de distintas edades.

2.2.4 OLIGOCOMPUESTOS.

Los oligoconstituyentes en los gases del relleno sanitario tienen dos orígenes. Pueden llegar al relleno con los residuos entrantes o pueden producirse mediante reacciones bióticas o abióticas, que tienen lugar dentro del relleno. De los oligocompuestos encontrados en los gases del relleno, muchos están mezclados con los residuos entrantes en forma líquida, pero tienden a volatilizarse. La tendencia a la volatilización es directamente proporcional a la presión de vapor líquido, e inversamente proporcional al área de una esfera del líquido volátil dentro del relleno. En rellenos donde se prohíba el confinamiento de residuos peligrosos, como en el caso del Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L., las concentraciones de COV (compuestos orgánicos volátiles) en el gas del relleno no serán significativas.

2.3 BALANCE DE AGUA Y GENERACION DE LIXIVIADO EN LOS RELLENOS SANITARIOS.

El potencial de formación del lixiviado puede valorarse mediante la preparación de un balance hidrológico del relleno. El balance hidrológico implica la suma de todas las cantidades de agua que entran en el relleno y la sustracción de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua. La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de retención de humedad del material en el relleno.

2.3.1 DESCRIPCION DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE DE AGUA PARA UNA CELDA DE UN RELLENO SANITARIO.

Los componentes que forman el balance de agua para una celda, en un relleno, se identifican en la figura 1. Las fuentes principales incluyen: el agua que entra en la celda desde arriba, la humedad de los residuos sólidos, la humedad del material de cobertura y la humedad de lodos, si se permite el confinamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento. Las principales salidas son: el agua que abandona el relleno, formando parte del gas del relleno (es decir, el agua utilizada para formar el gas), el vapor de agua saturado en el gas del relleno y el lixiviado.

a) Entradas de agua.

El agua que entra en el relleno desde arriba.

En la capa superior del relleno, el agua que entra desde arriba procede de la precipitación atmosférica que se ha filtrado a través del material de cobertura. En las capas, por debajo de

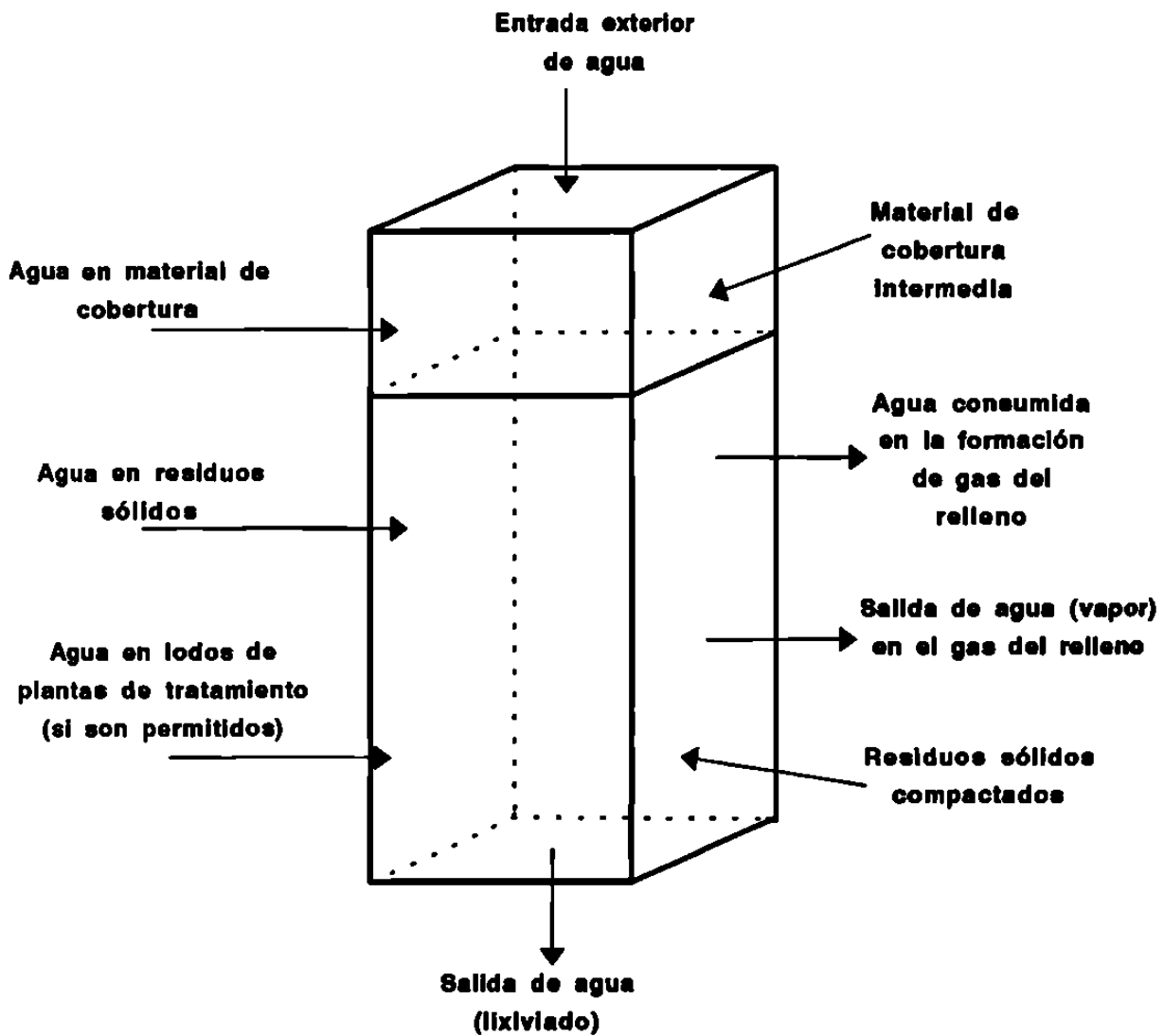


FIGURA 1 Esquema de un balance de agua utilizado para valorar la formación de lixiviados en un relleno sanitario

Tchobanogius G. 1994

la capa superior, el agua que entra desde arriba procede del agua que se ha filtrado a través de los residuos sólidos situados sobre la capa en cuestión. Uno de los aspectos más críticos de la preparación de un balance hidrológico, para un relleno, es determinar la cantidad de lluvia que realmente se filtra a través de la capa de cobertura del relleno.

Humedad de los residuos sólidos.

El agua que entra al relleno con los desechos sólidos es corresponde, tanto al agua intrínseca de los residuos, como a la humedad que se ha absorbido de la atmósfera o de la lluvia (sobre todo cuando los contenedores de almacenamiento no están correctamente cerrados). En climas secos, se puede perder algo de humedad intrínseca contenida en los residuos por las condiciones de almacenamiento. El contenido de humedad de los residuos sólidos domésticos y comerciales depende principalmente del clima de la región.

Humedad del material de cobertura.

La cantidad de agua que entra con el material de cobertura dependerá del tipo y del origen del material y también de la estación del año. La cantidad máxima de humedad que el material de cobertura puede contener se define como capacidad de campo (CC) del material, o sea, el líquido que queda en el espacio de los poros, sometido a la gravedad.

b) Salidas de agua.**Agua consumida en la formación del gas del relleno.**

A esta también se le conoce como humedad metabólica de los residuos sólidos y es la cantidad de agua requerida en las actividades biológicas que se presentan en el transcurso de la degradación natural de los residuos sólidos de un relleno sanitario.

Esta degradación natural consta de dos etapas, la primera es una fermentación aeróbica y, la segunda, una fermentación anaeróbica.

La fermentación aeróbica abarca el conjunto de los procesos biológicos que se desarrollan en presencia de oxígeno. Se caracteriza por la formación de una mezcla gaseosa, compuesta por dióxido de carbono, amoníaco y agua. Esta fase dura solamente algunas semanas.

La fermentación anaeróbica se desarrolla en ausencia de oxígeno. Se caracteriza por la oxidación y reducción de materia orgánica, generando dióxido de carbono y metano. Esta fase toma más tiempo en desarrollarse y es el proceso predominante en un relleno sanitario.

Los principales factores que intervienen en la descomposición de los residuos sólidos son: La heterogeneidad de los residuos sólidos, sus propiedades físicas, químicas y biológicas, el oxígeno confinado entre los mismos, así como la temperatura, la humedad en el relleno y los microorganismos que presentan los residuos sólidos durante su degradación.

Agua perdida como vapor de agua.

El gas del relleno sanitario normalmente está saturado en vapor de agua. La cantidad de vapor de agua que escapa del relleno sanitario se determina, suponiendo que el gas del relleno está saturado en vapor de agua y aplicando la ley de los gases ideales, de la forma siguiente:

$$p_v V = nRT$$

donde:

p_v = presión de vapor del agua a una temperatura T, en atm.

V = Volumen.

n = Número de moles.

R = Constante universal de los gases.

T = Temperatura K.

Lixiviado

El agua que sale desde el fondo de la primera celda del relleno se llama lixiviado. El agua que sale del fondo de la segunda y de las subsiguientes celdas, procede del agua que entra desde la celda superior a la celda en cuestión. En los rellenos donde se utilizan sistemas intermedios para la recolección de lixiviados, el agua que sale desde el fondo de la celda colocada directamente por encima del sistema para la recolección de lixiviado intermedio, también se llama lixiviado.

c) Otras pérdidas y ganancias de agua.

Habrà una pérdida de humedad por evaporación durante el vertido de los residuos. Las cantidades no son grandes y, por lo general, no se toman en cuenta.

d) Capacidad de campo del relleno sanitario.

El agua que entra en el relleno, que no se consume y que no sale como vapor de agua, puede mantenerse en el relleno o puede aparecer como lixiviado. Los desechos sólidos y el material de cobertura, ambos, son capaces de retener agua. La cantidad de agua que se puede retener, en contra de la gravedad, se denomina "capacidad de campo".

La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de humedad dentro del relleno, por encima de la capacidad de campo del mismo. La capacidad de campo, que varía con el peso de sobrecarga, puede estimarse utilizando la siguiente ecuación:

$$CC = 0.6 - 0.55(W/10,000 + W)$$

donde:

CC= Capacidad de campo (o sea, la fracción de agua en los residuos sólidos basándose en el peso seco de los mismos).

W= Peso de sobrecarga, calculado en la mitad de la altura de los residuos dentro del nivel en cuestión.

e) Preparación del balance de agua en el relleno.

Los términos que componen el balance de agua pueden colocarse en forma de ecuación de la forma siguiente:

$$S_{RS} = W_{RS} + W_{FT} + W_{MC} + W_{A(L)} - W_{GV} - W_E + W_{F(L)}$$

donde:

S_{RS} = Variación en la cantidad de agua almacenada en los residuos sólidos en el relleno kg/m^3 .

W_{RS} = Agua (humedad) en los residuos sólidos entrantes, kg/m^3 .

W_{FT} = Agua (humedad) en los lodos de las plantas de tratamiento entrantes, kg/m^3

W_{MC} = Agua (humedad) en el material de cobertura, kg/m^3 .

$W_{A(L)}$ = Agua filtrada superiormente, kg/m^3

W_{GV} = Agua perdida en la formación del gas del relleno, kg/m^3

W_{VA} = Agua perdida como vapor de agua saturado con el gas del relleno, kg/m^3

W_E = Agua perdida debido a la evaporación superficial, kg/m^3

$W_{F(L)}$ = Agua que sale inferiormente (en la celda localizada directamente por encima de un sistema para la recolección del lixiviado, el agua del fondo es el lixiviado), kg/m^3

Se prepara el balance hidrológico del relleno añadiendo la masa del agua entrante por unidad de área de una capa concreta del relleno, para un incremento de tiempo dado, al contenido de humedad de esa capa final del incremento del tiempo anterior y sustrayendo la masa de agua perdida de la capa durante el período de tiempo actual. El resultado se conoce como "agua disponible", en el incremento de tiempo actual, para una capa particular del relleno.

Para determinar si se formará lixiviado, se compara la capacidad de campo del relleno con la cantidad de agua presente. Si la capacidad de campo es menor que la cantidad de agua presente, se formará lixiviado.

Por lo general, la cantidad de lixiviado está en función directa de la cantidad de agua externa que entra en el relleno. De hecho, si se construye correctamente un relleno, se puede eliminar la producción de cantidades medibles de lixiviado. Cuando se añaden lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales a los residuos sólidos para incrementar la cantidad de metano producido, deben acondicionarse instalaciones para el control de lixiviado y, en algunos casos, pueden necesitarse instalaciones para el tratamiento del lixiviado.

2.4 TASAS DE FILTRACION DE AGUA A TRAVES DE LAS CAPAS DE COBERTURA INTERMEDIA Y FINAL EN RELLENOS SANITARIOS.

Normalmente se estima la filtración del agua de lluvia o de deshielo a través de la capa de suelo por encima de la capa de drenaje, o a través de una capa de cobertura compuesta solamente de suelo, utilizando un balance hidrológico con la siguiente expresión:

$$S_{LC} = P - R - ET - PER_{sw}$$

donde:

S_{LC} = Cambio en la cantidad de agua almacenada en una unidad de volumen de cobertura de relleno,

P = Cantidad de precipitación atmosférica por unidad de área

R = Cantidad de escorrentía por unidad de área

ET= Cantidad de agua perdida mediante evapotranspiración por unidad de área

PER_{sw}= Cantidad de agua que se filtra a través de la unidad de área de la cobertura del relleno y que entra en los residuos sólidos

La cantidad total de agua que se puede almacenar en un volumen unitario de suelo dependerá de la capacidad de campo (CC) y del porcentaje de marchitez permanente (PMP). Los demás factores que intervienen en la infiltración se enuncian a continuación.

a) Factores de Infiltración:

- Precipitación
- Escurrimiento superficial
- Temperatura
- Capacidad de campo
- Punto de marchitez permanente
- Humedad
- Evapotranspiración

Precipitación.

Uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico es la precipitación. Puede calificarse como el factor esencial, pues constituye la materia prima del referido ciclo.

Cuando el agua, en estado líquido o sólido, llega a la superficie de la tierra, se dice que ha precipitado.

El vapor de agua contenido en la masa de aire, a consecuencia de los cambios de presión y temperatura y del movimiento de estas masas y ayudado, en ocasiones, por minúsculos núcleos de condensación y material sólido en suspensión, se reúne en gotas de agua o cristales de hielo y cae venciendo las resistencias que se le oponen, hasta llegar a la superficie terrestre.

Escurrimiento superficial.

Es la cantidad de agua de lluvia que se pierde antes de que tenga oportunidad de infiltrarse en el suelo.

Los elementos que intervienen en el escurrimiento superficial son de naturaleza meteorológica, geológica y topográfica.

Para determinar la cantidad de agua que corresponde a la fracción del escurrimiento, es razonable el uso de coeficientes de escurrimiento. Estos coeficientes proporcionan un medio para evaluar las cantidades de afluencia de la superficie debido a la precipitación, por las condiciones dadas del lugar.

Entonces el escurrimiento superficial se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$E_s = K_e \times P$$

Donde:

E_s = Escurrimiento superficial mensual en milímetros

K_e = Coeficiente de escurrimiento

P= Precipitación pluvial mensual en milímetros.

Temperatura.

Mediante la temperatura se expresa, numéricamente, el efecto que en los cuerpos produce el calor originado por el balance entre la radiación recibida y la emitida.

Interesa, especialmente, la temperatura del aire en las inmediaciones de la superficie terrestre. El aire se calienta o se enfría a partir del suelo, por distintos medios de transmisión y por los cambios de estado físico del agua atmosférica.

La variación de temperatura sigue dos ciclos principales: el ciclo diario que presenta una forma sinusoidal, con un máximo y un mínimo muy acusados, y el ciclo anual referido a temperaturas medias diarias que presenta también forma sinusoidal, dependiendo de sus máximas y mínimas de la latitud, fundamentalmente.

Capacidad de campo.

Es el grado de humedad de una muestra que ha perdido su agua gravífica. Este concepto es de gran importancia en la agricultura pues, en la zona de acción de las plantas, representa el agua que, transcurrido un tiempo (generalmente unos tres días), después de un riego o de una lluvia, queda en el terreno, y de la cual una parte podrá ser aprovechada por la vegetación para sus funciones biológicas.

Punto de marchitez permanente.

Es el grado de humedad de un suelo que rodea la zona radicular de la vegetación, tal que la fuerza de succión de las raíces es menor que la de retención del agua por el terreno y, en consecuencia, las plantas no pueden extraerla. Al igual que la capacidad de campo, es un concepto eminentemente agronómico, pero que juega un importante papel en fenómenos como la evapotranspiración, de indiscutible influencia sobre el ciclo hidrológico. Su determinación en el laboratorio se hace sometiendo una muestra a presión centrífuga del orden de 15 atmósferas y hallando después su grado de humedad. Su valor real dependerá del tipo de vegetación que exista sobre el suelo y, sólo a partir de experiencias de marchitamiento de plantas (de ahí su nombre), podrá obtenerse en cada caso.

Humedad.

Uno de los gases que compone la mezcla llamada aire, es el vapor de agua. Su presencia se denomina humedad.

La humedad atmosférica es el elemento esencial en el ciclo hidrológico, pues es fuente de las precipitaciones e influye notablemente en la evapotranspiración.

Evapotranspiración.

Evapotranspiración es el resultado del proceso por el cual, el agua cambia de estado líquido a gaseoso y directamente, o a través de las plantas, vuelve a la atmósfera en forma de vapor, es decir, la evapotranspiración es la suma de la evaporación y transpiración, y el término sólo

es aplicable correctamente a una determinada área de terreno cubierta por vegetación. Cuando ésta no existe, únicamente podrá hablarse de evaporación. Por el contrario, en condiciones naturales y aunque el fenómeno tiene sus características propias, no es posible la ocurrencia exclusiva de transpiración.

Todos los fenómenos que influyen en la evaporación y en la transpiración influirán, por consiguiente, en la evapotranspiración.

La evapotranspiración es, de esta forma, la suma de todas las pérdidas por transformación del agua en vapor, sea cual sea el factor que ha actuado.

Es evidente que este fenómeno es función, esencialmente, de la alimentación en agua y, por consiguiente, del grado de humedad del suelo el cual limita, con frecuencia, su acción. Así, pues, la evapotranspiración real (ER), que aparece en las condiciones naturales de humedad del suelo, está estrechamente vinculada a éste. Por este motivo, ha sido introducida la noción de evapotranspiración potencial (EP), la cual representa la cantidad de agua que resultaría evaporada y transpirada si las reservas en agua fuesen suficientes para compensar las pérdidas máximas. A. Coutagne le ha dado el nombre de "evapotranspiración máxima hidrológica". Cuando el contenido en agua del terreno es suficiente, la evapotranspiración real es igual a la evapotranspiración potencial. En caso de déficit, es inferior.

b) Factores de la evapotranspiración:

- Factores físicos
- Factores fisiológicos

La tasa de evapotranspiración está determinada por el conjunto de factores que regulan la evaporación y transpiración. Por lo tanto, podemos distinguir factores físicos y factores fisiológicos.

Factores físicos.

Los factores físicos se reparten en dos grupos: atmosféricos e hidrológicos. Los factores atmosféricos determinan el poder evaporante en la atmósfera. El poder evaporante de la atmósfera condiciona casi, por sí solo, la evapotranspiración. Es resultado de la acción del déficit higrométrico, de la temperatura, de la velocidad, de la turbulencia del viento y de la presión barométrica. Es preciso añadir a esta lista de factores atmosféricos la influencia indirecta de las variaciones de intensidad de la luz.

Los factores hidrogeológicos condicionan el estado de la superficie evaporante del suelo. La superficie evaporante del suelo interviene a través de sus características físicas, tales como la granulometría, la porosidad, la naturaleza litológica, el manto vegetal y la riqueza en agua. Esta última está determinada por la tasa de humedad en la superficie, fruto de la alimentación a través de las aguas meteóricas o de los mantos subterráneos.

Debemos mencionar también la influencia de los factores geográficos, en particular la altitud y las zonas climáticas, que actúan sobre todo por intermedio de las variaciones de los factores meteorológicos: temperatura, presión barométrica, etc.

Factores fisiológicos.

Los factores fisiológicos que condicionan la evapotranspiración, son aquellos que condicionan directamente la transpiración: especie vegetal, edad, desarrollo del follaje y profundidad de las raíces.

Desde el punto de vista práctico, dado que la evaporación depende, entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir: el contenido de humedad del suelo y el desarrollo vegetal de la planta, Thornthwaite (1948) introduce un nuevo concepto optimizando ambos. Es la llamada evapotranspiración potencial o pérdida por evapotranspiración, en el doble supuesto de un desarrollo vegetal óptimo y una capacidad de campo permanentemente completa. Será, por tanto, un límite superior de la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración y que se conoce con el nombre de evapotranspiración real.

c) Formula de Thornthwaite.

Thornthwaite utiliza, como variable primaria para el cálculo de evapotranspiración potencial, la media mensual de las temperaturas medias diarias del aire. Con ella calcula un índice de calor mensual, según la fórmula:

$$i = (t/5)^{1.514}$$

y halla el índice de calor anual

$$I = \sum i$$

siendo la $\sum i$ la suma de los doce índices mensuales del año considerado.

$$E = 1.6 (10t/i)^a$$

E= Evapotranspiración potencial media en mm/día

t= Temperatura media diaria del aire en °C

i= índice de calor anual

$$a = 675 \times 10^{-9} i^3 - 771 \times 10^{-7} i^2 + 1972 \times 10^{-5} i + 0.49239$$

Los valores de E, calculados para cada mes, son corregidos por medio de un coeficiente K que toma en cuenta el número de días y el número real de horas, entre la salida y la puesta del sol, según la latitud del lugar.

$$ETP = K \times E$$

ETP= Evapotranspiración potencial ajustada en mm/mes

E= Evapotranspiración potencial media

K= Factor que depende de la latitud del lugar.

2.4.1 ESTIMACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION REAL, A PARTIR DE VALORES DE EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL AJUSTADA

La evapotranspiración potencial ajustada es un límite superior de la cantidad de agua que vuelve a la atmósfera. Para determinar la evapotranspiración real debe tenerse en cuenta no sólo ese límite, sino también el agua que, efectivamente, existe en la zona.

El esquema de un balance hídrico, para un determinado intervalo, puede plantearse así:

$$P = ETR + Ex + VR$$

P= Precipitación en mm.

ETR= Evapotranspiración real.

Ex= Excedentes de agua (escorrentía + infiltración) en mm.

VR= Variación en la reserva de agua utilizable.

y con la condición $ETR \leq ETP$

es decir: evapotranspiración real menor o igual que evapotranspiración potencial ajustada.

CAPITULO 3

EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, NUEVO LEON

3.1 LOCALIZACION DEL SITIO

El Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. se encuentra ubicado en el km 10.5 de la carretera Monterrey - Colombia, en los límites de Salinas Victoria y Escobedo, N.L. y entre las siguientes coordenadas, según la carta topográfica escala 1:50,000 de Apodaca, Nuevo León, editada por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) (Figura 2):

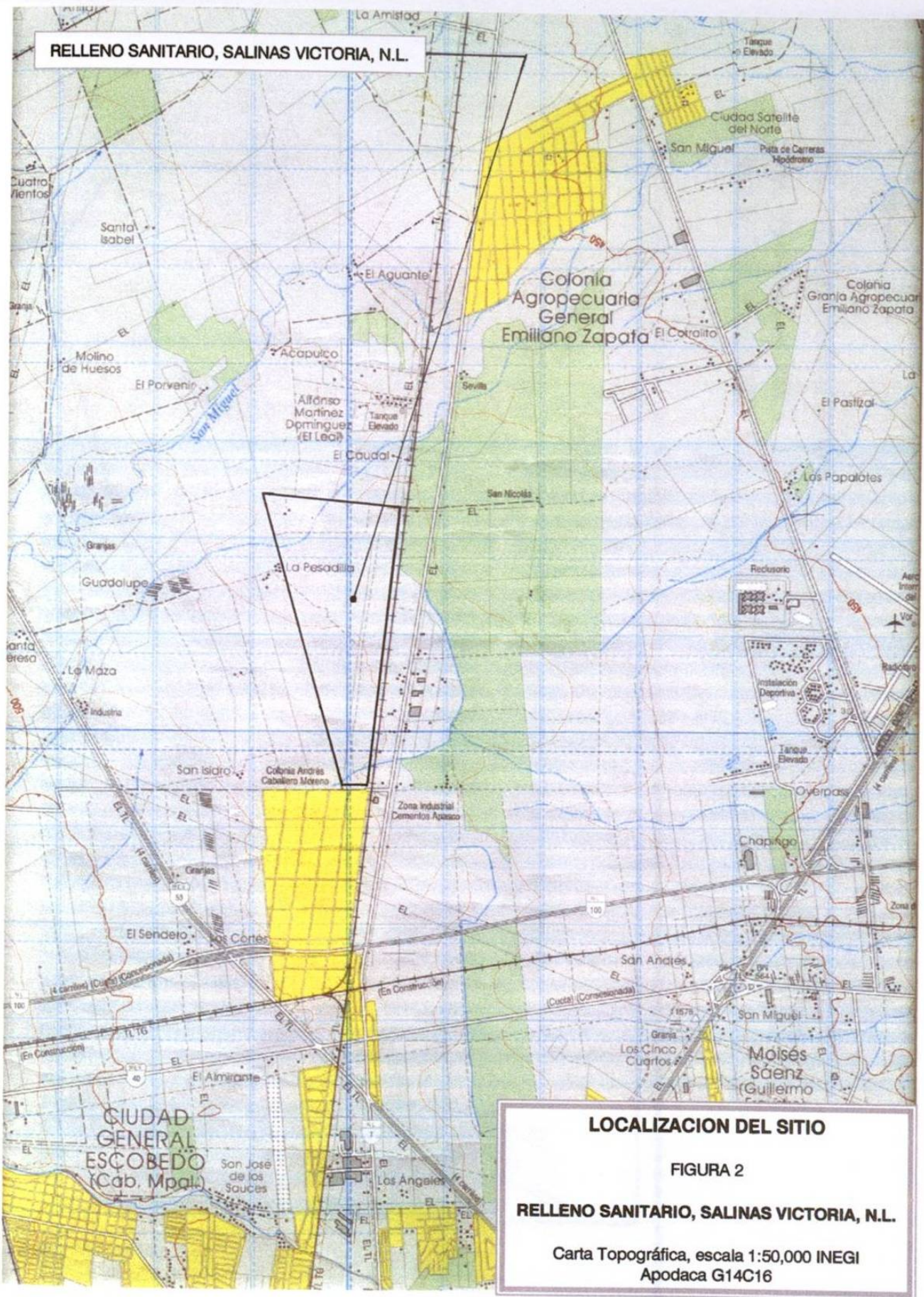
Latitud Norte: 25° 48' 30"

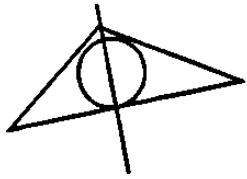
Longitud Este: 101° 18' 10"

3.2 EL AREA DE ESTUDIO

El relleno sanitario cuenta con una superficie de 230 hectáreas, para una vida útil de 17 a 18 años, aproximadamente. El área de estudio abarca solamente la primera etapa del proyecto, la cual comprende de la celda 1 a la 18, las cuales ocupan una superficie de 42 hectáreas (Figura 3). Las operaciones de esta primera etapa empezaron en 1990 y terminaron en 1995.

Se seleccionó esta parte del relleno porque en ella no se instalaron las obras necesarias para la captación y extracción de lixiviados, sistemas de impermeabilización, ni sistemas de captación de biogás.





AREA DE ESTUDIO
TRINCHERAS DE LA 1 A LA 18

F.P.C.C. A LAREDO

RELLENO SANITARIO Salinas Victoria, N.L.

CROQUIS DE LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

FIGURA 3

Ing. Elías Vázquez Godina

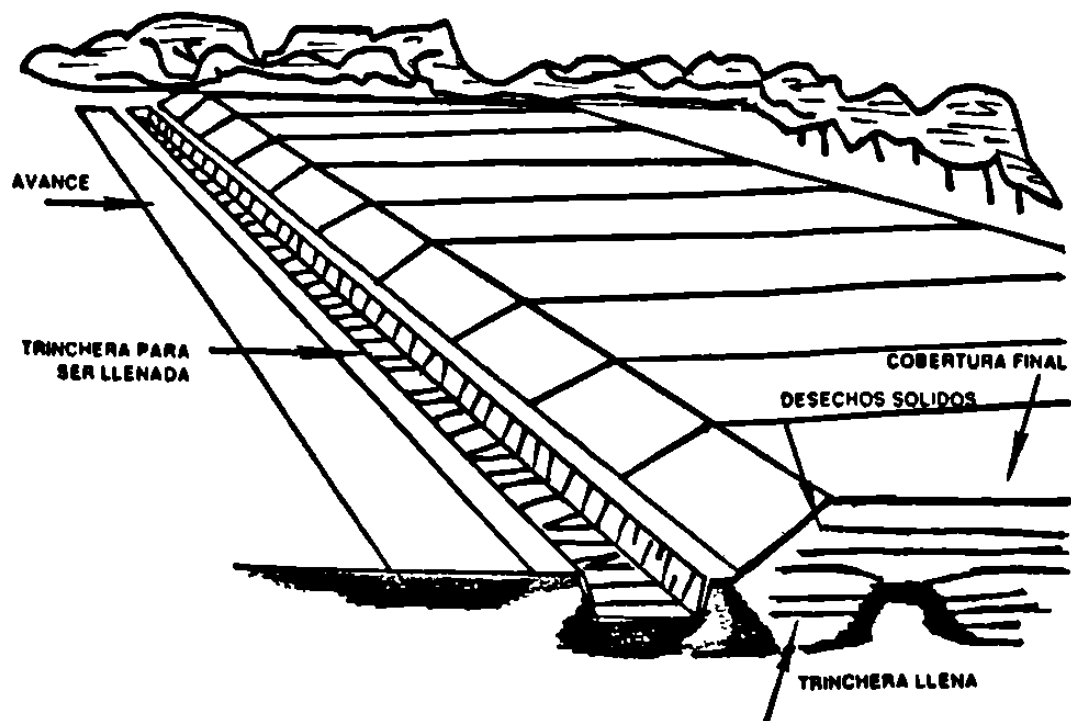


FIGURA 4 Representación esquemática de la construcción del Relleno Sanitario utilizando los métodos de Área y Trinchera.

Residuos Sólidos Municipales. 1991 Programa de Salud Ambiental. OPS, OMS

3.3 CARACTERISTICAS GENERALES DEL RELLENO SANITARIO.

El relleno sanitario fue diseñado para recibir los desechos sólidos generados en el Area Metropolitana de Monterrey e inició sus operaciones en 1990, recibándose aproximadamente 1300 ton. de residuos sólidos por día, incrementando esta cantidad con el transcurso de los años. En total, en el área de estudio, se recibieron 6.5 millones de toneladas de residuos sólidos en 5 años, lo que da un total de 3,562 Ton. de residuos por día.

Cabe aclarar que, en esta primera etapa, no sólo se recibió la basura generada en ese momento en el Area Metropolitana de Monterrey, sino que se recibieron desechos sólidos que se encontraban en los diferentes tiraderos, a cielo abierto, principalmente el que estaba ubicado en la antigua planta de residuos sólidos, en el municipio de Monterrey.

El Método de construcción utilizado para el relleno sanitario es una combinación de área y trinchera. Mediante esta combinación, se utiliza primero el de trinchera y posteriormente el de área en la parte superior. Con la utilización de este método aumenta la vida útil del relleno sanitario. (Figura 4).

Las medidas de una trinchera "tipo" son de 50 metros de ancho por 300 metros de largo, 7 metros de profundidad y 18 metros de altura, a partir del nivel natural del terreno. Cada trinchera con un total de 25 metros, aproximadamente.

Los residuos fueron cubiertos diariamente con una capa de arcilla de 15 cm de espesor colocándose, además, una cubierta intermedia de 30 cm. y una cubierta final de 60 cm de espesor.

3.4 COMPOSICION DE LOS RESIDUOS SOLIDOS QUE SE RECIBEN EN EL RELLENO SANITARIO¹.

De acuerdo con las cifras de SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social), el 53% de la basura generada en México es orgánica y el restante 47%, es inorgánica.

Por su origen, el 60% de los residuos provienen de las casas, el 17% de la industria, el 18% del comercio, el 3% de los servicios y el 2% de otras fuentes (escombros, materiales de construcción, etc.).

La caracterización de los residuos que llegan al relleno sanitario de Salinas Victoria, N.L., provenientes de los diferentes municipios del área Metropolitana de Monterrey, es la siguiente: residuos alimenticios, 38.4%; plásticos de película, 6.57%; otros plásticos, 5.0%; vidrio, 4.28%; residuos de jardinería, 4.0%; papel de archivo, 3.11%; periódico, 3.06%; cartón, 2.42%; aluminio, 0.85%; entre otros materiales como fierro, pañales desechables, madera, artículos de piel, trapos viejos, etc.

¹ Comité de Reciclaje del Estado de Nuevo León. Programa "Nuevo León Recicla".

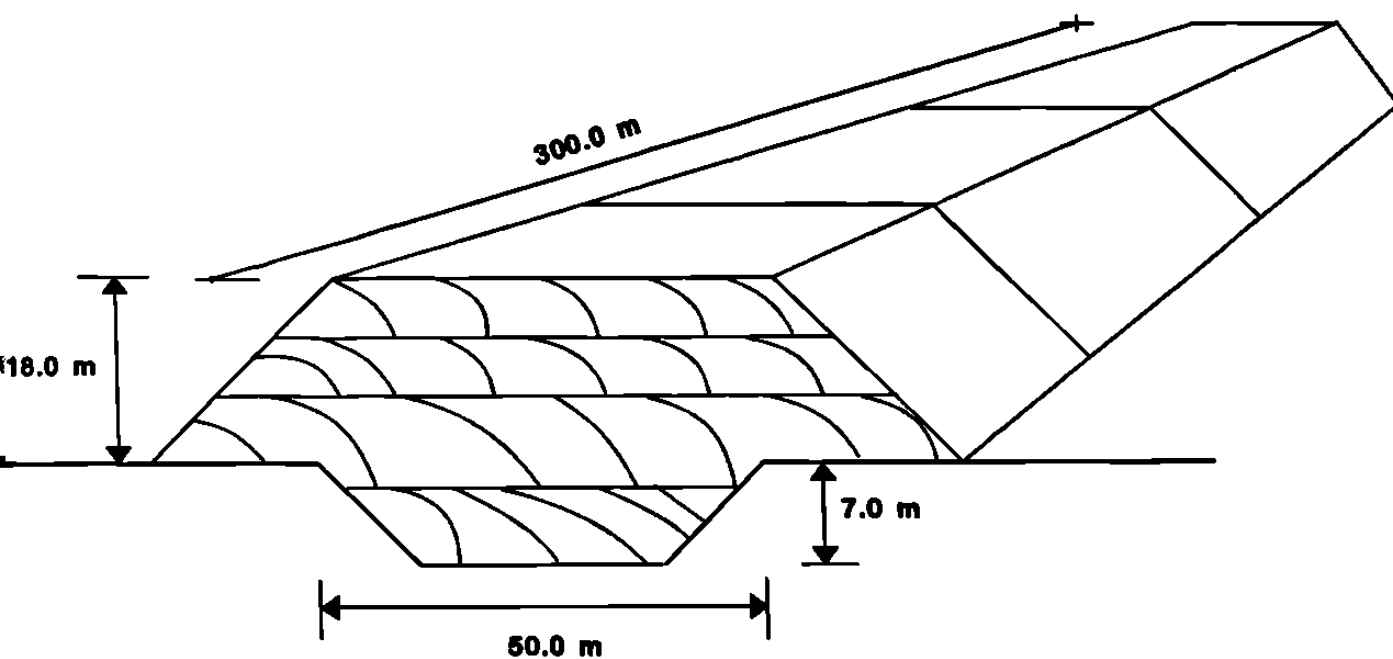


FIGURA 5 Trinchera Tipo

Ing. Elías Vázquez Godina

3.5 RASGOS FISICOS DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.5.1 GEOLOGIA¹

El terreno está ubicado en una planicie que se extiende al norte de la ciudad de Monterrey, N.L., a un costado de la carretera a Colombia. Fisiográficamente, esta planicie forma parte de la Provincia llamada Llanura Costera del Golfo Norte, que penetra en forma digitada entre las estribaciones postreras de la Provincia de la Sierra Madre Oriental.

Localmente, se constituye en un valle muy abierto de pendientes suaves, cubierto, mayoritariamente, por materiales finos, producto de la erosión de las montañas aledañas; en donde las corrientes superficiales fueron labrando sus cauces y propiciando la acumulación de sus aportes limosos y arcillosos.

Así, las modalidades de disección fluvial pasaron por diferentes fases de incisión, en donde los procesos de arroyamiento, en sus modalidades lineal, laminar y difusa, comenzaron con el entallado de cauces lineales en la superficie del sustrato o base rocosa lutítica campano-mastrichtense (Ks) de la Formación Méndez, que pasó de ser allanada a irregular. Más tarde empezaron las fases de aluvionamiento o acumulación y, con ello, la construcción de las llanuras aluviales, entre incisiones de lechos de arroyos intermitentes sinuosos y entrelazados llamados RAMBLAS.

¹ Estudio Geológico realizado por el Departamento de Geotecnia del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL para SIMEPRODE.(1997)

Actualmente, la llanura o planicie donde se encuentra el terreno en estudio está delimitada por dos grandes arroyos del tipo rambla. Al norte se encuentra el Río Salinas y al sur el Río Pesquería; por lo general, los ríos o arroyos suelen seguir las grandes líneas de dislocación disyuntiva (fallas geológicas); sin embargo, éstos se encuentran a una distancia tal del terreno que no afectan su seguridad geocológica.

Evolución y configuración geológica regional.

A medida que ocurría el levantamiento de la Sierra Madre Oriental por procesos endógenos, se empezaron a activar, también, las acciones de los procesos exógenos, tales como la erosión en el campo de las exposiciones rocosas abiertas, de las series mesozoicas; las cuales fueron transportadas corriente abajo y depositadas en terrenos deprimidos, que actuaron como cuencas o de sedimentación continental, que se han denominado "Planicies de Rellenamiento".

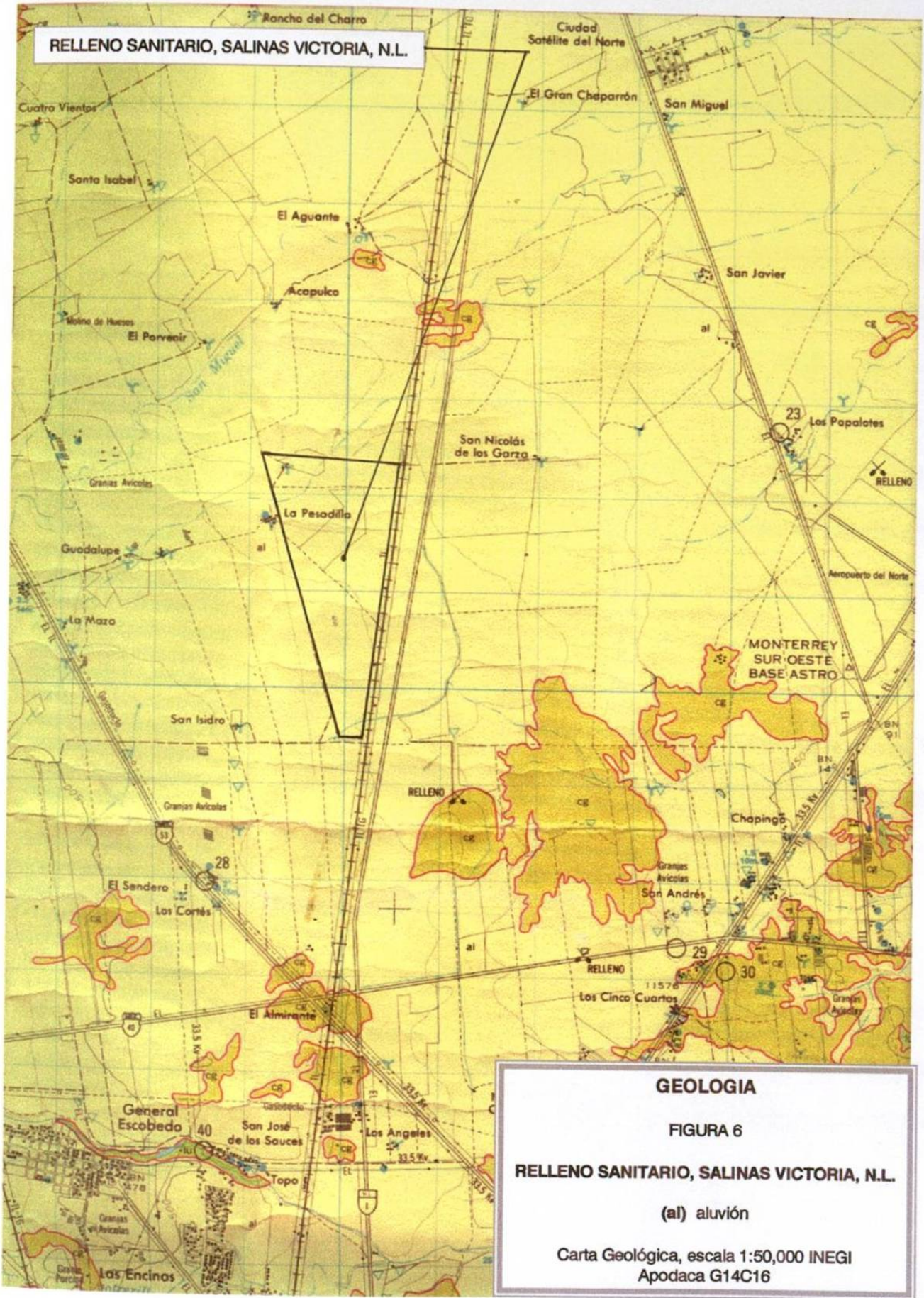
La planicie, como forma de acumulación, se compone de depósitos aluviales, coluviales, deluviales e iluviales y en menor proporción los eólicos. (Figura 6). Estos depósitos los hay muy recientes, casi contemporáneos, pero también pueden ser antiguos y encontrarse fosilizados. En fin, que es el territorio en donde, en tiempos pretéritos, los procesos de acumulación de sedimentación dominaron sobre los de salida y transporte de los agentes erosivos, de manera que la estructura general constituía un modelo o paisaje de aplanamiento llano y con mínima pendiente. Esto difiere de los procesos exógeno-denudatorios actuales, que son de naturaleza erosiva y, por lo tanto, están remodelando las formas después de su acumulación.

Definición y carácter de la estructura geológica local.

Localmente, el terreno estudiado consiste de un manto de sedimentos aluviales, con un espesor que oscila entre los 20 y 14 metros de profundidad, que descansa sobre un estrato o base rocosa de lutitas campano-mastrichtenses (Ks) pertenecientes a la Formación Méndez. En la cabeza de roca, hacia el contacto con el manto aluvial, la roca se muestra con distintos grados de intemperismo que van, desde una condición de suelo arcilloso, en la parte superior, hasta la de lutita decolorada y fracturada, hacia el interior del macizo rocoso.

En el manto de aluvionamiento del terreno estudiado existen dos niveles o etapas de acumulación de sedimentos aluviales. Al primer nivel de aluvionamiento se le llamará nivel basal, y es el que se encuentra adosado al sustrato rocoso lutítico y consiste de rocas detrítico-clásticas que corresponden a las clases granulométricas de las ruditas (>2 mm), las arenitas (entre 1/16 y 2 mm) y la fracción gruesa de las lutitas (<1/16 de mm).

Hacia la base de este primer nivel de aluvionamiento existe un lecho de gravas con diferentes grados de consolidación, destacándose algunos lentes y lentejones de conglomerado tipo pudinga. Hay que señalar el hecho de que este lecho de gravas se encuentra empacado por una matriz arcillo-limosa cuya permeabilidad, debida a la porosidad efectiva primaria, ha decaído hasta llegar a ser prácticamente impermeable, con respecto a su calidad de gravas; sin embargo, podría presentarse algo de permeabilidad, por fisuras o grietas en la masa rocosa.



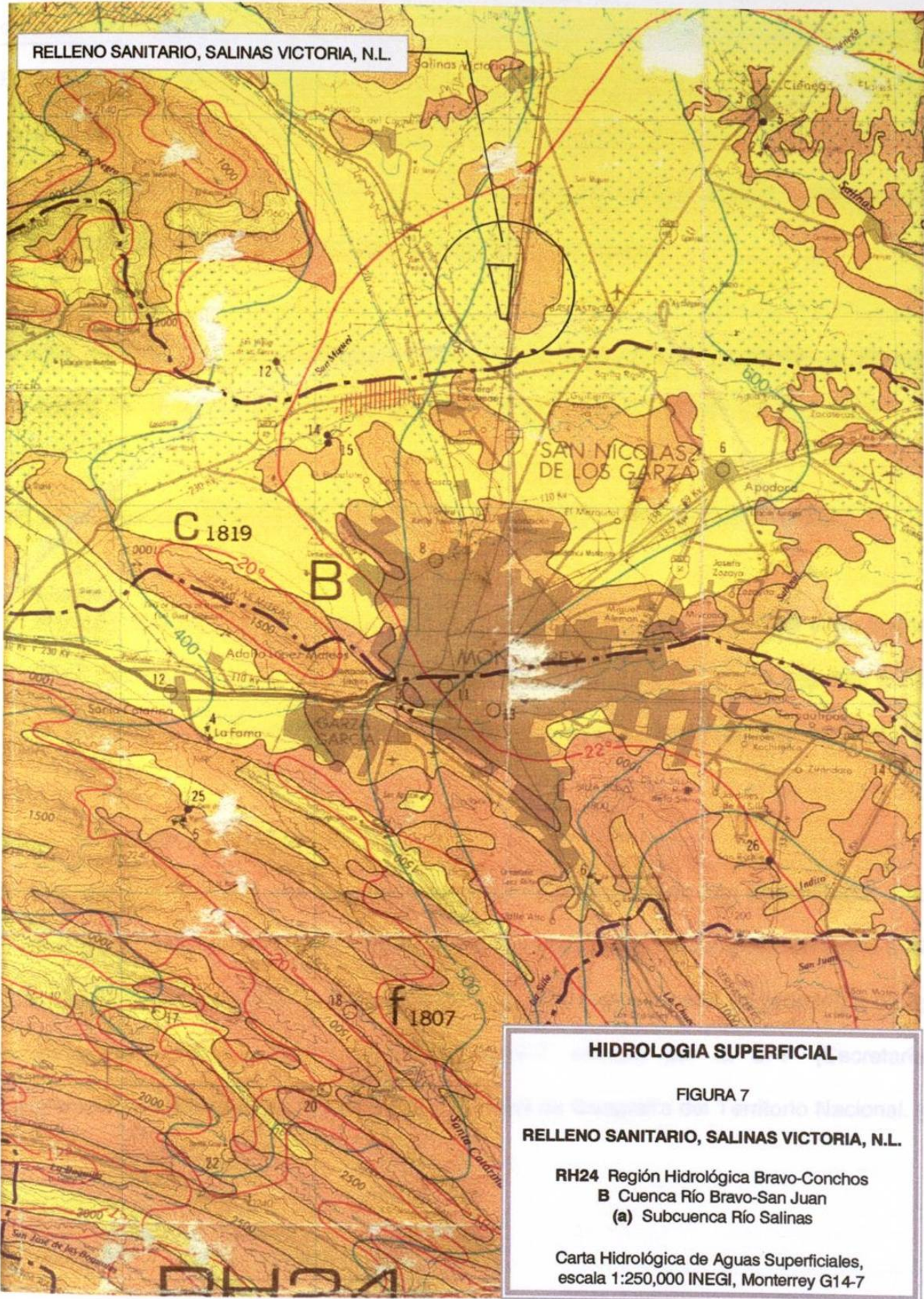
Descansando sobre el lecho de gravas, se tiene un lecho de limo arcilloso café claro consolidado, y también con valores bajos de permeabilidad.

El segundo nivel de aluvionamiento es el más joven y superficial, ya que descansa sobre el primero, y está integrado por un lecho de arcilla con intercalaciones de limo, ambos calichosos en la base de este segundo nivel. Coronando a estas arcillas, y en el nivel de superficie, se presenta un lecho delgado de arcilla limosa con algo de materia orgánica. El segundo nivel presenta la existencia de un paleocanal o arroyo fósil, es decir, que durante la fase de rellenamiento del segundo nivel existió un arroyo que se encajó en los sedimentos del primer nivel de aluvionamiento, disectando sobre este proceso todo el lecho limoso y llegando a tajarse algo del lecho de gravas del nivel de aluvionamiento base.

Este cauce fósil se localiza hacia el oeste-noreste del terreno estudiado y el que, además, en el nivel de superficie coincide con el trazo de un arroyo que actualmente discurre sobre este terreno y es afluente del arroyo San Miguel, que cruza la llanura más hacia el norte.

3.5.2 HIDROLOGIA.

La zona de estudio se ubica dentro de la región Bravo-Conchos, Región Hidrológica 24 (RH24), perteneciente a la vertiente del Golfo, y en la cuenca del Río Bravo-San Juan (B) la cual tiene un área aproximada de 19,804.91 km, siendo una de sus corrientes principales el río San Juan, segundo efluente de importancia del río Bravo.



**CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS
 EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L.**

Específicamente, el sitio en estudio se localiza en la subcuenca hidrológica (a) del río Salinas con un área aproximada de 1700 km., según la carta Hidrológica de Aguas Superficiales escala 1:250,000 Monterrey G14-7, editada por la SPP (Secretaría de Programación y Presupuesto) y la Dirección General de Geografía del Territorio Nacional. (Figura 7)

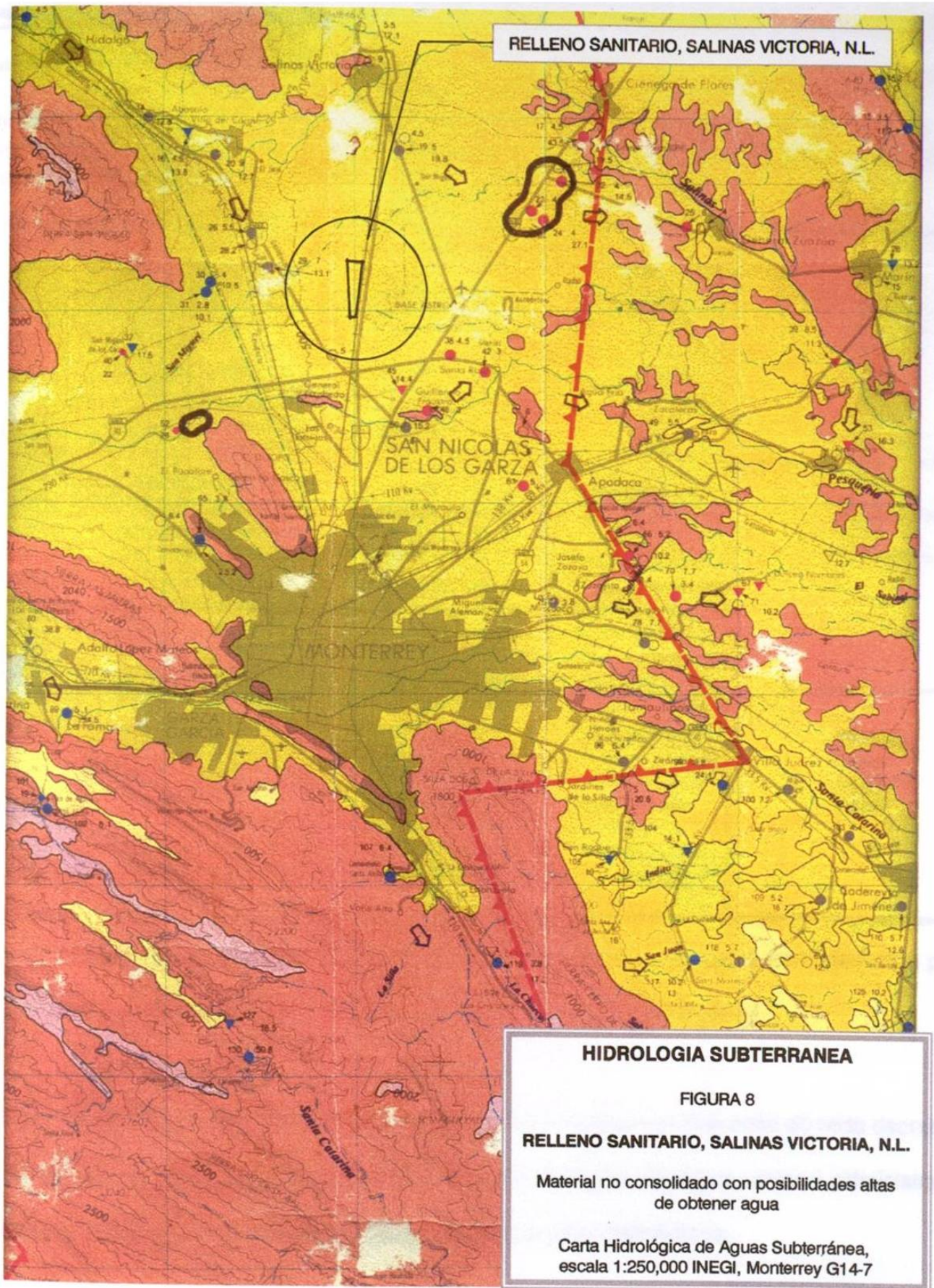
El agua de la región tiene la tendencia natural de fluir hacia el Golfo de México; el drenaje en las sierras es de tipo rectangular, mientras que en los valles es paralelo y subparalelo.

Los escurrimientos se presentan con valores de coeficiente que varían de 0 a 5%.

En el predio se definen tres escurrimientos intermitentes: al norte se encuentra el río Salinas y el arroyo San Miguel; el primero, a una distancia aproximada de 15 km y el segundo a 7.5 km del predio; y al sur se encuentra el río Pesquería, a una distancia aproximada de 5 km.

3.5.3 GEOHIDROLOGIA.

El sitio está localizado en una zona de materiales no consolidados, con posibilidades altas de obtener agua, compuesta principalmente por depósitos aluviales de composición areno-arcillosa que rellenan, por lo general, estructuras sinclinales, ello según la carta de Hidrología de Aguas Subterráneas, escala 1:250,000 Monterrey G14-7, editada por la SPP (Secretaría de Programación y Presupuesto) y la Dirección General de Geografía del Territorio Nacional. (Figura 8).



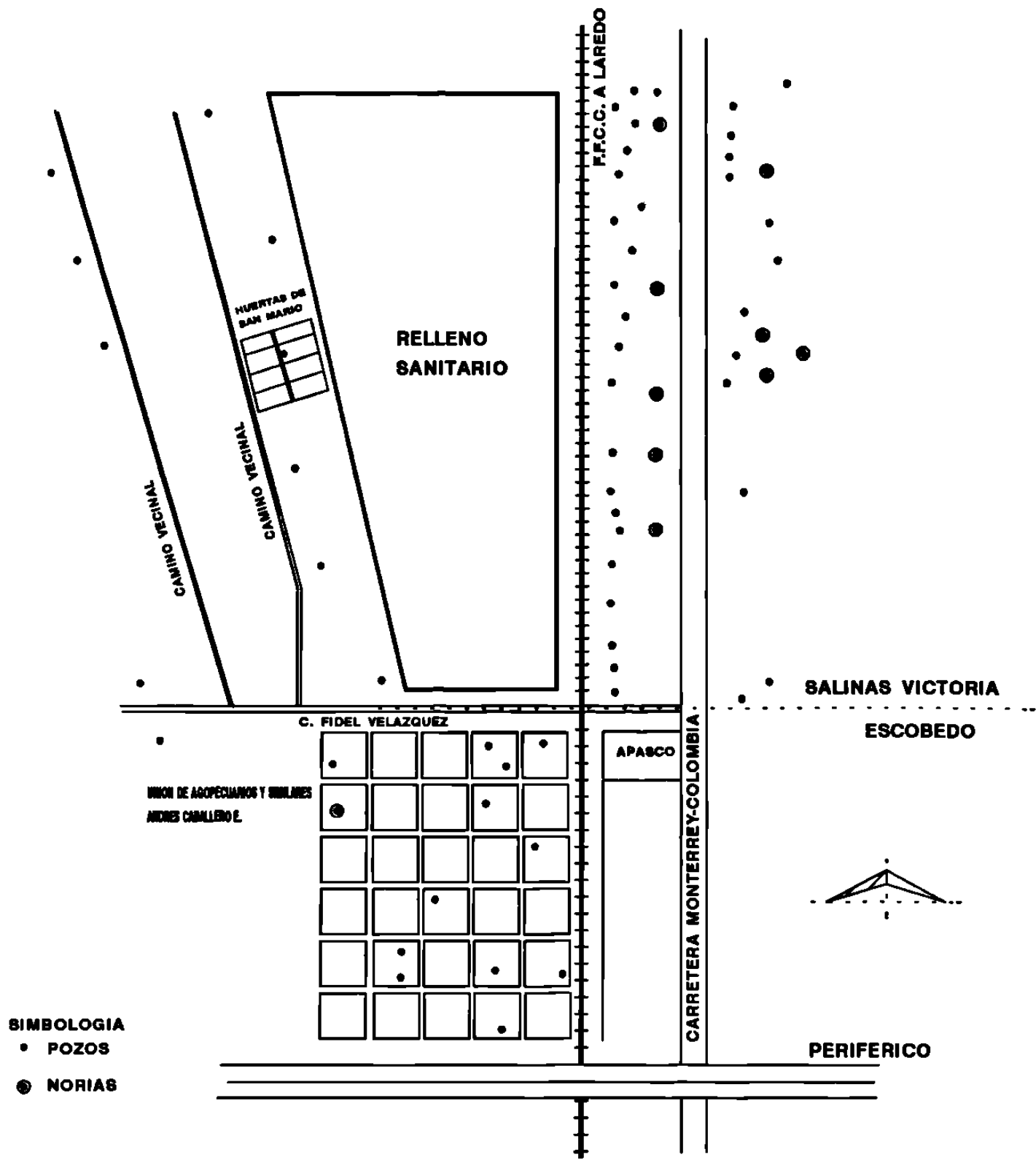
La dirección del flujo subterráneo es similar al que presentan los escurrimientos superficiales.

De acuerdo con los estudios realizados por el Departamento de Geotecnia del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL (1997), se pudieron establecer dos sistemas someros de agua subterránea que se indican a continuación:

Sistema	Tipo de acuífero	Fronteras en el subsuelo	Calidad química Schoellberkalov
1	Acuífero libre de manto en conglomerados y gravas	De 11.8 a 16.1 m	Bicarbonatada-cálcica Agua alcalina
2	Acuífero libre en fracturas de roca lutíticas	De 30.0 a 32.0 m	Sulfatada-Cálcica Agua no alcalina

En la zona existe una gran cantidad de norias y pozos que son utilizados principalmente para abrevadero; los gastos son muy pobres y varían de 0.1 a 0.5 L/s. (Figura 9).

Es de importancia mencionar que el sitio se encuentra localizado en una zona de veda decretada el 17 de julio de 1951 y controlada por la Comisión Nacional del Agua, órgano administrativo desconcentrado de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.



SIMBOLOGIA
 • POZOS
 ● NORIAS

CROQUIS DE UBICACION DE POZOS Y NORIAS

Ing. Elías Vázquez Godina

FIGURA 9

3.5.4 CLIMATOLOGIA.

Las sierras localizadas al sur del AMM funcionan como una barrera que detiene la humedad proveniente del Golfo de México; esto trae como consecuencia una escasez de humedad que propicia, en toda el Area Metropolitana de Monterrey, un clima de árido a semiárido.

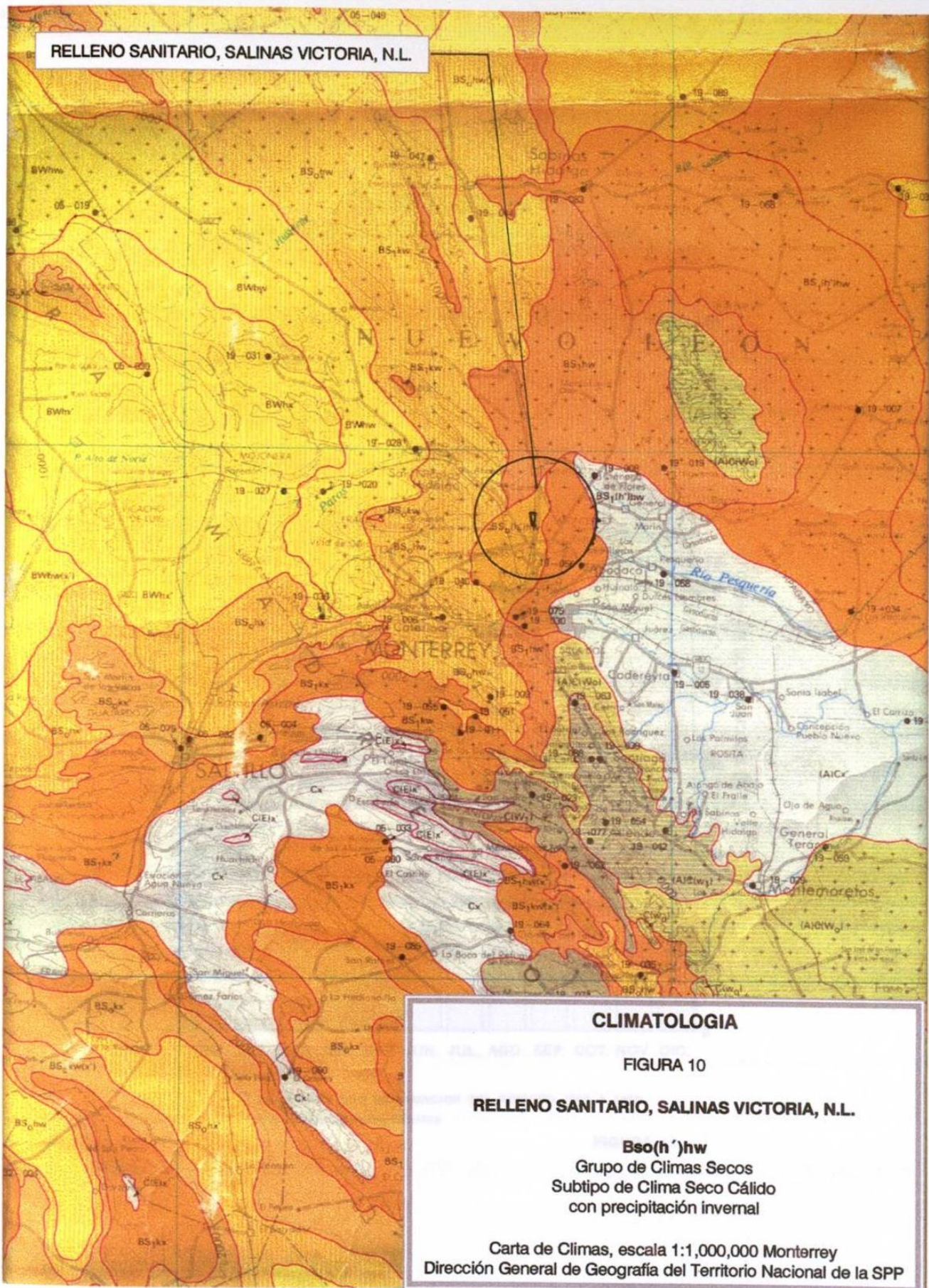
Según la carta de climas escala 1:1,000,000, editada por la Secretaría de Programación y Presupuesto, en la zona de estudio prevalece el tipo de clima que, de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García para la República Mexicana, corresponde al $BS_0(h')hw$. (Figura 10).

Climas secos.

Los climas dominantes de la llanura costera del Golfo Norte son los semicálidos subhúmedos, aunque en un área reducida del noreste se presenta el clima seco.

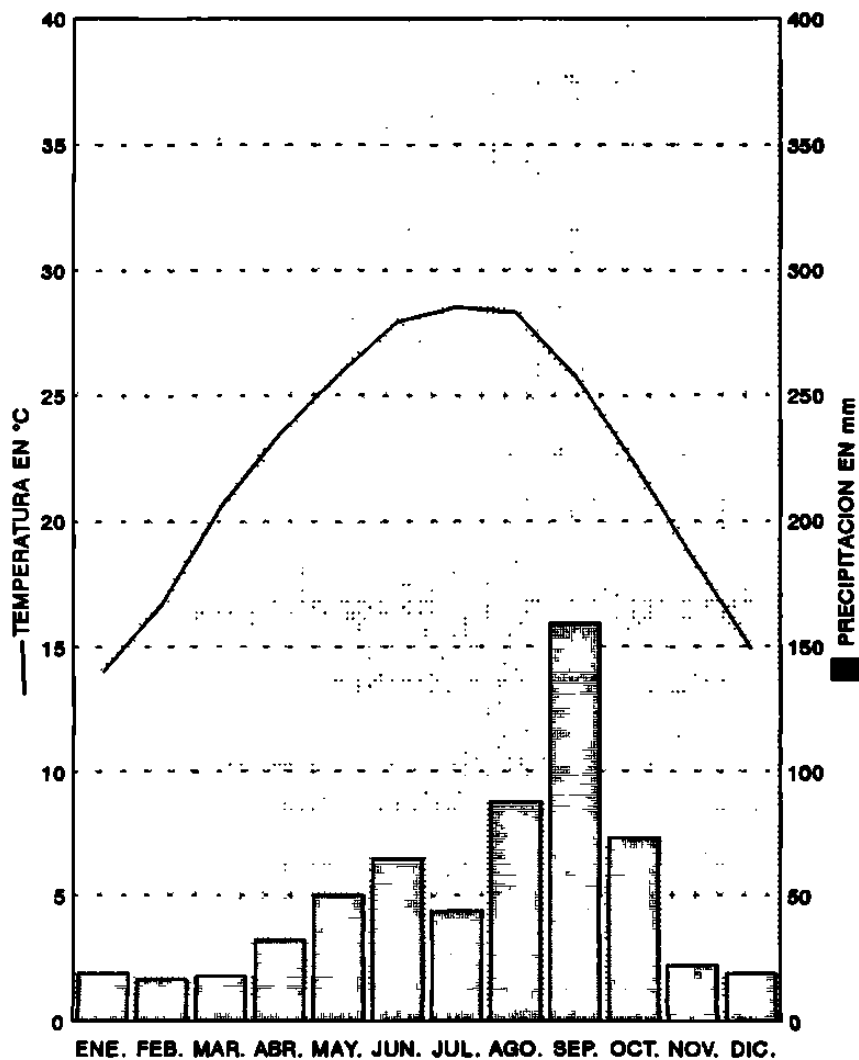
Los climas secos se distribuyen en el extremo norte del estado y se reconocen principalmente debido a que la evaporación excede a la precipitación.

Estos tipos de climas se caracterizan por la baja humedad y la escasa precipitación ocasionada, entre otros factores, por la influencia de vientos en la zona. Se exceptúa de esta situación la porción sur en donde, debido a la influencia de las masas de aire húmedo, el clima es semicálido



CLIMOGRAMA^a

ESTACION: OBSERVATORIO METEOROLOGICO MONTERREY



^a ELABORADO CON INFORMACION DEL PERIODO 1968 A 1988
Ing. Elías Vázquez Godínez

FIGURA 11

subhúmedo. Las lluvias se presentan en verano y son escasas el resto del año. Hay climas secos muy cálidos, hasta secos con temperaturas muy frías.

BS_o(h')hw

Grupo de climas secos B. Tipo de climas seco (S_o). Subtipo de clima seco cálido [(h')], precipitación invernal (w). A este clima se le conoce también como el clima de estepa; presenta una temperatura media anual de 22°C y una temperatura inferior a los 18°C en el mes más frío; su régimen de lluvias es de verano y el porcentaje de lluvias invernal respecto al total anual está entre 5 y 10.2% (w).

La precipitación total anual es de 300 a 600 mm y una temperatura media anual de 18 a 22°C. Asimismo, la precipitación mensual máxima ocurre en septiembre, con 150 y 160 mm, y en los meses de febrero y marzo presentan menos lluvia con 16 y 17 mm. De igual manera, en el mes de julio se da la temperatura media más alta, en un intervalo entre 28 y 29°C, y la mínima en enero o diciembre, con 14 y 15°C. (Figura 11).

Comportamiento de los vientos²

En el valle intermontano, donde se asienta el área metropolitana de Monterrey, la influencia orográfica de la Sierra Madre Oriental, así como las estructuras geológicas de los cerros de Las Mitras, La Silla, el Topo Chico, al igual que la Sierra del Fraile y San Miguel, ejercen características especiales sobre el comportamiento de los vientos, de tal manera que, al año, se

² Síntesis geográfica del Estado de Nuevo León. INEGI

tienen bien definidos dos cambios en la dirección de los vientos dominantes. Regularmente, durante los meses de primavera y verano, se presenta una dirección del viento predominante este-oeste, que es originado por lo que se denominan los vientos Huastecos, mientras que durante los meses de otoño e invierno, la dirección del viento predominante es del norte hacia el sureste, intensificándose en los meses de febrero y marzo.

Intemperismos severos³

En cuanto a los intemperismos severos, éstos se encuentran constituidos por:

- **Heladas:** Las cuales se presentan en un rango de 0 a 20 días durante el año.

- **Granizadas** De distribución irregular ya que no guardan un patrón de comportamiento definido; se presentan, en general, con una ocurrencia de 0 a 2 días durante el año. Su incidencia está asociada a los primeros meses del período de lluvias: abril, mayo y junio.

- **Huracanes:** Con frecuencia de uno cada tres años, en los últimos 100 años.

³ Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León. Secretaría de Programación y Presupuesto. México. 1986

3.6 CALCULO DE LOS PARAMETROS PARA DETERMINAR LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS.

3.6.1 CALCULO DE LA ESCORRENTIA (Por: Ing. Elías Vázquez Godina).

Para calcular la escorrentía en la zona del relleno, se tomó un coeficiente de escurrimiento del 30%¹ considerando que la cubierta final es de arcilla compactada y con una pendiente del 2%².

Los datos de precipitación fueron tomados de la estación "Observatorio Meteorológico Monterrey" controlada por la Comisión Nacional del Agua, ubicada en el municipio de San Nicolás de los Garza, N.L. A continuación se presentan los cálculos de 1990 a 1998.

Tabla 3. Cálculo de la escorrentía
(Ing. Elías Vázquez Godina)

Año: 1990

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	4.9	1.47
Febrero	-	0
Marzo	43.7	13.11
Abril	29.1	8.79
Mayo	19.1	5.73
Junio	30.2	9.06
Julio	27.5	8.25
Agosto	60.0	18
Septiembre	157.5	47.25
Octubre	95.6	28.68
Noviembre	0.9	0.27
Diciembre	-	0

Todas las unidades están en mm

¹ Apuntes de estudio para la clase de Alcantarillado Sanitario. Preparado por: Ing. Horacio González Santos

² Fuente: SIMEPRODESO

Tabla 3. Cálculo de la escorrentía (Continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

Año: 1991

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	10.9	3.27
Febrero	6.7	2.01
Marzo	8.0	2.4
Abril	26.6	7.98
Mayo	55.6	16.68
Junio	88.3	26.49
Julio	19.7	5.91
Agosto	6.2	1.86
Septiembre	118.0	35.40
Octubre	5.7	1.71
Noviembre	34.1	10.23
Diciembre	61.5	18.45

Año: 1992

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	74.9	22.47
Febrero	15.7	4.71
Marzo	18.7	5.61
Abril	25.4	7.62
Mayo	124.8	37.44
Junio	2.6	0.78
Julio	6.2	1.86
Agosto	57.5	17.25
Septiembre	44.9	13.47
Octubre	33.6	10.08
Noviembre	22.0	6.6
Diciembre	11.4	3.24

Todas las unidades están en mm

Tabla 3. Cálculo de la escorrentía (Continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

Año: 1993

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	38.5	11.55
Febrero	21.5	6.45
Marzo	20.6	6.18
Abril	10.0	3.0
Mayo	95.0	28.5
Junio	267.0	80.10
Julio	0.1	0.30
Agosto	10.9	3.27
Septiembre	222.1	66.63
Octubre	21.0	6.30
Noviembre	13.0	3.90
Diciembre	2.5	0.75

Año: 1994

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	45.3	13.59
Febrero	8.1	2.43
Marzo	45.0	13.5
Abril	8.6	2.58
Mayo	61.5	18.45
Junio	33.2	9.96
Julio	7.5	2.25
Agosto	27.7	8.31
Septiembre	238.3	71.49
Octubre	27.6	8.28
Noviembre	28.9	8.67
Diciembre	33.4	10.02

Todas las unidades están en mm

Tabla 3. Cálculo de la escorrentía (Continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

Año: 1995

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	9.3	2.79
Febrero	8.6	2.58
Marzo	17.6	5.28
Abril	4.4	1.32
Mayo	59.7	17.91
Junio	18.6	5.58
Julio	3.6	1.08
Agosto	184.7	55.41
Septiembre	20.8	2.64
Octubre	7.1	2.13
Noviembre	26.7	8.01
Diciembre	12.2	3.66

Año: 1996

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	13.8	4.14
Febrero	0.2	0.06
Marzo	0.0	0.0
Abril	13.1	6.55
Mayo	2.5	0.75
Junio	52.8	15.84
Julio	5.6	1.68
Agosto	304.6	91.38
Septiembre	6.4	1.92
Octubre	84.5	25.35
Noviembre	9.6	2.88
Diciembre	1.9	0.57

Todas las unidades están en mm

Tabla 3. Cálculo de la escorrentía (Continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

Año: 1997

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	11.9	3.57
Febrero	25.8	7.74
Marzo	85.2	25.56
Abril	96.8	29.04
Mayo	86.6	25.98
Junio	58.1	17.43
Julio	5.1	1.53
Agosto	0.8	0.24
Septiembre	70.6	21.18
Octubre	141.2	42.36
Noviembre	25.2	7.56
Diciembre	4.6	1.38

Año: 1998

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	0.1	0.03
Febrero	16.6	4.98
Marzo	27.1	8.13
Abril	15.2	4.56
Mayo	-	0
Junio	32.3	9.69
Julio	5.3	1.59
Agosto	66.5	19.95
Septiembre	144.5	43.35
Octubre	70.5	21.15
Noviembre	55.0	16.50
Diciembre	-	0

Todas las unidades están en mm

3.6.2 CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL AJUSTADA

(Por: Ing. Elías Vázquez Godina)

Para el cálculo de la Evapotranspiración Potencial Ajustada se utilizó la fórmula de Thornhwaite y las temperaturas fueron tomadas de la Estación "Observatorio Meteorológico Monterrey", ubicada en el municipio de San Nicolás de los Garza, N.L., controlada por la Comisión Nacional del Agua. El coeficiente K es un valor que toma en cuenta el número de días y el número real de horas entre la salida y la puesta del sol, según la latitud del lugar. El sitio tiene una latitud de 25°48'30". A continuación se presentan las tablas del resumen de los cálculos de 1990 a 1998.

En donde:

T= Temperatura media del aire en °C

i= Índice de calor anual= $(T/5)^{1.514}$

a= $675 \times 10^{-9} i^3 - 771 \times 10^{-7} i^2 + 1972 \times 10^{-5} i + 0.49239$

ET= Evapotranspiración potencial media= $1.6(10T/i)^a$

ETP= Evapotranspiración potencial ajustada= ET(K)

K= Factor que depende de la latitud del lugar y del mes del año

Tabla 4. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial Ajustada
(Ing. Elías Vázquez Godina)

Año: 1990

MES	T°C	i	a	ET	K	ETP
Enero	13.5	4.52	0.58	11.47	0.925	10.6
Febrero	16.0	5.85	0.61	11.85	0.885	10.5
Marzo	20.6	8.59	0.66	12.88	1.030	13.3
Abril	23.4	10.43	0.69	13.71	1.065	14.6
Mayo	25.3	11.74	0.71	14.34	1.155	16.6
Junio	27.5	13.32	0.74	15.17	1.140	17.3
Julio	28.1	13.77	0.75	15.41	1.170	18.0
Agosto	28.2	13.84	0.75	15.45	1.125	17.4
Septiembre	25.7	12.02	0.72	14.49	1.025	14.9
Octubre	22.0	9.49	0.67	13.28	0.990	13.1
Noviembre	18.6	7.36	0.63	12.39	0.950	11.8
Diciembre	14.5	5.04	0.59	11.61	0.885	10.4

Año: 1991

MES	T°C	i	a	ET	K	ETP
Enero	13.8	4.67	0.58	11.51	0.925	10.6
Febrero	17.4	6.65	0.62	12.12	0.885	10.7
Marzo	24.4	11.11	0.70	14.03	1.030	14.5
Abril	26.2	12.38	0.73	14.67	1.065	15.6
Mayo	26.9	12.88	0.74	14.94	1.155	17.3
Junio	28.7	14.22	0.76	15.66	1.140	17.9
Julio	26.8	12.81	0.73	14.90	1.170	17.4
Agosto	29.4	14.75	0.77	15.96	1.125	18.0
Septiembre	24.0	10.83	0.70	13.90	1.025	14.2
Octubre	20.5	8.53	0.66	12.86	0.990	12.7
Noviembre	16.2	9.96	0.61	11.89	0.950	11.3
Diciembre	15.0	5.31	0.59	11.68	0.885	10.5

Tabla 4. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial Ajustada (continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

Año: 1992

MES	T°C	i	a	ET	K	ETP
Enero	12.3	3.92	0.57	11.35	0.925	10.5
Febrero	20.0	8.21	0.65	12.73	0.885	11.3
Marzo	20.8	8.72	0.66	12.94	1.030	13.3
Abril	22.1	9.56	0.67	13.31	1.065	14.2
Mayo	23.6	10.56	0.69	13.77	1.155	15.9
Junio	29.6	14.90	0.77	16.05	1.140	18.3
Julio	29.1	14.52	0.76	15.83	1.170	18.5
Agosto	28.1	13.77	0.75	15.41	1.125	17.3
Septiembre	26.5	12.59	0.73	14.78	1.025	15.2
Octubre	23.5	10.49	0.69	13.74	0.990	13.6
Noviembre	16.8	6.30	0.61	12.00	0.950	11.4
Diciembre	15.5	5.58	0.60	11.77	0.885	10.58

Año: 1993

MES	T°C	i	a	ET	K	ETP
Enero	14.9	5.25	0.59	11.67	0.925	10.8
Febrero	17.2	6.53	0.62	12.08	0.885	10.7
Marzo	20.2	8.34	0.65	12.78	1.030	13.2
Abril	23.8	10.70	0.70	13.83	1.065	14.7
Mayo	25.2	11.67	0.71	14.31	1.155	16.5
Junio	26.4	12.52	0.73	14.75	1.140	16.8
Julio	28.1	13.77	0.75	15.41	1.170	18.0
Agosto	28.8	14.29	0.76	15.70	1.125	17.7
Septiembre	25.2	11.67	0.71	14.31	1.025	14.7
Octubre	21.9	9.43	0.67	13.25	0.990	13.1
Noviembre	16.9	6.36	0.61	12.02	0.950	11.4
Diciembre	16.1	5.91	0.61	11.87	0.885	10.6

Tabla 4. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial Ajustada (continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

Año: 1994

MES	T°C	i	a	ET	K	ETP
Enero	15.4	5.52	0.60	11.75	0.925	10.9
Febrero	16.2	5.59	0.61	11.89	0.885	10.5
Marzo	20.6	8.59	0.66	12.88	1.030	13.3
Abril	23.4	10.43	0.69	13.71	1.065	14.6
Mayo	25.8	12.09	0.72	14.52	1.155	16.8
Junio	28.3	13.92	0.75	15.49	1.140	17.7
Julio	29.4	14.75	0.77	15.96	1.170	18.7
Agosto	27.9	13.62	0.75	15.33	1.125	17.2
Septiembre	25.2	11.67	0.71	14.31	1.025	14.7
Octubre	23.4	10.43	0.69	13.71	0.990	13.6
Noviembre	20.8	8.72	0.66	12.94	0.950	12.3
Diciembre	16.4	6.08	0.61	11.93	0.885	10.7

Año: 1995

MES	T°C	i	a	ET	K	ETP
Enero	15.1	5.36	0.60	11.70	0.925	10.8
Febrero	18.6	7.36	0.63	12.39	0.885	11.0
Marzo	19.7	8.03	0.65	12.65	1.030	13.0
Abril	24.4	11.11	0.70	14.03	1.065	14.9
Mayo	27.8	13.54	0.75	15.29	1.155	17.7
Junio	27.7	13.47	0.75	15.25	1.140	17.4
Julio	29.3	14.67	0.77	15.92	1.170	18.6
Agosto	27.3	13.18	0.74	15.09	1.125	17.0
Septiembre	26.3	12.45	0.73	14.71	1.025	15.1
Octubre	23.9	10.77	0.70	13.87	0.990	13.7
Noviembre	19.4	7.84	0.64	12.58	0.950	11.9
Diciembre	15.4	5.52	0.60	11.75	0.885	10.5

Tabla 4. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial Ajustada (continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

Año: 1996

MES	T°C	i	a	ET	K	ETP
Enero	15.6	5.63	0.60	11.78	0.925	10.9
Febrero	18.1	7.06	0.63	12.27	0.885	10.9
Marzo	19.3	7.78	0.64	12.55	1.030	12.9
Abril	24.3	11.04	0.70	14.00	1.065	14.9
Mayo	28.5	14.07	0.76	15.58	1.155	18.0
Junio	29.4	14.75	0.77	15.96	1.140	18.2
Julio	30.1	15.28	0.78	16.27	1.170	19.0
Agosto	27.7	13.47	0.75	15.25	1.125	17.2
Septiembre	27.1	13.03	0.74	15.01	1.025	15.4
Octubre	23.9	10.77	0.70	13.87	0.990	13.7
Noviembre	19.3	7.78	0.64	12.55	0.950	11.9
Diciembre	16.1	5.91	0.61	11.87	0.885	10.6

Año: 1997

MES	T°C	i	a	ET	K	ETP
Enero	13.5	4.52	0.58	11.47	0.925	10.6
Febrero	15.9	5.80	0.60	11.83	0.885	10.5
Marzo	20.6	8.59	0.66	12.88	1.030	13.3
Abril	20.4	8.46	0.65	12.83	1.065	13.7
Mayo	24.8	11.39	0.71	14.17	1.155	16.4
Junio	27.4	13.25	0.74	15.13	1.140	17.2
Julio	29.4	14.75	0.77	15.96	1.170	18.7
Agosto	30.0	15.21	0.78	16.22	1.125	18.3
Septiembre	27.7	13.47	0.75	15.25	1.025	15.6
Octubre	22.4	9.76	0.68	13.40	0.990	13.3
Noviembre	17.4	6.65	0.62	12.12	0.950	11.5
Diciembre	14.5	5.04	0.59	11.61	0.885	10.4

Tabla 4. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial Ajustada (continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

Año: 1998

MES	T°C	i	a	ET	K	ETP
Enero	18.3	7.18	0.63	11.61	0.925	11.4
Febrero	19.0	7.60	0.64	12.32	0.885	11.0
Marzo	19.9	8.15	0.65	12.48	1.030	13.1
Abril	24.2	10.97	0.70	12.70	1.065	14.9
Mayo	30.0	15.21	0.78	13.97	1.155	18.7
Junio	30.7	15.75	0.79	16.22	1.140	18.9
Julio	30.5	15.59	0.78	16.45	1.170	19.2
Agosto	28.8	14.29	0.76	15.70	1.125	17.7
Septiembre	26.9	12.88	0.74	14.94	1.025	15.3
Octubre	22.5	9.82	0.68	13.43	0.990	13.3
Noviembre	19.5	7.9	0.64	12.60	0.950	12.0
Diciembre	-	-	-	-	0.885	-

3.6.3 CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION REAL

(Por: Ing. Elías Vázquez Godina)

La evapotranspiración real se puede calcular a partir de la evapotranspiración potencial ajustada, haciendo un balance hídrico. Este tipo de balance se utiliza sobre todo en zonas agrícolas, para determinar principalmente la cantidad de agua a utilizar en las diferentes zonas de riego, según el tipo de cultivo.

En las siguientes páginas se presentan los cálculos del balance hidráulico, siguiendo el método recomendado por: Emilio Custodio, Hidrología Subterránea. 1976

Notas al cálculo de las tablas

Ejemplo; año 1990

Enero: Al comenzar enero se supone completa la reserva de agua utilizable (RAU). Durante este mes la $P < ETP$. La diferencia $P - ETP = -5.7$ mm se cubre con la reserva de agua utilizable (RAU) que está completa. Cabe aclarar que el valor máximo que permite la RAU es de 108.0 mm. Como $ETR = ETP$, no hay excedentes ni déficit.

Febrero: Durante el mes de febrero $P < ETP$; la diferencia $P - ETP = 0.0 - 10.50 = -10.50$ mm, valor que corresponde a la variación de la reserva (VR), la cual puede cubrirse totalmente con la RAU que existe (102.3 mm). Como se alcanza a cubrir la variación de la reserva con la reserva de agua utilizable, entonces no hay

excedentes ni déficit.

Marzo: En este mes $P > ETP$, la diferencia $P - ETP = 43.7 - 13.3 = 30.40$ se añadirá a la reserva de agua utilizable, pero como la reserva de agua utilizable sólo puede alcanzar un valor máximo de 108.0, se le agregará solamente lo que le falte para completar su valor máximo que sería igual a 16.2 mm. La $ETP = ETR$, por lo tanto habrá un excedente de 14.2 mm.

Abril: En el mes de abril $P > ETP$. El exceso $P - ETP = 29.1 - 14.60 = 14.5$ mm, los que se añadirán a la RAU, misma que está completa y por lo tanto no se le añadirá nada. Como la $ETR = ETP$, habrá un excedente de 14.5. Y así sucesivamente para los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre.

Noviembre: En noviembre, $P < ETP$. La diferencia $P - ETP = 0.9 - 11.80 = -10.9$ mm que se cubrirá con la reserva de agua utilizable del mes anterior, $108 - 10.9 = 97.1$ que es la reserva de agua del mes de noviembre. La $ETP = ETR$, por lo tanto no habrá excedentes ni déficit. Lo mismo ocurrirá en el mes de diciembre. Se sigue el mismo método para todos los demás años.

A continuación se presentan los cálculos en las tablas, para los años 1990 a 1998.

Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1990							
Mes	Precipitación	Evapotranspiración potencial ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	4.9	10.6	-5.7	102.3	10.6	-	-
Febrero	-	10.5	-10.5	91.8	10.5	-	-
Marzo	43.7	13.3	16.2	108.0	13.3	14.2	-
Abril	29.1	14.6	0.0	108.0	14.6	14.5	-
Mayo	19.1	16.6	0.0	108.0	16.6	2.5	-
Junio	30.2	17.3	0.0	108.0	17.3	12.9	-
Julio	27.5	18.0	0.0	108.0	18.0	9.5	-
Agosto	60.0	17.4	0.0	108.0	17.4	42.6	-
Septiembre	157.5	14.9	0.0	108.0	14.9	152.8	-
Octubre	95.6	13.1	0.0	108.0	13.1	82.5	-
Noviembre	0.9	11.8	-10.9	97.1	11.8	-	-
Diciembre	-	10.4	-10.4	86.7	10.4	-	-

Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1991

Mes	Precipitación	Evapotranspiración real ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	10.9	10.6	0.3	87.0	10.6	-	-
Febrero	6.7	10.7	-4.0	83.0	10.7	-	-
Marzo	8.0	14.5	-6.5	76.5	14.5	-	-
Abril	26.6	15.6	11.0	87.5	15.6	-	-
Mayo	55.6	17.3	20.5	108.0	17.3	17.8	-
Junio	88.3	17.9	0.0	108.0	17.9	70.4	-
Julio	19.7	17.4	0.0	108.0	17.4	2.3	-
Agosto	6.2	18.0	-11.8	96.2	18.0	-	-
Septiembre	118.0	14.2	11.8	108.0	14.2	92.0	-
Octubre	5.7	12.7	-7.0	101.0	12.7	-	-
Noviembre	34.1	11.3	7.0	108.0	11.3	15.8	-
Diciembre	61.5	10.5	0.0	108.0	10.5	51.0	-

Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1992

Mes	Precipitación	Evapotranspiración real ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	74.9	10.5	0.0	108.0	10.5	64.4	-
Febrero	15.7	11.3	0.0	108.0	11.3	4.4	-
Marzo	18.7	13.3	0.0	108.0	13.3	5.4	-
Abril	25.4	14.2	0.0	108.0	14.2	11.2	-
Mayo	124.8	15.9	0.0	108.0	15.9	108.9	-
Junio	2.6	18.3	-15.7	92.3	18.3	-	-
Julio	6.2	18.5	-12.3	80.0	18.5	-	-
Agosto	57.5	17.3	28	108.0	17.3	12.1	-
Septiembre	44.9	15.2	0.0	108.0	15.2	29.7	-
Octubre	33.6	13.6	0.0	108.0	13.6	20.0	-
Noviembre	22.0	11.4	0.0	108.0	11.4	10.6	-
Diciembre	11.4	10.5	0.0	108.0	10.5	0.9	-

Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1993

Mes	Precipitación	Evapotranspiración potencial ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	38.5	10.8	0.0	108.0	10.8	27.7	-
Febrero	21.5	10.7	0.0	108.0	10.7	10.8	-
Marzo	20.6	13.2	0.0	108.0	13.2	7.4	-
Abril	10.0	14.7	-4.7	103.3	14.7	0.0	-
Mayo	95.0	16.5	4.7	108.0	16.5	73.7	-
Junio	267.0	16.8	0.0	108.0	16.8	250.2	-
Julio	0.1	18.0	-17.9	90.1	18.0	0.0	-
Agosto	10.9	17.7	-6.8	83.3	17.7	0.0	-
Septiembre	222.1	14.7	24.7	108.0	14.7	182.7	-
Octubre	21.0	13.1	0.0	108.0	13.1	7.9	-
Noviembre	13.0	11.4	0.0	108.0	11.4	1.6	-
Diciembre	2.5	10.6	-8.1	99.9	10.6	0.0	-

Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1994

Mes	Precipitación	Evapotranspiración potencial ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	45.3	10.9	8.1	108.0	10.9	26.3	-
Febrero	8.1	10.5	-2.4	105.6	10.5	0.0	-
Marzo	45.0	13.3	2.4	108.0	13.3	29.3	-
Abril	8.6	14.6	-6.0	102.0	14.6	0.0	-
Mayo	61.5	16.8	6.0	108.0	16.8	38.7	-
Junio	33.2	17.7	0.0	108.0	17.7	15.5	-
Julio	7.5	18.7	-11.2	96.8	18.7	0.0	-
Agosto	27.7	17.2	10.5	107.3	17.2	0.0	-
Septiembre	238.3	14.7	0.7	108.0	14.7	222.9	-
Octubre	27.6	13.6	0.0	108.0	13.6	14.0	-
Noviembre	28.9	12.3	0.0	108.0	12.3	16.6	-
Diciembre	33.4	10.7	0.0	108.0	10.7	22.7	-

Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1995

Mes	Precipitación	Evapotranspiración potencial ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	9.3	10.8	-1.5	106.5	10.8	0.0	-
Febrero	8.6	11.0	-2.4	104.1	11.0	0.0	-
Marzo	17.6	13.0	3.9	108.0	13.0	0.7	-
Abril	4.4	14.9	-10.5	97.5	14.9	0.0	-
Mayo	59.7	17.7	10.5	108.0	17.7	31.5	-
Junio	18.6	17.4	0	108.0	17.4	1.2	-
Julio	3.6	18.6	-15	93.0	18.6	0.0	-
Agosto	184.7	17.0	15	108.0	17	155.4	-
Septiembre	20.8	15.1	0	108.0	15.1	5.7	-
Octubre	7.1	13.7	-6.6	101.4	13.7	0.0	-
Noviembre	26.7	11.9	6.6	108.0	11.9	8.1	-
Diciembre	12.2	10.5	0.0	108.0	10.5	1.7	-

Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1996

Mes	Precipitación	Evapotranspiración real ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	13.8	10.9	0.0	108.0	10.9	2.9	-
Febrero	0.2	10.9	-10.7	97.3	10.9	0.0	-
Marzo	0.0	12.9	-12.9	84.4	12.9	0.0	-
Abril	13.1	14.9	-1.8	82.6	14.9	0.0	-
Mayo	2.5	18.0	-15.5	67.1	18.0	0.0	-
Junio	52.8	18.2	34.6	101.7	18.2	0.0	-
Julio	5.6	19.0	-13.4	88.3	19.0	0.0	-
Agosto	304.6	17.2	19.7	108.0	17.2	267.7	-
Septiembre	6.4	15.4	-9.0	99.0	15.4	0.0	-
Octubre	84.5	13.7	9.0	108.0	13.7	61.8	-
Noviembre	9.6	11.9	-2.3	105.7	11.9	0.0	-
Diciembre	1.9	10.6	-8.7	97.0	10.6	0.0	-

Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1997

Mes	Precipitación	Evapotranspiración potencial ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	11.9	10.6	1.3	98.2	10.6	0.0	-
Febrero	25.8	10.5	9.8	108.0	10.5	5.6	-
Marzo	85.2	13.3	0.0	108.0	13.3	71.9	-
Abril	96.8	13.7	0.0	108.0	13.7	83.1	-
Mayo	86.6	16.4	0.0	108.0	16.4	70.2	-
Junio	58.1	17.2	0.0	108.0	17.2	40.9	-
Julio	5.1	18.7	-13.6	94.4	18.7	0.0	-
Agosto	0.8	18.3	-17.5	77.0	18.3	0.0	-
Septiembre	70.6	15.6	31.1	108.0	15.6	23.9	-
Octubre	141.2	13.3	0	108.0	13.3	127.9	-
Noviembre	25.2	11.5	0	108.0	11.5	13.7	-
Diciembre	4.6	10.4	-5.8	102.2	10.4	0.0	-

Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1998

Mes	Precipitación	Evapotranspiración potencial ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	0.1	11.4	-11.3	90.9	11.4	0.0	-
Febrero	16.6	11.0	5.6	96.5	11.0	0.0	-
Marzo	27.7	13.1	11.5	108.0	13.1	2.5	-
Abril	15.2	14.9	0.0	108.0	14.9	0.3	-
Mayo	-	18.7	-18.7	89.3	18.7	0.0	-
Junio	32.3	18.9	13.4	102.7	18.9	0.0	-
Julio	5.3	19.2	-13.9	88.8	19.2	0.0	-
Agosto	66.5	17.7	19.2	108.0	17.7	29.6	-
Septiembre	144.5	15.3	0.0	108.0	15.3	129.2	-
Octubre	70.5	13.3	0.0	108.0	13.3	57.2	-
Noviembre	55.0	12.0	0.0	108.0	12.0	43.0	-
Diciembre	-	10.5	-10.5	97.5	10.5	0.0	-

3.6.4 CALCULO DE LAS TASAS DE INFILTRACION POTENCIAL DE AGUA A TRAVES DE LA CUBIERTA DEL RELLENO SANITARIO

(Por Ing. Elías Vázquez Godina).

Para calcular la infiltración potencial de agua a través de la cubierta del relleno, primero hay que calcular la capacidad de almacenamiento de agua en el material de cobertura y el déficit de humedad inicial en el mismo material. Estos dos factores dependen directamente de la capacidad de campo y del punto de marchitez permanente, que a la vez dependen del tipo de suelo.

Para una arcilla, que es el material de cobertura en el relleno sanitario, le corresponde una capacidad de campo de 35, el punto de marchitez permanente de 17 y el contenido de humedad del material de cobertura es el 50% de su capacidad de campo¹

- 1.- La capacidad de almacenamiento de agua en el material de cobertura es:
 - a) La capacidad de campo del material de cobertura , en cm, es:
 $FC = 0.35 \times 100 \text{ cm/m} = 35 \text{ cm/m}$
 - b) El porcentaje de marchitez permanente es:
 $PMP = 0.17 \times 100 \text{ cm/m} = 17 \text{ cm/m}$
 - c) Entonces la capacidad de almacenamiento de humedad disponible en el material de cobertura de un espesor de 0.60 m es:

¹ George Tchobanoglous. Gestión Integral de Residuos Sólidos. 1994

$$\text{CHD} = (35 - 17) \text{ cm/m} \times 0.60 \text{ m} = 10.80 \text{ cm}$$

d) El déficit de humedad inicial en el material de cobertura es:

$$\text{Hid} = (35 \text{ cm.m} \times 0.5 - 17 \text{ cm/m}) \times 0.60 \text{ m} = 0.30 \text{ cm}$$

3.6.5 CALCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA QUE ENTRA EN EL RELLENO

SANITARIO (Por: Ing. Elías Vázquez Godina)

1. Notas para el llenado de las tablas (Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L.):

En las tablas se presentan datos mensuales de:

- precipitación (2)
- evapotranspiración real (3)
- escorrentía (4)
- aporte (+) o pérdida (-) potencial de humedad del suelo de un volumen unitario del material de cobertura (5)
- el déficit en humedad del material de cobertura (6) y,
- la cantidad de agua que puede infiltrarse potencialmente a través de la cubierta del relleno (7).

En donde:

a).- El aporte (+) o pérdida (-) de humedad, es igual a la precipitación menos la

evapotranspiración real menos la escorrentía: (5) = (2) - (3) - (4)

- b).- El déficit de humedad en el material de cobertura no debe ser menor de -108.0 ya que es la capacidad máxima de almacenamiento de humedad disponible en el material de cobertura. Calculado en el inciso (c) de la página 92.
- c).- La infiltración potencial es igual al exceso (subida) de humedad menos el déficit de humedad inicial del material de cobertura. (7) = (+5) - 3.0 (déficit de humedad inicial del material de cobertura).
- d).- La infiltración potencial es cero cuando existe un déficit de humedad en el material de cobertura, o cuando la humedad es menor al déficit de humedad inicial del material de cobertura.
- 3.- A continuación se presentan las tablas de cálculo para determinar la cantidad de agua que entró en el relleno a través de la capa de arcilla de 60 cm de espesor, para los años de 1990 a 1998

**Tabla 6. Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario
(Ing. Elías Vázquez Godina)**

Año: 1990

MES	PRECIPI- TACION	EVAPOTRANS- PIRACION REAL	ESCORRENTIA	APORTE (+) O PERDIDA (-) DE HUMEDAD	DEFICIT DE HUMEDAD EN EL MATERIAL DE COBERTURA	INFIL- TRACION POTEN- CIAL
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Enero	4.9	10.6	1.5	-7.2	-7.2	0.0
Febrero	-	10.5	0.0	-10.50	-17.7	0.0
Marzo	43.7	13.3	13.1	17.3	-0.4	0.0
Abril	29.1	14.6	8.7	5.8	0.0	2.8
Mayo	19.1	16.6	5.7	-3.2	-3.2	0.0
Junio	30.2	17.3	9.1	3.8	0.0	0.8
Julio	27.5	18.0	8.3	1.3	0.0	0.0
Agosto	60.0	17.4	18.0	24.6	0.0	21.6
Septiembre	167.7	14.9	50.3	102.5	0.0	99.5
Octubre	95.6	13.1	28.7	53.8	0.0	50.8
Noviembre	0.9	11.8	0.30	-11.2	-11.35	0.0
Diciembre	-	10.4	0.0	-10.40	-21.75	0.0

Todas las unidades están en mm

Infiltración total= 175.50 mm/año

Tabla 6. Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario (Continuación)
(Ing. Elías Vázquez Godina)

Año: 1991

MES	PRECIPI- TACION	EVAPOTRANS- PIRACION REAL	ESCORRENTIA	APORTE (+) O PERDIDA (-) DE HUMEDAD	DEFICIT DE HUMEDAD EN EL MATERIAL DE COBERTURA	INFIL- TRACION POTEN- CIAL
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Enero	10.9	10.6	3.3	-3.0	-3.0	0.0
Febrero	6.7	10.7	2.0	-6.0	-9.0	0.0
Marzo	8.0	14.5	2.4	-8.9	-17.9	0.0
Abril	26.6	15.6	8.0	3	-14.7	0.0
Mayo	55.6	17.3	16.7	21.6	0.0	18.6
Junio	88.3	17.9	26.5	43.9	0.0	40.9
Julio	19.7	17.4	5.9	-3.6	-3.6	0.0
Agosto	6.2	18.0	1.9	-13.7	-17.3	0.0
Septiembre	118.0	14.2	35.4	68.4	0.0	65.4
Octubre	5.7	12.7	1.7	-8.7	-8.7	0.0
Noviembre	34.1	11.3	10.2	12.6	0.0	9.6
Diciembre	61.5	10.5	18.5	32.8	0.0	29.6

Todas las unidades están en mm

Infiltración total = 164.10 mm/año