



SUBSECRETARIA DE CONSTRUCCION DIRECCION GENERAL DE IRRIGACION Y CONTROL DE RIOS DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS DEPARTAMENTO DE INFORMACION Y CONTROL DE DATOS

BOLETIN N° 8 1º ABRIL 1976

PUBLICACION MENSUAL DE DIVULGACION TECNICA EN EL CAMPO DE LA GEOHIDROLOGIA, EN LO RELATIVO A LA EXPLORACION, EVALUACION Y CONSERVACION DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRANEA, ELEMENTOS DE IMPORTANCIA PARA EL DESARROLLO

CALIDAD DEL AGUA Y SIGNIFICADO DE ALGUNAS DE SUS PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS.

Por: ING. JUAN MANUEL LESSER I.

Las aguas subterráneas y superficiales - que son utilizadas para satisfacer las necesidades de agua potable de zonas urbanas, así como la que se destina a la agricultura, ganadería e industria, necesita cumplir con ciertos requisitos respecto a su contenido de elementos químicos, a sus propiedades físicas y a la presencia de materia orgánica.

El objeto del presente trabajo, es el de mostrar, en forma general, las normas de calidad del agua utilizada como potable, en riego, en abrevadero y en la industria, así como el significado y algunas propiedades físicas y químicas del agua.

La calidad del agua, se determina a partir de análisis físicos, químicos y bacteriológicos, los cuales pueden variar desde análisis sencillos donde se determinen los principales elementos, hasta análisis complejos que incluyan la determinación de una gran variedad de especies presentes en el agua.

El tipo de análisis dependerá del uso que se le tenga destinado al agua, así como de algunas características observadas en la zona donde ésta se encuentre. Por ejemplo, en una zona minera, es conveniente determinar las concentraciones de algunos metales que pudieran encontrarse presentes. En lugares próximos a poblados y/o establos, debe ponerse atención a los contenidos de nitratos y organismos coliformes, etc.

AGUA POTABLE.-

Para conocer la calidad de cierta agua para uso potable, se comparan los resultados del análisis químico, con las normas de calidad o límites máximos permisibles que a continuación se describen y que fueron publicados por la Secretaría de Salubridad y Asistencia, en el Diario Oficial de el día 2 de Julio de 1953.

| CARACTERISTICAS FISICAS | LIMITE MAXIMO PERMISIBLE | OBSERVACIONES |
|-------------------------|-------------------------------|---|
| TURBIEDAD | 10 (Escala de Sílice) | DE NO CUMPLIRSE |
| COLOR | 20 (Escala Platino - Cobalto) | CON LOS RESULTADOS ANTERIORES, SE ADMITIRAN AQUELLOS QUE SEAN TOLERABLES PARA LOS USUARIOS. |
| SABOR OLOR | Insípida Inodora | |

| CARACTERISTICAS QUIMICAS | LIMITE MAXIMO PERMISIBLE EN ppm (EXCEPTO *) |
|--|---|
| Nitrógeno amoniacal (N) | 0.50 |
| Nitrógeno proteico (N) | 0.10 |
| Nitrógeno de nitratos (N) | 5.00 |
| Potencial Hidrógeno (pH) | 8.00 * |
| Oxígeno consumido (O) | 3.00 |
| Sólidos totales disueltos (STD) | 1000 |
| Alcalinidad total (CaCO ₃) | 400 |
| Dureza total (CaCO ₃) | 300 |
| Cloruro (Cl) | 250 |
| Sulfatos (SO ₄) | 250 |
| Magnesio (Mg) | 125 |
| Zinc (Zn) | 15 |
| Cobre (Cu) | 3 |
| Fluoruros (Fl) | 1.50 |
| Hierro (Fe) y Manganeso (Mn) | 0.30 |
| Arsénico (As) | 0.05 |
| Selenio (Se) | 0.05 |
| Cromo (Cr) | 0.05 |
| Compuestos fenólicos, (Fenol) | 0.001 |

| CARACTERISTICAS BIOLÓGICAS | NUMERO MAXIMO PERMISIBLE |
|--|--------------------------|
| ORGANISMOS DE LOS GRUPOS COLI Y COLIFORMES. | 20 |
| COLONIAS BACTERIANAS POR CENTRIMETRO CUBICO DE MUESTRA | 200 |

Debido a la gran demanda de agua potable en el País y a la escasez que presenta este líquido en muchas regiones, ésta es ingerida sin cumplir con todos los requisitos anteriores.

El índice que en muchas regiones de México se encuentra sobrepasando el límite máximo permisible, es el de sólidos totales disueltos. Esta, en ocasiones, es aceptado en cantidades mayores a 1,000 ppm., siendo su límite la tolerancia del consumidor. Generalmente no sobrepasa a las 2,000 ppm.

El ingerir agua con más de 1,000 ppm., normalmente no causa problemas a la salud siempre y cuando no se encuentren, en exceso, algunos elementos críticos como los que se mencionan a continuación:

Arsénico, Selenio y Cromo.- No es común encontrarlos en el agua, pero su presencia en cantidades pequeñas es tóxica, por lo cual el agua potable, no debe tener concentraciones mayores de 0.05 ppm.

Zinc, Cobre, Hierro y Manganeso.- El cuerpo, puede llegar a tolerar, cantidades un poco mayores a las establecidas como requisito, no es común su presencia en el agua.

Sulfatos.- Concentraciones altas de este compuesto, actúan como laxante. En combinación con otros elementos, da lugar a un sabor desagradable.

Fluoruros.- El ingerir agua que contenga este elemento en exceso, produce el decalcamiento de la dentadura, el cual dependerá de la concentración, la edad del consumidor, la cantidad de agua que se consuma y la susceptibilidad de cada individuo.

Nitratos.- Proviene de la descomposición de materia orgánica. Concentraciones altas de este compuesto es causa de enfermedades hídricas mortales, como la metemoglobinemia en los niños.

La presencia de concentraciones relativamente altas de sodio, cloro, magnesio, calcio, carbonatos y bicarbonatos, no representan gran peligro, ya que pueden ser eliminados por el organismo.

AGUA PARA RIEGO.-

Para conocer la calidad del agua para riego, se ha optado por utilizar la clasificación de Wilcox (1948) en la cual, por medio de la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS), se obtiene la clase de agua para riego.

La conductividad eléctrica es igual al recíproco de la resistividad y proporcional a la concentración de sólidos totales disueltos. Normalmente, esta se expresa en micromhos por centímetro (mmhos-cm).

La relación de adsorción de sodio, se obtiene por medio de la fórmula siguiente:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

Donde las concentraciones de Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} están dadas en equivalentes por litro. Con esta relación se obtiene el peligro que entraña el uso del agua para riego, el cual, como puede apreciarse en la fórmula, queda, supeditado a las concentraciones absoluta y relativa de los principales cationes.

Los valores de CE y RAS, son graficados en el nomograma de clasificación (Fig.1), obteniéndose de esta manera, la clase de agua para riego, la cual está definida por los parámetros, C y S y subíndices en cada uno de ellos.

El significado de las diferentes clases, así como algunas recomendaciones para el uso del agua en riego, se comentan a continuación:

C₁ BAJA SALINIDAD. Puede usarse para riego en la mayoría de los suelos y para casi todas las plantas, con pocas probabilidades de que aumente la salinidad.

C₂ SALINIDAD MEDIA. Puede usarse, si se hacen lavados moderados. Se pueden sembrar plantas modera-

damente tolerantes a las sales en la mayoría de los casos, sin efectuar prácticas especiales para el control de la salinidad.

C₃ ALTAMENTE SALINA. No puede usarse en suelos de drenaje deficiente. Aún con drenaje adecuado, se requiere un manejo especial para el control de la salinidad, además de seleccionar plantas que sean bastante tolerantes a las sales.

C₄ MUY ALTAMENTE SALINA. No es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias aunque pueda usarse en ocasiones, bajo circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado; el agua para riego debe aplicarse en exceso con el fin de llevar a cabo un lavado fuerte. Las plantas que se seleccionen deberán ser muy tolerantes a las sales.

S₁ CON POCO SODIO. Puede usarse para riego en casi todos los suelos, con poco peligro de que el sodio intercambiable llegue a niveles perjudiciales. Sin embargo, las plantas sensitivas al sodio como algunos frutales (fruto con hueso) y aguacate, pueden acumular concentraciones dañinas de sodio.

S₂ CON CONTENIDO MEDIO. Será peligrosa en suelos de textura fina y en aquellos que contengan una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavados leves, a menos que haya yeso en el suelo. Esta agua puede usarse en suelos orgánicos o de textura gruesa con buena permeabilidad.

S₃ CON ALTO CONTENIDO. Conducirá a niveles peligrosos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos por lo cual se requerirá de un manejo especial, buen drenaje, lavados fuertes y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos no desarrollarán niveles perjudiciales de sodio intercambiable. Los mejoradores químicos deberán usarse, para el reemplazo de sodio intercambiable, excepto en el caso de que no sea factible el uso de mejoradores en aguas de muy alta salinidad.

S₄ CON MUY ALTO CONTENIDO. Generalmente no es apropiado para el riego, excepto en casos de baja y quizá media salinidad, donde la solución del calcio del suelo o el empleo de yeso u otros mejoradores, hagan factible el uso de esta agua.

La conductividad eléctrica puede tomarse como un índice en la selección de cultivos; en la tabla siguiente se presenta la tolerancia relativa de los cultivos a las sales.

FRUTALES

| MUY TOLERANTES | MEDIANAMENTE TOLERANTES | POCO TOLERANTES |
|----------------|-------------------------|-----------------|
| Palma Datilera | Granada | Peral |
| | Higuera | Manzano |
| | Olivo | Naranja |
| | Vid | Toronja |
| | Melón | Ciruela |
| | | Almendro |
| | | Chabacano |
| | | Durazno |
| | | Fresa |
| | | Limonero |
| | | Aguacate |

HORTALIZAS.

| MUY TOLERANTES | MEDIANAMENTE TOLERANTES | POCO TOLERANTES. |
|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| $CE_e \times 10^3 = 12$ | $CE_e \times 10^3 = 10$ | $CE_e \times 10^3 = 4$ |
| Betabel | Jitomate | Rábano |
| Bretón o col-rosada | Brócoli | Apio |
| Espárragos | Col | Ejotes |
| Espinacas | Chile dulce | |
| | Coliflor | |
| | Lechuga | |
| | Maíz dulce | |
| | Papas | |
| | Zanahoria | |
| | Cebolla | |
| | Chícharos | |
| | Calabaza | |
| | Pepinos | |
| $CE_e \times 10^3 = 10$ | $CE_e \times 10^3 = 4$ | $CE_e \times 10^3 = 3$ |

PLANTAS FORRAJERAS

| MUY TOLERANTES | MEDIANAMENTE TOLERANTES | POCO TOLERANTES |
|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| $CE_e \times 10^3 = 18$ | $CE_e \times 10^3 = 12$ | $CE_e \times 10^3 = 4$ |
| | Trébol Blanco | Trébol Blanco - Holandés |
| | Trebol Amarillo | |
| Zacate Alcalino de Coqui | Zacate inglés - perenne | Trébol alsike |
| Zacate Bermuda | | Trébol rojo |
| Zacate Rhodes | | Trebol ladino |
| | | Pinpinela |
| | Zacate Sudan | |
| | Trebol Hubam | |
| | Alfalfa (California Común) | |
| Cebada (para heno) | | |
| Trifolium (pata de pájaro) | Trigo (para heno) | |
| | Avena (para heno) | |
| | Gramma azul | |
| | Bromo suave | |
| | Veza lechosa Cicer | |
| $CE_e \times 10^3 = 12$ | $CE_e \times 10^3 = 4$ | $CE_e \times 10^3 = 2$ |

CULTIVOS COMUNES

| MUY TOLERANTES | MEDIANAMENTE TOLERANTES | POCO TOLERANTES |
|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| $CE_e \times 10^3 = 12$ | $CE_e \times 10^3 = 10$ | $CE_e \times 10^3 = 4$ |
| Cebada (grano) | Centeno (grano) | Alubias |
| Remolacha Azucarera | Trigo (grano) | |
| Colza | Avena (grano) | |
| Algodón | Arroz | |
| | Sorgo (grano) | |
| | Maíz | |
| | Linaza | |
| | Girasol | |
| | Higuerilla | |
| $CE_e \times 10^3 = 10$ | $CE_e \times 10^3 = 6$ | |

(De: Suelos Salinos y Sódicos 1954).

* El número que sigue a la $CE_e \times 10^3$ es el valor de la conductividad eléctrica del extracto de saturación en milimhos por centímetro a 25 °C, asociado a una disminución en los rendimientos de 50 por ciento.

El boro en pequeñas concentraciones, es esencial para el desarrollo normal de las plantas y la falta de este elemento, o su presencia en concentraciones altas afecta el crecimiento de los cultivos.

Dependiendo de la cantidad de boro que las plantas acepten, éstas se han dividido en tres grupos:

| | |
|--------------------------|------------------------|
| Cultivos sensibles; | Cuando aceptan: |
| Cultivos semitolerantes; | Hasta 0.67 ppm |
| Cultivos tolerantes; | entre 0.67 y 1.00 ppm. |
| | entre 1.00 y 3.75 ppm. |

A continuación se muestran algunos cultivos haciéndose distinción entre tolerantes, semitolerantes y sensibles:*

| TOLERANTES | SEMITOLERANTES | SENSIBLES |
|----------------|------------------|--------------------------|
| Espárragos | Girasol (nativo) | Nuez encarcelada |
| Palma datilera | Papa | Nogal Negro |
| Azucarera | Algodón | Nogal Persa |
| Remolacha | | |
| Alfalfa | Jitomate | Ciruelo |
| Gladiola | Rábano | Peral |
| Haba | Chícharos | Manzano |
| Cebolla | Rosa Ragged | Uva (málaga y Sultanina) |
| Nabo | Robin | |
| Col | Olivo | Higo Kadota |
| Lechuga | Cebada | Níspero |
| Zanahoria | Trigo | Cereza |
| | Maíz | Chabacano |
| | Sorgo | Durazno |
| | Avena | Naranja |
| | Calabacita | Aguacate |
| | Pimiento "Bell" | Toronja |
| | Camote | Limonero |
| | Frijol lima | |

*(En orden descendiente de más a menos tolerante).

(De: Suelos Salinos y Sódicos, - 1954)

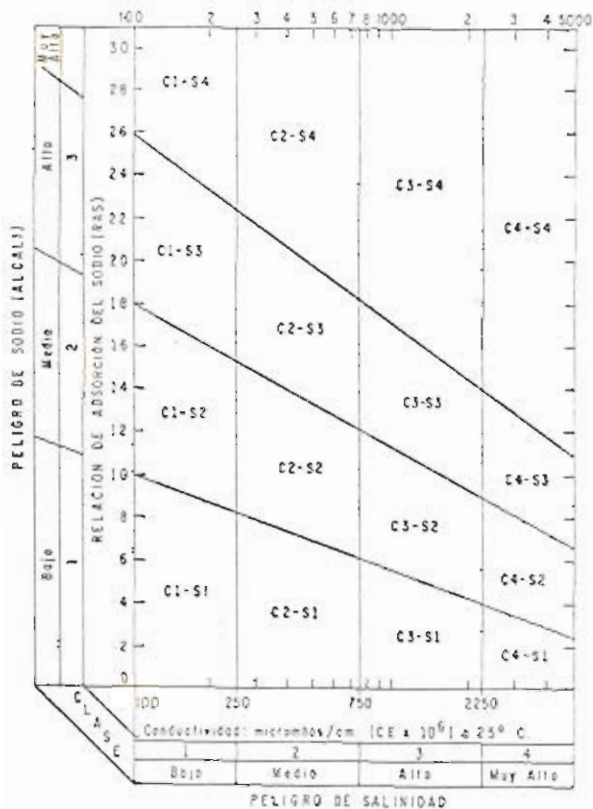
AGUA PARA ABREVADERO.-

El agua usada en granjas y ranchos ganaderos, normalmente debe de cumplir con los mismos requisitos que el agua potable, ya que es utilizada también para usos domésticos de los ranchos. Los animales pueden ingerir agua con mayor concentración de sales.

A continuación se describen los límites máximos para algunos animales, segun Mckee y Wolf, (1963).

| | |
|-----------------|------------|
| Aves | 2,860 ppm |
| Cerdos | 4,290 ppm |
| Caballos | 6,430 ppm |
| Ganado Lechero | 7,150 ppm |
| Ganado de Carne | 10,100 ppm |
| Borregos | 12,900 ppm |

CLASIFICACION DE AGUAS PARA RIEGO



AGUA PARA LA INDUSTRIA.

La clase de agua requerida en la industria, depende del tipo de instalaciones utilizadas.

Una forma rápida de catalogar el tipo de agua para la industria, es conociendo su dureza. Esta normalmente se reporta en concentración de carbonato de calcio (CaCO₃).

Cuando un agua contiene concentraciones bajas de este compuesto, se denomina "agua blanda" y al agua con concentraciones altas "agua dura".

De acuerdo con algunos autores (Durfor y Becker, 1954), se han distinguido los siguientes rangos de dureza.

| CONCENTRACION EN mg/l de CaCO ₃ | DESCRIPCION. |
|--|-------------------------|
| 0 - 60 | Agua blanda |
| 61 - 120 | Agua moderadamente dura |
| 121 - 180 | Agua dura |
| Más de 180 | Agua muy dura |

En la tabla siguiente, se muestran algunos de los límites para la industria textil y papelería, así como en derivados del petróleo y embotelladoras.

| CALIDAD DE AGUA PARA ALGUNAS INDUSTRIAS. (En mg/l) | | | | |
|--|-------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|
| CONSTITUYENTE | INDUSTRIA TEXTIL. | INDUSTRIA PAPELERA. | DERIVADOS DEL PETROLEO. | EMBOTELLADORAS. |
| SiO ₂ | --- | 50 | --- | --- |
| Fe | 0.1 | 1.0 | 1.0 | 0.3 |
| Mn | 0.1 | 0.5 | --- | 0.05 |
| Ca | --- | 20 | 75 | --- |
| Mg | --- | 12 | 30 | --- |
| Cu | 0.01 | --- | --- | --- |
| NH ₄ | --- | --- | --- | --- |
| Zn | --- | --- | --- | --- |
| HCO ₃ | --- | --- | --- | --- |
| SO ₄ | --- | --- | --- | 500 |
| Cl | --- | 200 | 300 | 500 |
| F | --- | --- | --- | --- |
| NO ₃ | --- | --- | --- | --- |
| DUREZA | 25 | 100 | 350 | --- |
| pH | 2.5-10.5 | 6-10 | 6-9 | --- |
| S.T.D. | 100 | --- | 100 | --- |

(En: John Rem, 1970)

SIGNIFICADO DE ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL AGUA

| CONSTITUYENTE O PROPIEDAD FISICA. | FUENTE O CAUSA DE ORIGEN. | SIGNIFICADO |
|--|---|--|
| Bicarbonato (HCO ₃) y Carbonato (CO ₃) | Proviene de la incorporación del bióxido de carbono en el agua y de la disolución de rocas carbonatadas como la caliza y la dolomita. | Los carbonatos y bicarbonatos producen alcalinidad. Los bicarbonatos de calcio y magnesio se descomponen en calderas y aguas calientes, facilitando la incrustación y liberando bióxido de carbono corrosivo a la atmósfera. En combinación con calcio y magnesio es causa de la dureza. |

| | | |
|----------|---|---|
| BORO (B) | Proviene de la disolución de suelos y rocas, en especial las de origen ígneo. El agua de zonas térmicas y especialmente aquellas que se encuentran en áreas de actividad volcánica reciente, pueden contener altas concentraciones de boro. Puede deberse, en ocasiones, a contaminación por desperdicios, especialmente donde se usan detergentes que contienen boratos. | Cantidades pequeñas de este elemento, es esencial para el crecimiento y nutrición de las plantas, pero es tóxico para la mayor parte de ellas, cuando se encuentran en concentraciones mayores de 1 mg/l. |
|----------|---|---|

| CONSTITUYENTE O PROPIEDAD FISICA. | FUENTE O CAUSA DE ORIGEN. | SIGNIFICADO |
|-----------------------------------|--|---|
| CALCIO (Ca) | Proviene de casi todo tipo de suelos y rocas pero en especial de las calizas, las dolomitas y el yeso. Algunas salmueras contienen grandes cantidades de calcio. | El calcio y el magnesio son los principales responsables de la dureza en el agua la cual origina un gran consumo de jabones. Puede incrustar tuberías y ademas, reduciendo la eficiencia. |
| COLOR | En agua superficial, componentes orgánicos provenientes del decaimiento de la vegetación y por contaminación de desperdicios orgánicos e inorgánicos descargados a los ríos. En agua subterránea, componentes orgánicos que han pasado a través de la lignita y turba. | Indica la presencia de iones orgánicos o materia orgánica en el agua subterránea. Es un factor importante en la valoración de agua potable para otros usos. |
| CLORURO (Cl) | Proviene de la disolución de rocas y suelos, en especial evaporitas; se presenta por contaminación de desperdicios y de saques. Antiguas salmueras, agua de mar y salmueras industriales, contienen grandes cantidades de este elemento. | Grandes concentraciones de este elemento aumentan el poder corrosivo del agua y, en combinación con sodio, da un sabor salado. |
| CONCENTRACION DE HIDROGENO. (pH) | Los ácidos y el bióxido de carbono libre, bajan el valor del pH. Carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos, fosfatos, silicatos y boratos, aumentan el valor de pH. | Un pH igual a 7.0 indica neutralidad en una solución; valores mayores indican alcalinidad y menores acidez. La corrosividad, generalmente aumenta al disminuir el pH. Aguas excesivamente alcalinas, pueden atacar metales. |
| CONDUCTIVIDAD ELECTRICIDAD. | Depende de la cantidad de sales disueltas en el agua. | Es una medida de la capacidad del agua de conducir corriente eléctrica. Varía con la concentración y grado de ionización de los constituyentes, así como con la temperatura. Se usa para estimar la cantidad de sales disueltas en el agua. |

| CONSTITUYENTE O PROPIEDAD FISICA. | FUENTE O CAUSA DE ORIGEN. | SIGNIFICADO. |
|-----------------------------------|---|---|
| DUREZA COMO CaCO ₃ | En la mayoría de los casos, la dureza es debida a el calcio y el magnesio. | Consumo jabón y no produce espuma. Forma depósitos de jabón en baños. El agua dura incrusta calderas y tuberías, Dureza es equivalente de dureza de carbonatos y bicarbonatos. |
| ESTRONCIO (Sr) | Proviene de la disolución de rocas y suelos, en especial de rocas carbonatadas y rocas de origen ígneo. | Se encuentra en concentraciones generalmente muy bajas. |
| FIERRO (Fe) | Proviene de la disolución de suelos rocas, tuberías, bombas y equipos similares. Concentraciones mayores a 1 ó 2 ppm., generalmente indican drenaje de zonas mineras u otras fuentes. | Expuesto a la intemperie, el fierro disuelto en el agua se oxida formando un sedimento rojizo. Más de 0.30 ppm, mancha lavadoras y utensilios. Es un elemento nocivo en el proceso de bebidas, tintes, blanqueadores, hielo, etc. Grandes concentraciones producen un sabor desagradable y favorecen el crecimiento de bacterias. |
| FLUOR (F) | Se encuentra disueltos en cantidades muy pequeñas, es casi todo tipo de rocas y suelos. | Reduce la picadura de dientes (Caries) en los niños durante la época de calcificación. Excesos de este elemento, produce el decaimiento de la dentadura, el cual dependerá de la concentración de flúor, la edad del consumidor, la cantidad de agua que se consume y la susceptibilidad de cada individuo. |
| FOSFATO (PO ₄) | Proviene del intemperismo de rocas ígneas y de la lixiviación de suelos que contienen desperdicios orgánicos, fertilizantes, detergentes y drenajes domésticos e industriales. | Concentraciones mayores a las normales, indican contaminación por desechos. |
| LITIO (Li) | Proviene de la disolución de rocas durante el intemperismo. | Las concentraciones de este elemento en el agua son en general muy bajas, no afectando la calidad para los diferentes usos. |

| CONSTITUYENTE O PROPIEDAD - FISICA. | FUENTE O CAUSA DE ORIGEN. | SIGNIFICADO |
|---|---|--|
| MAGNESIO (Mg) | Proviene de la disolución de la mayoría de los suelos y rocas pero especialmente de las dolomitas. Algunas salmueras contienen cantidades abundantes de magnesio. | El magnesio y el calcio son los principales responsables de la dureza y del agua incrustante. |
| MANGANESO (Mn) | Proviene de la disolución de algunos suelos y rocas. Es menos común que el fierro, pero se encuentra asociado con éste y con aguas ácidas. | Es el causante de la coloración café oscura o negra. |
| NITROGENO | Se encuentra en el agua como NH ₃ , NO ₂ y NO ₃ dependiendo del grado de oxidación. | Concentraciones altas de nitrógeno, indica contaminación. |
| AMONIO NH ₃ | Proviene de la disolución de rocas igneas, suelos enriquecidos por legumbres y fertilizantes, establos y aguas de drenaje. | Los nitratos aumentan el crecimiento de algas y otros organismos que producen olor y sabor desagradables. Concentraciones mayores a 45 ppm. de nitratos, causan metemoglobinemia en los niños. |
| NITRITO NO ₂ | | |
| NITRATO NO ₃ | | |
| POTASIO (K) | Proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos. Se encuentra también en salmueras, agua de mar y en algunos desechos industriales. | Grandes concentraciones, en combinación con cloro, producen un sabor salado. Es esencial en la nutrición de las plantas. |
| RELACION DE ADSORCION - DE SODIO. (RAS) | Se calcula usando las concentraciones de los iones que se indican en miliequivalentes por litro. | El RAS es usado junto con la conductividad eléctrica, para determinar la calidad del agua para riego. |
| | $RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$ | |
| SELENIO (Se) | La principal fuente de selenio son las emanaciones volcánicas y los depósitos de sulfuros que han sido acumulados por erosión e intemperismo. Se encuentra en rocas eretácicas, en especial en lutitas y suelos derivados de ellas. | Es tóxico en cantidades pequeñas. Constituye un problema cuando se encuentra en plantas o agua para el ganado. |

| CONSTITUYENTE O PROPIEDAD - FISICA. | FUENTE O CAUSA DE ORIGEN. | SIGNIFICADO |
|-------------------------------------|---|---|
| SILICE (SiO ₂) | Proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos. Generalmente se presenta en concentraciones bajas de 1 a 30 ppm. Concentraciones hasta de 100 ppm suelen encontrarse en aguas altamente alcalinas. | Produce incrustación en tuberías y calderas. |
| SODIO (Na) | Proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos. Se encuentra también en salmueras, agua de mar, desperdicios industriales y drenajes. | Grandes concentraciones en combinación con el cloro, producen un sabor salado. Cantidades fuertes comúnmente limitan el uso del agua para la agricultura. |
| SOLIDOS DISUELTOS | Proviene de la disolución de minerales que forman los suelos y las rocas. Puede incluir constituyentes orgánicos y agua de cristalización. | El valor de los sólidos disueltos, es una medida de todas las concentraciones que se encuentran en el agua. Es un índice importante en la determinación de los usos del agua. |
| SULFATOS (SO ₄) | Proviene de la disolución de rocas y suelos que contienen yesos, fierro y compuestos sulfurosos. Comúnmente se presenta en aguas de drenaje de minas y en algunos desechos industriales. | Concentraciones altas, actúan como laxante y en combinación con otras iones da al agua un sabor desagradable. En agua que contiene calcio, produce incrustación. |

BIBLIOGRAFIA.

- Nem, John D., 1970, Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Waters. U.S. Geological Survey Water-Supply paper 1473.
- Suelos Salinos y Sódicos, 1954 Manual de Agricultura No. 60 Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América.
- Todd, David K., 1959, Ground Water Hydrology, John Wiley and Sons, pp 177.
- Water Quality Criteria, 1972, Report of the National Technical Advisory Committee to the Secretary of the Interior.

Parte II

Por Ing. Alfonso Camarena L.

V).- METODO SISMICO DE REFRACCION.

Como se mencionó el método sísmico de refracción es otro de los más utilizados en la exploración del agua subterránea.

A continuación se describen brevemente las bases teóricas del método

La propiedad física fundamental en que se basa la exploración por los métodos sísmicos, es la velocidad de transmisión de las ondas elásticas en diferentes formaciones geológicas.

La velocidad de transmisión de las ondas elásticas depende de las propiedades físicas del medio -- transmisor. Las fórmulas matemáticas que expresan la velocidad de transmisión en términos de las constantes elásticas del medio son:

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}}$$

Donde λ, μ son los coeficientes de Lamé, siendo μ el coeficiente de rigidez.

- E = Modulo de Young.
- σ = Constante de Poisson.
- V_L = Velocidad de las ondas longitudinales.
- V_T = Velocidad de las ondas transversales.
- ρ = Densidad del material.

La velocidad de las ondas transversales es aproximadamente el 57% de la correspondiente velocidad longitudinal.

En sismología se conocen varios tipos de ondas, pero en exploración hasta ahora solamente se aprovecha la onda longitudinal, la cual es la onda de compresión en la dirección de propagación.

La velocidad de transmisión de las ondas elásticas en términos geológicos depende en mayor grado de la compacidad y del estado de consolidación de la formación. Así las arenas, lutitas y margas, transmiten las ondas con velocidades intermedias, mientras que las calizas, Sal gema, esquistos, gneiss, rocas ígneas con velocidad mucho más altas. En rellenos no consolidados la velocidad de propagación crece con el grado de saturación y por tanto es mayor bajo el nivel freático que arriba de él.

La tabla V.1 muestra los diferentes rangos de velocidad para diferentes formaciones.

| FORMACION | VELOCIDAD Km/S |
|---|----------------|
| Aire | 0.33 |
| Agua dulce | 1.45 |
| Limos | 0.2 - 0.6 |
| Capa superficial no consolidada y seca. | 0.2 - 0.6 |
| Aluviones secos | 0.6 - 1.2 |
| Aluviones saturados | 1.6 - 2.4 |
| Arcillas | 0.9 - 1.8 |
| Tobas | 1.8 - 2.5 |
| Margas, Creta | 2 - 3 |
| Lavas | 2.5 - 4 |
| Calizas y Dolomías | 3 - 5 |
| Esquistos y micoesquistos | 3 - 4.5 |
| Gneiss, cuarcitas | 3 - 5.5 |
| Granitos | 4 - 6 |

V.1).- PRODUCCION, DETECCION Y REGISTRO DE LAS ONDAS SISMICAS.

La forma más comúnmente empleada para la producción de ondas sísmicas es la explosión de cargas de dinamita. Tiene la ventaja de que siempre puede alcanzarse la energía requerida si se emplea la cantidad necesaria de explosivo. Sin embargo, para profundidades de estudio pequeñas, como las requeridas en algunas aplicaciones de ingeniería civil, la producción de las ondas sísmicas por medio de martillo resulta muy adecuada.

Las ondas sísmicas son detectadas por medio de geófonos, entre los cuales los tipos más usados son los electromagnéticos. Una bobina unida a un cuadro -- está colocada entre los polos de un imán, que a su vez está suspendido por muelles de lámina. El cuadro está unido firmemente con una caja hermética provista de un clavo o lámina para introducir el geófono en el suelo. La bobina se mueve con el terreno, mientras que el imán permanece virtualmente estacionario a causa de su gran inercia, y el movimiento relativo de los dos produce una tensión eléctrica oscilante.

La tensión producida por el geófono es amplificada y filtrada de manera que sólo pasen las frecuencias deseadas, las cuáles son transmitidas a un registrador, donde hace oscilar un diminuto galvanómetro. Este tiene un espejo que envía un rayo luminoso sobre una banda fotográfica enrollada sobre un tambor giratorio, con lo que se completa el registro de las ondas sísmicas.

Los registros sísmicos Fig.V.I.1, llevan también líneas de tiempo, de modo que las "llegadas" debidas a refracciones puedan fijarse con precisión (dentro de unos pocos milisegundos). Los tiempos de llegada que corresponden a los geofonos en diferentes posiciones son graficados en coordenadas rectangulares, obteniéndose así, la gráfica tiempo-distancia Fig. -- V.I.2

V.2).- LEY DE REFRACCION

En el método de refracción los instrumentos de tectores se disponen a cierta distancia del punto de explosión, que es larga en comparación con la profundidad a que se encuentre el horizonte que haya de ser marcado en el plano.

Las ondas recorren grandes distancias horizontales a través del subsuelo, y el tiempo requerido para su desplazamiento, informa acerca de la velocidad y profundidad de ciertas formaciones del subsuelo.

El rayo reflejado vuelve al primer medio, formando el ángulo $r = i$ con la normal. El rayo refractado penetra al segundo medio formando un ángulo i_2 con la normal, dado por la relación de Snell. Si el ángulo i_1 es mayor que un cierto ángulo crítico es decir, tal que el ángulo i_2 resulte mayor de 90° ; entonces no se produce la refracción y toda la energía es reflejada. Si el ángulo de incidencia es tal que el ángulo refractado es igual a 90° , el rayo refractado viaja por la superficie del segundo medio. El ángulo de incidencia que produce el ángulo de refracción, igual a 90° , se llama ángulo crítico de incidencia y tiene mucha importancia en las interpretaciones del método de refracción.

V.3) RELACION TIEMPO DISTANCIA PARA CAPAS HORIZONTALES.

Considérese un perfil sobre el cuál se realiza una explosión, y a distancias crecientes se ubican los geófonos o detectores.

El tiempo de la onda refractada para 2 medios sería:

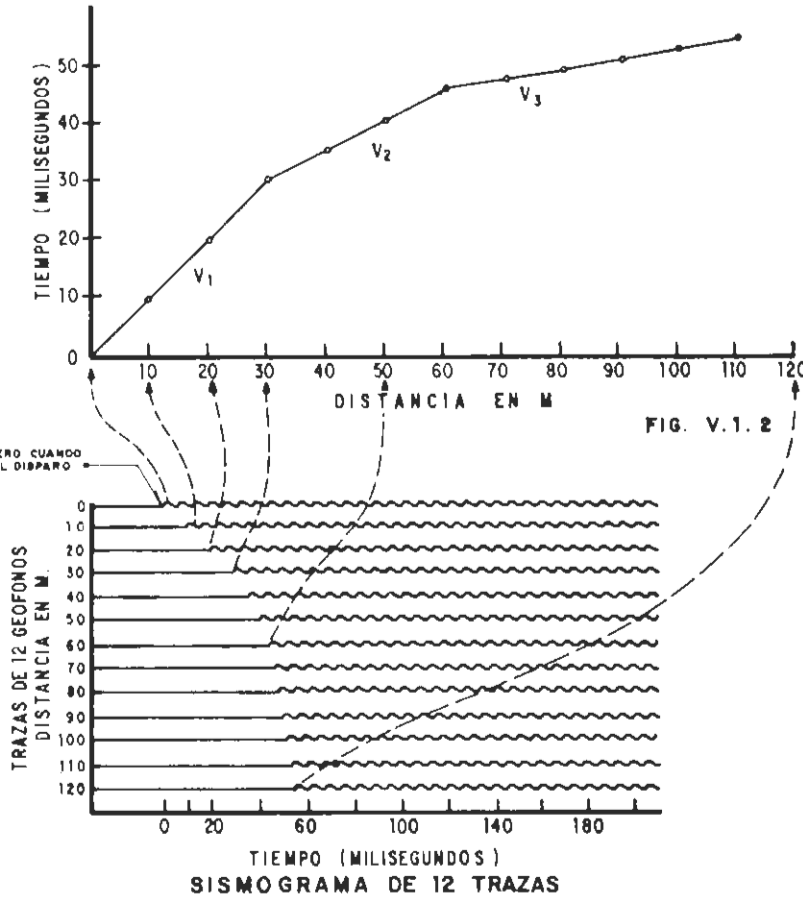


FIG. V.1.1.

El fenómeno de la refracción está definido por la Ley de Snell, la cuál nos dice que si el rayo incidente sobre el contacto entre dos medios, forma un ángulo i_1 con la normal al contacto (Fig. V.2.1), el rayo refractado en el medio adyacente formara un ángulo i_2 tal que: $\text{Sen } i_1 / \text{Sen } i_2 = V_1 / V_2$

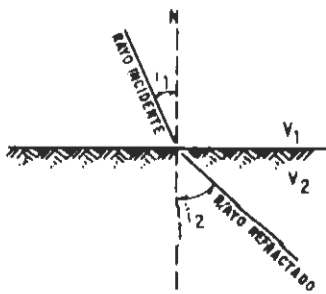
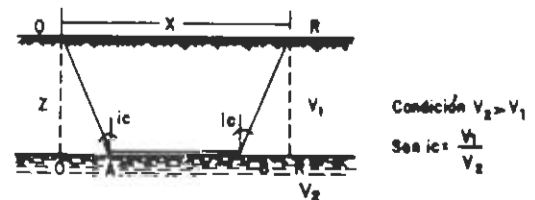


Fig. V.2.1

donde V_1 es la velocidad de propagación de la onda elástica en el primer medio, y V_2 es la velocidad en el segundo medio.

En el caso general, el rayo iniciado en un punto de origen al llegar a la superficie de contacto que separa los dos medios, producirá tanto un rayo reflejado como un rayo refractado en el punto de incidencia.



$$t_{OABR} = \frac{OA}{V_1} + \frac{AB}{V_2} + \frac{BR}{V_1}$$

$$OA = BR = Z \sec ic$$

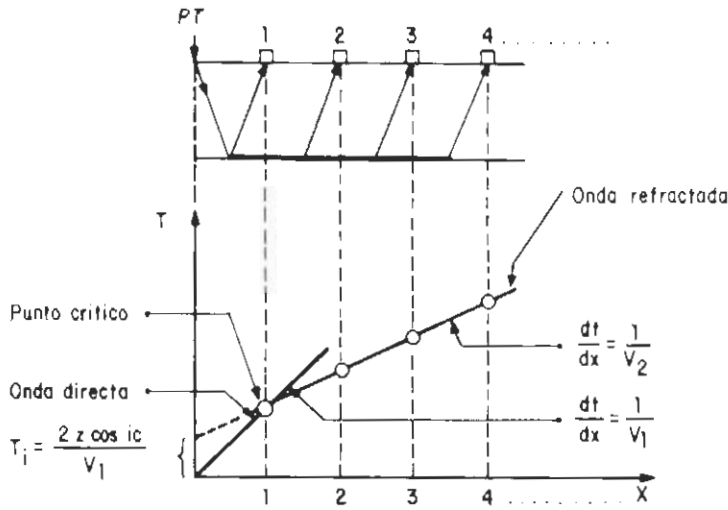
$$AB = OR - OA - BR = x - Z \tan ic - Z \tan ic = x - 2Z \tan ic$$

$$t = \frac{Z \sec ic}{V_1} + \frac{x - 2Z \tan ic}{V_2} + \frac{Z \sec ic}{V_1}$$

$$t = \frac{x}{V_2} + 2Z \left(\frac{1}{V_1} \sec ic - \frac{1}{V_2} \tan ic \right)$$

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2Z}{V_1 \cos ic} (1 - \sin^2 ic) \therefore t = \frac{x}{V_2} + \frac{2Z \cos ic}{V_1}$$

En coordenadas rectangulares, se grafican en las abscisas, los espaciamientos respectivos de los detectores y en las ordenadas los tiempos de llegada de las ondas. Esta grafica se denomina de tiempo-distancia o solo T-X (Fig. V.3.1).



$$\text{Onda directa} = \frac{X}{v_1}$$

$$\text{Onda refractada} = \frac{X}{v_2} + \frac{2z \cos ic}{v_1}$$

A partir de la gráfica podemos determinar las velocidades y la profundidad del horizonte refractor.

Las velocidades las determinamos con el recíproco de la pendiente.

La profundidad z , se puede deducir a partir del tiempo de intercepción.

$$\text{Tenemos: } T_i = \frac{2z \cos ic}{v_1} \quad z = \frac{v_1 T_i}{2 \cos ic}$$

$$\text{Como son } ic = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \cos ic = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}}$$

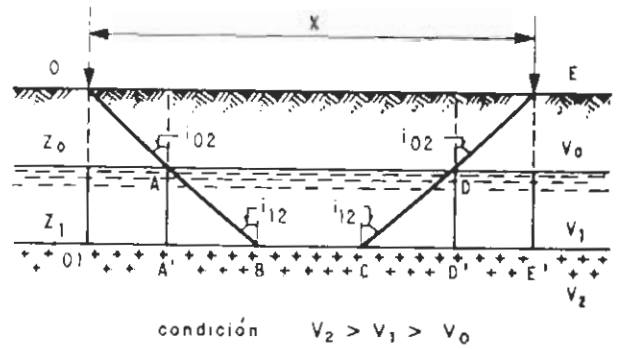
$$\therefore z = \frac{v_1 T_i}{2 \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}}}$$

Otra forma de determinar la profundidad, es en función de la distancia crítica.

Distancia Crítica. - A una distancia X_c (vease Fig.V.3.1) los dos segmentos se cortan; a distancias menores que ésta, la onda directa que se propaga siguiendo la parte superior de la capa de velocidad v_1 , es la primera en llegar al detector. A distancias mayores, la onda refractada en la superficie de separación llega antes que la onda directa. Por esta razón, X_c es denominada distancia crítica.

El tiempo empleado por la onda directa, es el mismo que el de la onda refractada en el punto crítico i.e., a la distancia crítica.

$$\frac{X_c}{v_1} = \frac{X_c}{v_2} + \frac{2z \cos ic}{v_1}; X_c \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) = \frac{2z}{v_1} \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}}$$



Despejando z :

$$z = \frac{X_c}{2} \frac{1 - \frac{v_1}{v_2}}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}}} \quad \text{Multiplicando por } v_2$$

$$z = \frac{X_c}{2} \frac{v_2 - v_1}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad \therefore z = \frac{X_c}{2} \cdot \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}}$$

CASO DE 3 CAPAS

Para calcular el tiempo de la onda refractada en el caso de 3 capas, se procede de manera similar al problema de 2.

$$\frac{\text{Sen } i_{02}}{v_0} = \frac{\text{Sen } i_{12}}{v_1} = \frac{1}{v_2} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Sen } i_{02} = \frac{v_0}{v_2} \\ \text{Sen } i_{12} = \frac{v_1}{v_2} \end{array} \right.$$

$$t = \frac{OA}{v_0} + \frac{AB}{v_1} + \frac{BC}{v_2} + \frac{CD}{v_1} + \frac{DE}{v_0}; \text{ y sabiendo que:}$$

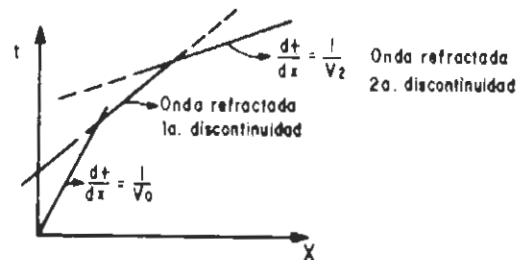
$$OA = DE = z \quad \text{Sec } i_{02}$$

$$AB = CD = z_1 \quad \text{Sec } i_{12}$$

$$BC = X - 2z_0 \tan i_{02} - 2z_1 \tan i_{12}; \text{ se puede llegar:}$$

$$t = \frac{X}{v_2} + \frac{2z_0 \cos i_{02}}{v_0} + \frac{2z_1 \cos i_{12}}{v_1}$$

La gráfica tiempo-distancia sería:



$$(1) \quad t \text{ onda directa} = \frac{X}{V_0}$$

$$(2) \quad t \text{ 1a. discontinuidad} = \frac{X}{V_1} + \frac{2z_0 \cos i_{02}}{V_0}$$

$$(3) \quad t \text{ 2a discontinuidad} = \frac{X}{V_2} + \frac{2z_0 \cos i_{02}}{V_0} + \frac{2z_1 \cos i_{12}}{V_1}$$

V.4).- CASO DE CAPAS INCLINADAS

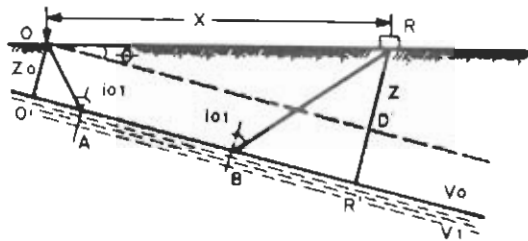
Cuando las capas no son horizontales ni paralelas a la superficie, sino que tienen cierta inclinación, las fórmulas anteriores ya no son aplicables, -- pues la gráfica T-X no permanece igual de un lugar a otro.

Si el perfil se tira pendiente-abajo (es decir, en el sentido del echado) por ejemplo, la línea de velocidad de la segunda capa ya no representa la velocidad verdadera de esta capa, sino una velocidad aparente más baja que la verdadera, porque a medida que el receptor se aleja del punto de tiro el espesor de la capa superyacente crece y el tiempo del rayo emergente aumenta. De la misma manera, si se tira pendiente arriba (en el sentido contrario del echado), la velocidad aparente aparece más alta que la velocidad verdadera.

Para la determinación de la profundidad de la segunda capa y el ángulo de su pendiente, se requiere el conocimiento de las dos velocidades aparentes. Por consiguiente, es necesario tirar el perfil en ambos sentidos.

V.4.1) FORMULA PARA LA DETERMINACION DEL ECHADO Y DE LA VELOCIDAD DE UNA CAPA INCLINADA

En el caso de un sólo contacto de pendiente uniforme que separa dos capas de velocidades constantes, V_0 y V_1 siendo $V_1 > V_0$, el tiempo del rayo refractado es:



$$t = \frac{OA}{V_0} + \frac{AB}{V_1} + \frac{BR}{V_0}$$

Sabiendo que:

$$\begin{aligned} OA &= Z_0 \sec i_{01} \\ O'R' &= X \cos \phi \\ AB &= O'R' - O'A - BR' = X \cos \phi - Z_0 \tan i_{01} - Z \tan i_{01} \\ BR &= Z \sec i_{01} \\ O'A &= Z_0 \tan i_{01} \\ BR' &= Z \tan i_{01} \\ Z &= R'D + DR = Z_0 + X \sin \phi \end{aligned}$$

Se puede llegar a la ec. del tiempo que es:

$$t_b = \frac{2Z_0 \cos i_{01}}{V_0} + \frac{X \sin(i_{01} + \phi)}{V_1} \quad (1)$$

Si la dirección del tiro es en el sentido contrario del echado se tiene:

$$t_s = \frac{2Z \cos i_{01}}{V_0} + \frac{X \sin(i_{01} - \phi)}{V_1} \quad (2)$$

Diferenciando las ecuaciones (1&2) y sacando el recíproco obtenemos dos velocidades aparentes:

Us representando la velocidad aparente al tirar -- pendientes arriba (contra el echado) y Ub la velocidad aparente al tirar pendiente abajo (en el sentido del echado)

$$U_s = \frac{V_1 \sin i_{01}}{\sin(i_{01} - \phi)} = \frac{V_0}{\sin(i_{01} - \phi)} \quad (3)$$

$$U_b = \frac{V_1 \sin i_{01}}{\sin(i_{01} + \phi)} = \frac{V_0}{\sin(i_{01} + \phi)} \quad (4)$$

De las esc. 3 & 4 se puede calcular la pendiente y la velocidad.

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\sin^{-1} \frac{V_0}{U_b} - \sin^{-1} \frac{V_0}{U_s} \right) \quad (5)$$

$$i_{01} = \frac{1}{2} \left(\sin^{-1} \frac{V_0}{U_b} + \sin^{-1} \frac{V_0}{U_s} \right) \quad (6)$$

La velocidad verdadera de la segunda capa no es promedio aritmético de las dos velocidades aparentes, -- sino:

$$V_1 = 2 \cos \alpha \frac{U_s U_b}{U_s + U_b} = \frac{V_0}{\sin i_{01}} \quad (7)$$

V.5) COMENTARIOS

Se vio que la condición para que exista una -- refracción es:

$$v_1/v_2 < 1 \quad \text{o} \quad v_2 > v_1$$

considérese el caso de tres capas donde:

$$v_2 < v_1 < v_3$$

Como el caso de una intercalación de arcilla entre -- gravas y calizas. El análisis de la gráfica T-X (Fig. V.5.1) muestra que la velocidad (v_2 de la segunda capa) no aparece y que el comportamiento de la gráfica -- es como si únicamente existieran dos capas.

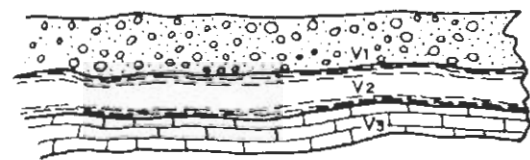
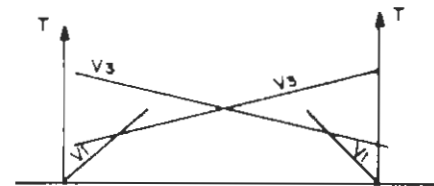
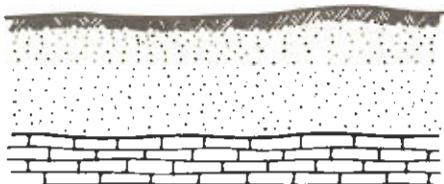
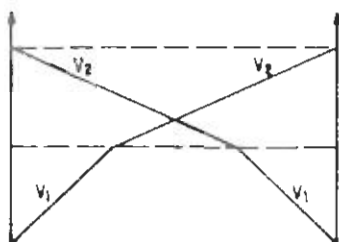


Fig. V.5.1.

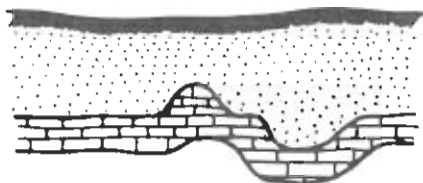
Este caso nos señala la limitante del método. Sin embargo, en condiciones donde la velocidades de propagación de los diferentes estratos aumenta con la profundidad, el método sísmico de refracción nos definirá los contactos con mayor exactitud que el método eléctrico resistivo.

A continuación se ilustra el comportamiento - de algunas gráficas tiempo-distancia, para diferentes condiciones del subsuelo, en perfiles tirados en --- ambos sentidos.

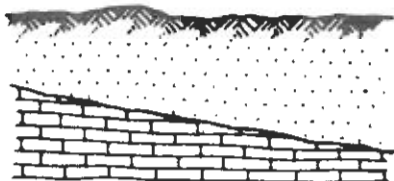
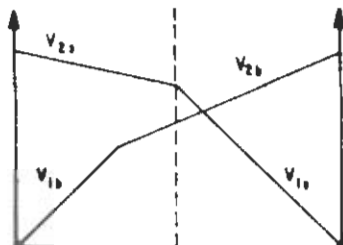
CAPAS HORIZONTALES



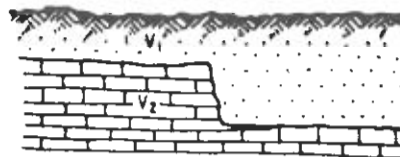
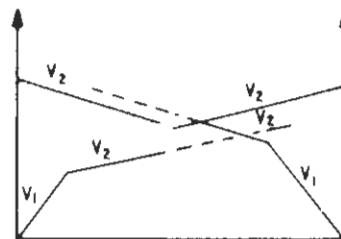
PUNTOS BAJOS O ALTOS DE ROCA



CAPAS INCLINADAS



CAPA ESCALONADA



BIBLIOGRAFIA

DOBRIN, M.B.

INTRODUCCION A LA --
PROSPECCION GEOPISI-
CA - OMEGA, S.A.
MEXICO - 1960

OLHOVICH, V.A.

CURSO DE SISMOLOGIA
APLICADA-REVERTE
MEXICO - 1939

PARASNIS, D.S.

GEOFISICA MINERA
PARANINFO-MADRID
1971

J.L.ASTIER

GEOFISICA APLICADA A
LA HIDROGEOLOGIA-
PARANINFO- MADRID -
1975

E. ORELLANA

PROSPECCION GEOELEC-
TRICA- PARANINFO -
MADRID 1972