

Propiedades geofísicas de rocas y suelos calcáreos. Mediciones de laboratorio en especímenes pequeños

Leopoldo Espinosa Graham¹ y Georgina Elizabeth Carrillo Martínez²

RESUMEN

Con la finalidad de conocer la respuesta de dos propiedades geofísicas en materiales pétreos comúnmente presentes en la zona insaturada de la Península de Yucatán, se llevó a cabo un conjunto de mediciones de laboratorio de resistividad eléctrica y de velocidad de onda elástica en especímenes pequeños de esos materiales. Las rocas estudiadas fueron: la caliza de la capa superficial, conocida como *laja*; el material calcáreo no consolidado denominado *sahcab* y el limo arcilloso rojo que se conoce también como *cancab*. Las mediciones se hicieron sometiendo a los especímenes inicialmente a un estado seco y después a condiciones de humedad parcial y de saturación con agua de bajo contenido salino.

Los resultados indican que la velocidad de onda elástica es cuatro veces mayor en la roca caliza que en los otros dos materiales estudiados y que ésta característica no es sensible a las condiciones de humedad de los materiales. En cambio, la resistividad eléctrica sí es muy sensible a la humedad ya que, independientemente del material, esta propiedad aumenta en forma importante al disminuir el agua contenida en los especímenes de prueba.

En el presente trabajo se presentan, a partir del análisis de los resultados obtenidos, algunas consideraciones prácticas, útiles en la prospección geofísica.

Palabras clave: Rocas sedimentarias calcáreas. Limo arcilloso rojo. Resistividad eléctrica. Velocidad de onda compresional.

INTRODUCCIÓN

En la ingeniería de la construcción en general, y en la ingeniería de cimentaciones en particular, se requiere conocer la existencia y distribución de los materiales del subsuelo y sobre todo, como es el caso de las formaciones calcáreas, de las cavidades de disolución.

Para lograr lo anterior, se hace necesario realizar una exploración laboriosa y costosa, denominada exploración directa, que se efectúa con base en perforaciones con y sin obtención de núcleos, excavación de trincheras y de pozos a cielo abierto.

Debido al alto costo de la exploración directa, los métodos geofísicos de exploración,

denominados métodos indirectos, debieran ser más utilizados (Sánchez et al, 1998). Es importante señalar que estos métodos indirectos se han estado empleando en los últimos años para evaluar el impacto de la carsticidad en las obras de ingeniería y en el medio ambiente (Beck, B. F. et al, 1999).

Se sabe hoy día (Burguer, 1992, Robinson y Coruh, 1988), que se cuenta con varios métodos geofísicos que pueden aplicarse a la exploración geotécnica como son: los métodos sísmicos de refracción y reflexión; los eléctricos de resistividad, de potencial inducido, potencial espontáneo, telúricos y magnetotelúricos, gravimétricos y magnéticos.

Es fácil entender que el conocimiento de las propiedades geofísicas de los materiales que constituyen la capa superficial de un terreno resulta

¹ Profesor Investigador de la Maestría en Construcción de la Facultad de Ingeniería UADY.

² Profesora del Instituto Tecnológico de Progreso

de gran utilidad en la interpretación de los resultados de los trabajos de prospección geofísica.

Las rocas sedimentarias calcáreas tienen una resistividad eléctrica que varía dentro de un intervalo de valores muy amplio, lo cual, en una primera instancia, no es muy alentador para pensar caracterizarlas mediante este parámetro. Telford, W. M. et al (1976), por ejemplo, postulan que en formaciones constituidas básicamente por calizas, la resistividad varía entre 50 y 10 millones de ohm-m y Ward, S. H: (1990) asevera que formaciones térreas con granulometrías que incluyen desde arcillas hasta gravas arenosas, en condiciones parcialmente húmedas, la resistividad puede variar de desde menos de decenas a miles de ohms-m. Lo anterior quiere decir que los intervalos de variación son muy grandes. Sin embargo, en el extremo correspondiente a las resistividades eléctricas más altas, que por lo general corresponden a los materiales en estado seco, las rocas calizas alcanzan hasta 10 millones de ohms-m mientras que los materiales térreos llegan a unos cuantos miles, es decir, que bajo determinadas circunstancias, sí es factible distinguir entre las rocas calcáreas y los materiales térreos mediante la resistividad.

En cuanto al intervalo de variación de la velocidad de la onda elástica o compresional en formaciones calcáreas, Press (1966) asigna a las calizas una magnitud de 2000 a 6000 m/s y Parasnis (1962) de 3,500 a 6,500 m/s a calizas y dolomitas. La misma referencia (Press 1966), proporciona valores de 300 a 2,500 m/s en materiales térreos arcillosos, limosos, arenosos y con gravas desde poco compactos a compactos, saturados e insaturados.

Como puede observarse, los intervalos de variación de ambos parámetros físicos son grandes en general. Sin embargo, en condiciones específicas de humedad, porosidad, granulometría, etc., estos intervalos son mucho menores, lo cual facilita la caracterización mediante los parámetros geofísicos mencionados. Es decir, los grupos de roca caliza y de materiales calcáreos no consolidados como el *sahcab* en determinadas circunstancias físicas sí se pueden caracterizar por medio de los factores geofísicos arriba mencionados.

Con base en lo anteriormente expuesto, se concibió una investigación de laboratorio sobre las propiedades de resistividad eléctrica y velocidad de onda de compresión, en diferentes estados de humedad, utilizando en una etapa inicial, especímenes pequeños pero representativos de los materiales más abundantes del subsuelo de la

Península de Yucatán que son la roca caliza, el material no consolidado, *sahcab*, y el suelo limo arcilloso rojo, *cancab*.

Los trabajos se llevaron a cabo siempre manteniendo en mente la hipótesis de que si se lograba caracterizar geofísicamente los materiales estudiados en varias condiciones físicas se podría mejorar la interpretación de los resultados de estudios de exploración geofísica en los subsuelos constituidos por esos mismos materiales.

Al formular las conclusiones se ha tomado en cuenta que a pesar de la uniformidad regional que guardan los materiales mencionados debido a su origen sedimentario calcáreo, existe en ellos una cierta heterogeneidad inclusive dentro de un mismo material, de tal manera que con el número de especímenes utilizados en el estudio y el número y localización de los sitios de muestreo de ninguna manera se cubren todos los suelos y rocas de este tipo. Sin embargo, algunas de las conclusiones obtenidas pueden generalizarse como se verá más adelante.

METODOLOGÍA

Las muestras provienen de una cantera situada a un kilómetro al oriente del pueblo de Santa Gertrudis Copó y de un banco de préstamo que se encuentra a la mitad del tramo de carretera que comunica la población de Dzityá con el Anillo Periférico al norte de la ciudad de Mérida. Estas muestras son representativas de los materiales que afloran en una amplia zona de la Península de Yucatán. Los materiales muestreados son la roca caliza del estrato superficial, el material calcáreo no consolidado (*sahcab*) y la tierra roja o suelo limo arcilloso de origen vegetal (*cancab*).

Ambos sitios seleccionados se ubican en la formación geológica Carrillo Puerto que es una de las más extensas en la región, aflorando al norte, al este y al sureste de la Península de Yucatán, cubriendo más del 50% de los Estados de Yucatán y Quintana Roo. Esta formación pertenece a las épocas del Plioceno-Mioceno (Bonet y Butterlin, 1959).

El estrato de roca caliza superficial, en los sitios indicados, tiene un espesor variable de uno a dos metros. Los bloques fueron removidos del estrato superficial usando pico, pala y barretón. En cada caso se tuvo el cuidado de señalar la cara superior y la profundidad del bloque recolectado dentro del estrato, ya que las características físicas de la roca cercana a

la superficie superior pueden ser muy diferentes a las subyacentes o cercanas al contacto con el material no consolidado (sahcab). Cada bloque de roca se transportó al laboratorio, y en éste se procedió a la extracción de los especímenes cilíndricos, utilizando una extractora de núcleos portátil.

El muestreo del material calcáreo no consolidado, sahcab, se llevó de la manera siguiente: Inicialmente se seleccionó una capa de este material. A continuación, se uniformizó una superficie de aproximadamente un metro cuadrado y se realizó en ella una cala volumétrica, de acuerdo a la norma estándar de SCT para carreteras, con el objeto de

obtener la humedad y grado de compactación del material in situ (Tabla 1). Enseguida, se procedió a remover el material en torno al sitio de la cala y a rescatar de 100 a 150 kilogramos de material para las pruebas de laboratorio.

La obtención del tercer material estudiado, el limo arcilloso rojo de origen vegetal, se llevó a cabo en una margen del extremo poniente de la cantera de Santa Gertrudis Copó donde se encuentra en la superficie y en oquedades superficiales rellenas del propio material. De este material se extrajeron 50 kilogramos aproximadamente.

Tabla 1. Resultados de las calas volumétricas en los sitios de estudio

Cala No.	Sitio	Profundidad (cm)	Peso volumétrico húmedo (kg/cm ²)	Peso volumétrico seco (kg/cm ²)	Humedad (%)
1	Copó	18.5	1647	1464	12.5
2	Copó	17.5	1785	1662	7.4
3	Copó	18.0	1678	1485	13.0
4	Copó	18.0	1709	1456	17.3
5	Dzityá	16.0	1962	1683	16.7
6	Dzityá	17.0	2000	1669	19.9

Identificación y preparación de especímenes para las pruebas

Roca caliza. Como anteriormente se señaló, de cada uno de los bloques de roca de forma irregular, se extrajeron de dos a seis especímenes cilíndricos de 5.1 cm de diámetro y 10.2 cm de longitud, logrando un total de 169 (66 procedentes de la cantera de Santa Gertrudis Copó y 103 de la carretera a Dzityá). Una vez que el espécimen fue identificado con tinta indeleble se procedió de acuerdo a la secuencia que se indica más adelante.

Material calcáreo no consolidado (sahcab). Una vez extraído este material se transportó al laboratorio a donde llegó en estado suelto. Las mediciones de laboratorio se efectuaron en especímenes representativos del material en condiciones naturales. El peso volumétrico seco y la humedad in situ (Tabla 1) determinados durante el muestreo de campo como arriba se ha descrito varían entre 1.456 y 1.683 tn/m³ y 7.4 y 19.9 %, respectivamente, valores que fueron reproducidos en los especímenes fabricados en el laboratorio. Los especímenes se “fabricaron” compactando el material inicialmente suelto en un molde Proctor (10.16 cm de diámetro y una altura

aproximada de 11.64 cm), utilizando una presión de compactación de 140 kilogramos por centímetro cuadrado. De esta manera se elaboraron un total de 90 especímenes (30 procedentes de la cantera de Santa Gertrudis Copó y 60 de la carretera a Dzityá).

Suelo limo arcilloso de origen vegetal (cancab). Los especímenes de este material fueron preparados mediante el mismo procedimiento empleado para obtener los especímenes del material calcáreo no consolidado (sahcab). El total de especímenes utilizados fue de 15.

Agua empleada. El agua empleada para humedecer los especímenes de prueba, que es el agua que proviene del tanque elevado de la Facultad de Ingeniería de la UADY, tiene una conductividad eléctrica medida en el laboratorio de 1,200 a 1,500 μ mhos/cm valor equivalente a una resistividad eléctrica de 8.3 a 6.7 ohms-m, respectivamente.

Secuencia de mediciones y pruebas de laboratorio

La secuencia de mediciones de laboratorio en los especímenes de los tres materiales se efectuó partiendo siempre del estado saturado. En la roca

caliza la condición de saturación se alcanzó después de un período de 24 a 48 horas de inmersión en un recipiente de agua limpia. En los materiales térreos, sahcab y cancab, se tomó a la humedad óptima de compactación como equivalente a la de saturación. Enseguida, y después de efectuar en el espécimen saturado todas las pruebas geofísicas y físico-mecánicas no destructivas programadas, se llevó el espécimen al horno donde permaneció secándose un mínimo de 24 horas.

Finalmente, y después de llevar a cabo las pruebas correspondientes ya referidas en el espécimen seco, se le añadió agua por aspersión hasta llevarlo a una humedad intermedia entre los estados seco y saturado, efectuando por tercera vez todas las mediciones no destructivas programadas, concluyendo con la prueba de compresión simple en la cual se destruye el espécimen.

Por tanto, en cada uno de los tres estados se midieron la velocidad de onda compresional, la resistividad eléctrica, la porosidad, la humedad y el peso volumétrico, y en el estado de humedad intermedia la deformabilidad y la resistencia a la compresión simple.

La velocidad de onda compresional se midió mediante dispositivo especial denominado V-Meter, Modelo C-4902 (James Instruments, 1980), cuya precisión es de 0.1 microsegundos. Este instrumento mide en microsegundos el tiempo en el cual un pulso ultrasónico recorre la dimensión longitudinal de un espécimen cilíndrico del material en estudio.

La resistividad eléctrica se midió mediante un multímetro digital marca Tektronix, Modelo

DMM916, que mide la resistencia de los cilindros de los materiales estudiados con una precisión del 5%.

Las propiedades físico mecánicas mencionadas se midieron de acuerdo a las normas estándar de la SCT y la ASTM.

Información estadística

Para tener la información en un formato de analizar se calcularon la media y la desviación estándar de los parámetros geofísicos (resistividad eléctrica y velocidad de la onda compresional) para cada uno de los tres materiales estudiados en estado saturado, seco y con humedad intermedia. Posteriormente se procedió al análisis de cada sector de la información de intervalos de valores entre cada material por separado y después en conjunto, tomando nota de los valores que permitirán la identificación del material a partir de la medición del parámetro geofísico, es decir, cuando materiales diferentes o en diferente estado de humedad aportaron diferente valor del parámetro geofísico. Por otra parte, existe ambigüedad o ambivalencia en los valores, es decir, diferentes materiales o estados de humedad aportaron el mismo valor del parámetro geofísico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presenta un resumen de los resultados. Las tablas 2 a 4 corresponden a los materiales del banco Copó y las tablas 5 a 7 a los del banco Dzityá.

Tabla 2. Resultados de mediciones en estado saturado (Cantera de Copó).

Material	Resistividad eléctrica (ohm-m) Saturado	Velocidad de onda (km/s) Saturado
Roca caliza	Media 2432	Media 4.53
	Desv. estándar 2485	Desv. estándar 0.864
Sahcab	Media 6104	Media 0.526
	Desv. estándar 4491	Desv. estándar 0.060
Cancab	Media 944	Media 0.505
	Desv. estándar 383	Desv. estándar 0.035

Tabla 3. Resultados de mediciones en estado seco (Cantera de Copó).

Material	Resistividad eléctrica (ohm-m) Seco	Velocidad de onda (m/s) Seco
Roca caliza	Media 1.07×10^6	Media 4.55
	Desv. estándar 1.62×10^6	Desv. estándar 0.787
Sahcab	Media 21.0×10^6	Media 1.26
	Desv. estándar 22.4×10^6	Desv. estándar 0.153
Cancab	Media 1.58×10^6	Media 1.04
	Desv. estándar 0.45×10^6	Desv. estándar 0.134

Tabla 4. Resultados de mediciones en estado intermedio de humedad. (C. de Copó).

Material	Resistividad eléctrica (ohm-m) Intermedio		Velocidad de onda (km/s) Intermedio	
Roca caliza	Media	3914	Media	4.46
	Desv. estándar	4315	Desv. estándar	0.761
Sahcab	Media	23.6×10^3	Media	1.13
	Desv. estándar	22.0×10^3	Desv. estándar	0.125
Cancab	Media	31.6×10^3	Media	0.974
	Desv. estándar	16.6×10^3	Desv. estándar	0.132

Tabla 5. Resultados de mediciones en estado saturado (Cantera de Dzityá).

Material	Resistividad eléctrica (ohm-m) Saturado		Velocidad de onda (km/s) Saturado	
Roca caliza	Media	3358	Media	4.32
	Desv. estándar	2850	Desv. estándar	0.854
Sahcab	Media	590	Media	0.593
	Desv. estándar	496	Desv. estándar	0.062

Tabla 6. Resultados de mediciones en estado seco (Cantera de Dzityá).

Material	Resistividad eléctrica (ohm-m) Seco		Velocidad de onda (km/s) Seco	
Roca caliza	Media	2.13×10^6	Media	4.34
	Desv. estándar	1.33×10^6	Desv. estándar	0.798
Sahcab	Media	0.97×10^6	Media	1.89
	Desv. estándar	0.80×10^6	Desv. estándar	0.114

Tabla 7. Resultados de mediciones en estado intermedio de humedad (Cantera de Dzityá).

Material	Resistividad eléctrica (ohm-m) Intermedio		Velocidad de onda (km/s) Intermedio	
Roca caliza	Media	5948	Media	4.31
	Desv. estándar	5832	Desv. estándar	0.874
Sahcab	Media	3396	Media	1.64
	Desv. estándar	4898	Desv. estándar	0.158

Las tablas 2 a 7 muestran cómo varían las propiedades geofísicas medidas tanto en función del material estudiado como de la humedad. Es notable que la media de la velocidad de onda ante la excitación ultrasónica es independientemente de la humedad en la roca caliza y la desviación estándar no rebasa en ningún caso el 20% de la media. Lo anteriormente expresado puede apreciarse al observar que los promedios de los valores de este parámetro sólo varían entre un mínimo de 4.46 km/s y un máximo de 4.55 km/s en la roca de Copó y entre 4.31 km/s y 4.34 km/s en la roca de Dzityá, independientemente que el espécimen esté en estado saturado, seco o con una humedad intermedia.

En el sahcab se nota un claro aumento de la velocidad conforme el espécimen pierde agua. Así, puede verse en las mismas tablas, que los valores de la velocidad media en el sahcab de Copó, se van incrementando de 0.526 a 1.13 y a 1.26 km/s, desde el espécimen saturado al intermedio y de éste al seco y de 0.593 a 1.64 y a 1.89 km/s, respectivamente, en el sahcab de Dzityá. Un efecto semejante se obtuvo en el cancab, cuyos valores medios pasan por los valores 0.505, 0.985 y 1.07 km/s, respectivamente.

La interpretación de estos resultados puede presentarse con apoyo en la ecuación de la velocidad de la onda de compresión V_p tomada de la teoría de la elasticidad (Timoshenko y Goodier, 1934):

$$V_p = \sqrt{(E/\rho)(1 - \nu) / ((1 - 2\nu)(1 + \nu))}$$

Donde: E = módulo de elasticidad; ρ = densidad; ν = relación de Poisson, representando éstos parámetros el medio a través del cual viaja la onda elástica, es decir, son parámetros de la masa con sus tres fases : la sólida, la líquida y la gaseosa.

Puede verse que la velocidad de la onda compresional es de 4 a 8 veces mayor en la roca que en los materiales térreos (sahcab y cancab). Esta importante diferencia encuentra una explicación casi directa en el hecho de que el módulo E en la roca es de 4 a 8 veces mayor que en los materiales térreos. Tanto en el sahcab como en el cancab la velocidad aumenta conforme la humedad del espécimen disminuye. Este comportamiento se explica también en función del módulo elástico E, ya que el material térreo se endurece o “rigidiza” al secarse. En otras palabras, el módulo E aumenta conforme el espécimen pierde el agua de los espacios intergranulares.

La resistividad eléctrica varía, con respecto a la humedad, en forma muy diferente, a como sucede con la velocidad de onda elástica.

A continuación, se presentan los valores de la media de la resistividad eléctrica en cada uno de los materiales estudiados desde el estado de saturación (humedad óptima en el sahcab y en el cancab) al estado intermedio y de éste al seco.

En materiales rocosos los valores medios fueron de: 2432, 3914 y 1.07×10^6 ohms-m en la roca caliza de Copó y de 3358, 5948 y 2.13×10^6 ohms-m, respectivamente, en la roca caliza de Dzityá. En el sahcab y en el cancab la influencia de la humedad en la resistividad eléctrica es aún mayor.

En el sahcab de Copó los valores de la media son: 6,104, 23.610^3 y 21.0×10^6 ohms-m y en el sahcab de Dzityá: 590, 3396 y 0.97×10^6 ohms-m, respectivamente.

El cancab, (que se obtuvo sólo del sitio Copó), con la misma secuencia de estados de humedad, se obtuvieron los valores siguientes: 944, 31.6×10^3 y 1.58×10^6 , respectivamente.

El incremento que experimenta con el secado la resistividad eléctrica en los tres materiales ensayados se puede explicar por el hecho de que los minerales constituyentes de los mismos poseen una muy alta resistividad eléctrica y sólo cuando sus intersticios se llenan parcial o totalmente de agua es

cuando se convierte el material en un medio conductor. Las diferencias de resistividad eléctrica entre la roca caliza y el sahcab, materiales ambos constituidos principalmente de carbonato calcio, pueden deberse a sus diferencias en la magnitud y distribución de sus espacios vacíos y al agua adsorbida en sus partículas más pequeñas. Ahora bien, la resistividad eléctrica del sahcab es mayor que la del cancab debido al mayor contenido óxido de hierro en este último.

Puede observarse también en las tablas de resultados que la desviación estándar de la velocidad de onda ultrasónica es siempre menor al 20 % de los valores medios y esto resulta cierto independientemente del estado de humedad de los especímenes. Es oportuno señalar que a medida que la desviación estándar es menor, la caracterización o identificación del material estudiado a través del parámetro geofísico medido y analizado (la velocidad de onda elástica en este caso) será más confiable y viceversa.

En las Figuras 1 y 2 puede apreciarse la variación de las propiedades geofísicas en función de la humedad según las mediciones efectuadas en especímenes saturados y de humedad intermedia en la roca caliza de ambos sitios.

En las Figuras 3 y 4 se muestra la variación de las propiedades geofísicas en función de la humedad en todos los especímenes fabricados con el material calcáreo no consolidado (sahcab) en estado saturado y humedad intermedia.

En las Figuras 5 y 6, se indica la variación de las propiedades geofísicas en función de la humedad obtenida realizando mediciones en especímenes de limo arcilloso rojo (cancab) con la humedad óptima e intermedia.

En la Figura 1, se observa una gran dispersión de la resistividad eléctrica de la roca caliza en especímenes con valores bajos de humedad y cómo ésta va disminuyendo a medida que la roca se aproxima al estado saturado.

En la Figura 2 se muestra el fenómeno inverso con la velocidad de onda compresional, es decir, que en especímenes secos la dispersión es pequeña y aumenta a medida que la humedad aumenta. Sin embargo, la dispersión en este caso no crece en los especímenes saturados.

En las Figuras 1 a 4 es notable el fenómeno conocido como “percolación”, el cual consiste en que

para determinado valor de la humedad del espécimen la dispersión del parámetro geofísico disminuye

súbitamente y para valores mayores la dispersión existe pero es mucho menor.

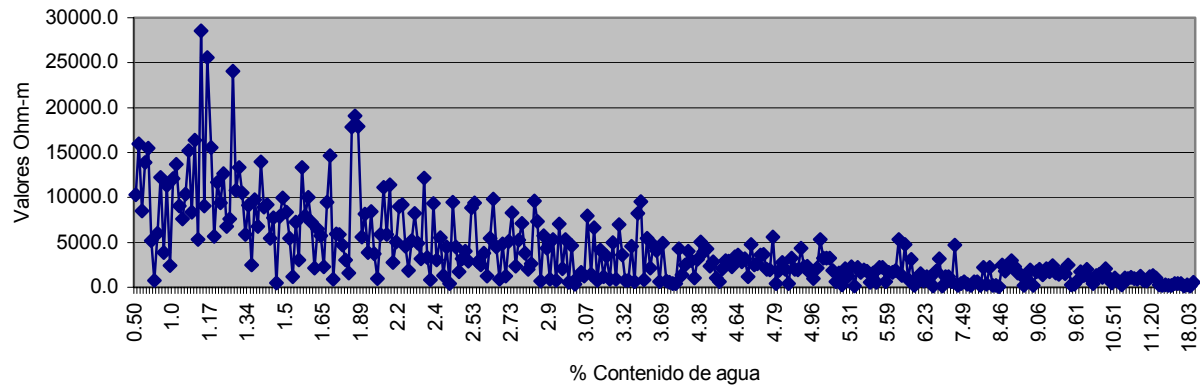


Figura 1. Resistividad eléctrica de la roca caliza

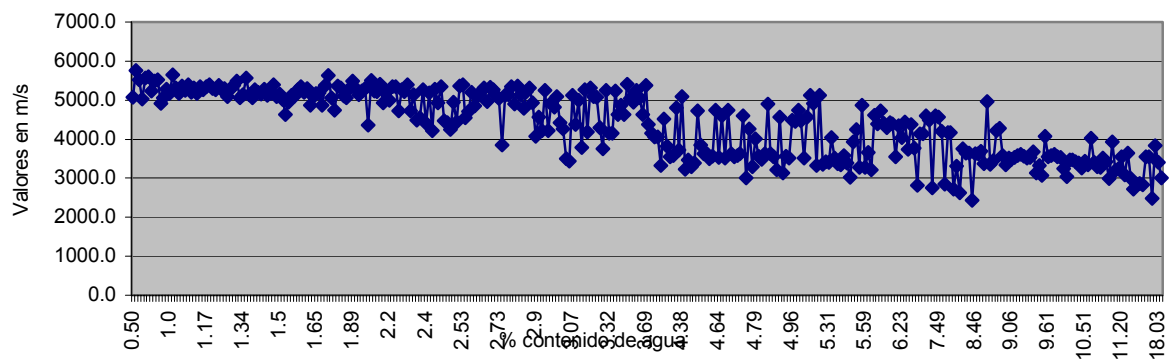


Figura 2. Velocidad de pulso ultrasónico de la roca caliza

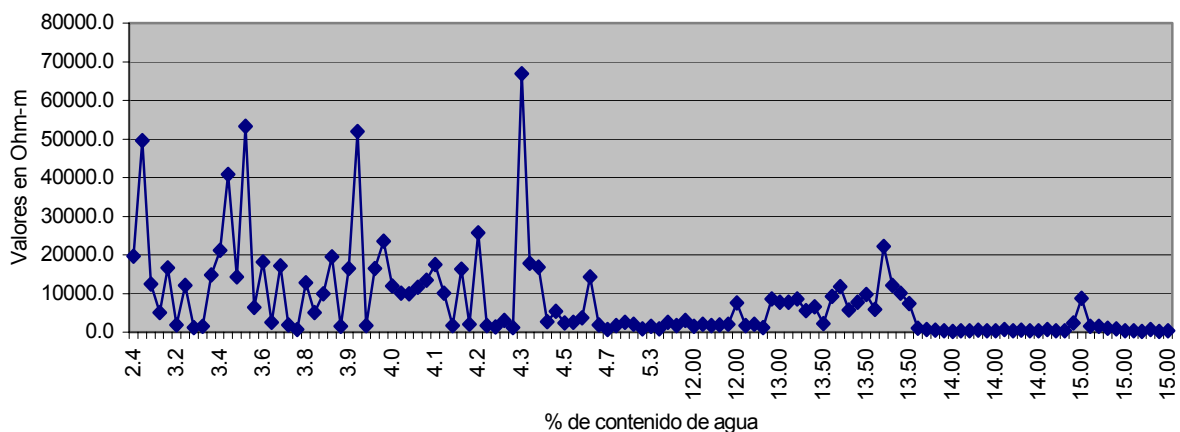


Figura 3. Resistividad eléctrica de material no consolidado (sahcab)

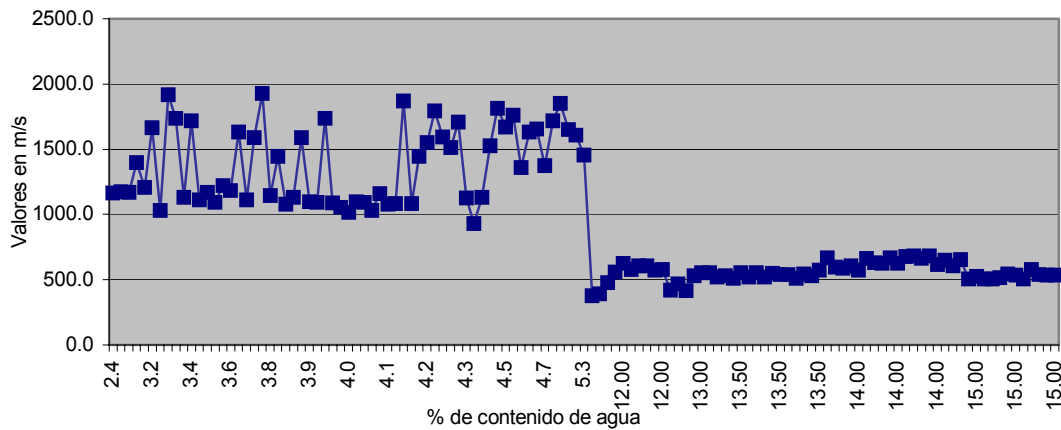


Figura 4. Velocidad de pulso ultrasónico de material no consolidado (sahcab)

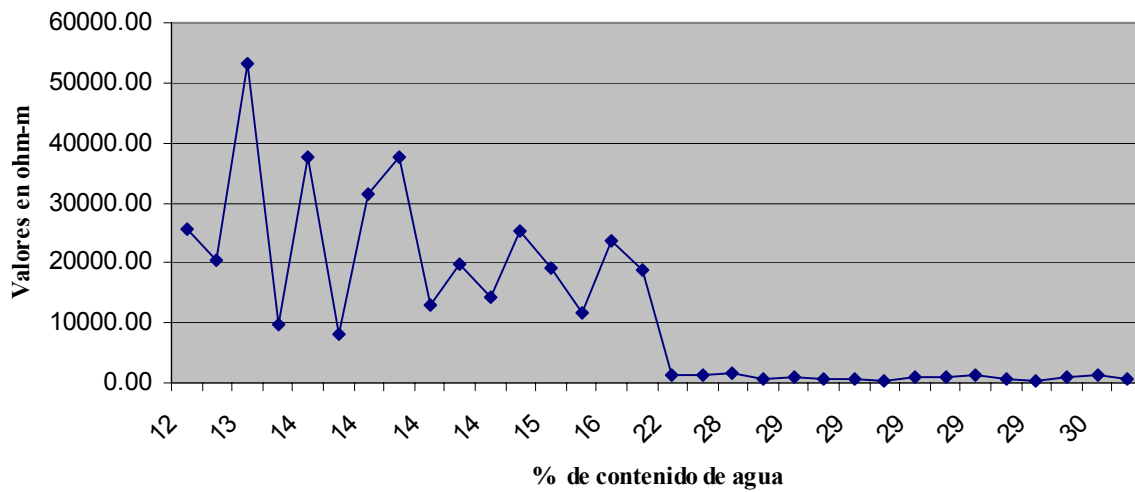


Figura 5. Resistividad eléctrica del cancab

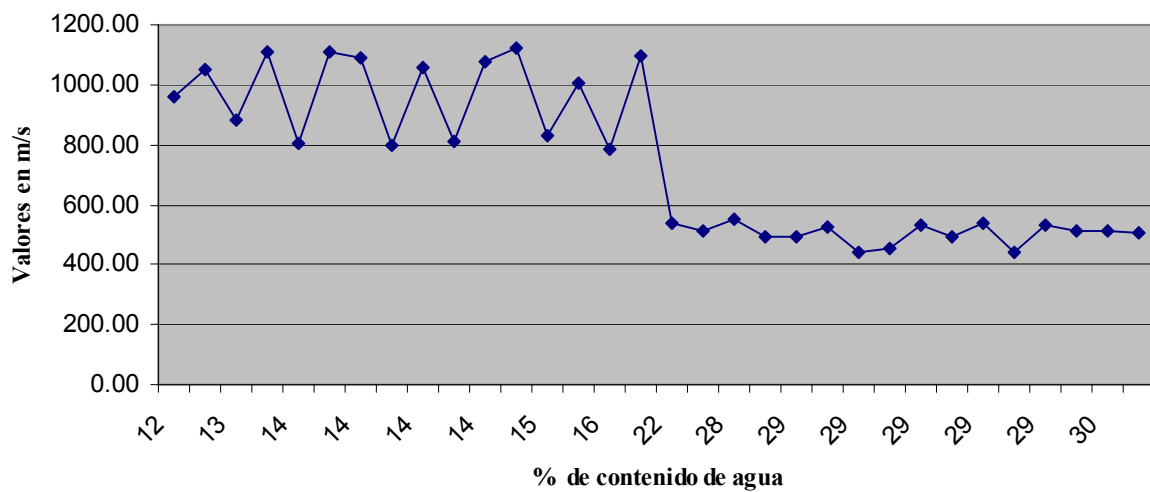


Figura 6. Velocidad de pulso ultrasónico en cancab

En las Figuras 5 y 6 referentes al suelo limo arcilloso (cancab), a pesar de que las diferencias tanto químicas como granulométricas entre este material y el calcáreo no consolidado (sahcab) son importantes, es notable también la presencia del fenómeno de “percolación”, aunque debe señalarse que el cambio brusco de la dispersión aparece para valores de la humedad que son significativamente mayores en el limo arcilloso (cancab) que en el material calcáreo no consolidado (sahcab).

Al analizar los resultados se enfocó la atención particularmente en las diferencias de los valores geofísicos medidos en cada tipo de material (roca caliza, material calcáreo no consolidado, limo arcilloso rojo de origen vegetal), tomando en cuenta el contenido de agua (humedad) y la compactación.

En los tres materiales estudiados los valores de resistividad eléctrica y de velocidad de onda ultrasónica son inversamente proporcionales al contenido de agua de las muestras, esto es, en estado seco se obtuvieron los valores mayores y en estado saturado los valores menores.

La resistividad eléctrica, en particular, es muy alta en los especímenes secos en comparación con los valores obtenidos con cualquier contenido de agua.

La velocidad de onda fue mayor a medida que los materiales son más rígidos y menos deformables, mientras que en materiales con alto contenido de finos y muy húmedos o saturados, el valor de la velocidad de onda fue menor.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Algunas de las conclusiones y recomendaciones que se han podido formular son las siguientes:

1. Los valores de la velocidad de la onda elástica son mayores (cuatro veces) en la roca elástica que los de los materiales térreos (sahcab y cancab). En cambio en estos dos últimos materiales los valores de este parámetro geofísico son muy parecidos. De esta conclusión se puede derivar una recomendación práctica que puede ser útil dentro del contexto de los trabajos de prospección geofísica.

Para detectar o confirmar la existencia de estratos de roca caliza en el subsuelo de la Península, en el cual la roca caliza está siempre presente junto con capas del material calcáreo no consolidado (sahcab),

deben realizarse mediciones de la velocidad de la onda elástica.

2. En cualquiera de los materiales estudiados la resistividad eléctrica es mucho más sensible a la humedad que la velocidad de onda. De esta conclusión se puede derivar la segunda recomendación práctica siguiente:

Para estimar por métodos geofísicos de exploración el estado de humedad en un sitio donde predomina uno solo de los tres materiales estudiados, es decir, cuando existe un subsuelo de perfil petrográfico y mineralógico homogéneo, es más adecuado emplear la resistividad eléctrica que la velocidad de la onda compresional.

3. Tanto la velocidad de la onda elástica como la resistividad eléctrica de los materiales estudiados resultaron muy diferentes a las del **aire**. Siendo en el aire la primera comparativamente muy baja (330m/s) y la segunda muy alta (mayor de 1 millón de mega ohms-m). Sin embargo, cuando los materiales están muy secos la resistividad eléctrica de ellos es muy alta, o sea que el contraste de este parámetro entre el aire y los materiales secos se reduce. En cambio, la velocidad de la onda elástica de los materiales estudiados se mantiene siempre más alta que la del aire. Por otra parte, debe considerarse que la velocidad de la onda elástica del **agua** es de aproximadamente 1,450 m/s, es decir, muy parecida a la de los materiales térreos en estado compacto. Las consideraciones anteriores en conjunto permiten formular la recomendación siguiente:

En la prospección geofísica para la detección de cavidades en el subsuelo se recomienda utilizar tanto el método denominado sísmico como el eléctrico de resistividad, sin embargo, para que este último aporte mejores y más confiables resultados la exploración de campo debe hacerse preferentemente en el estrato situado sobre el nivel freático y en la temporada húmeda, es decir, en el período de lluvias.

RECONOCIMIENTOS

El proyecto de referencia es el No. 27902 T financiado por el CONACYT y la FIUADY. Han participado en las diferentes etapas del proyecto y expresamos nuestro reconocimiento a: los investigadores asociados Dr. R. Centeno Lara, Dr. Gabriel Auvinet G., M. en I. I. Sánchez y Pinto; los técnicos M. en I. A. Sulub Aguilar, D. Hu Guerra, Eulalio Escalante R., W. Castillo Pak y Alvar Nadal; los tesis de maestría Ing. E. Ricárdez Córdova e

Ing. L. Felipe Ochoa y de licenciatura Br. A. Gómez
Sulu, Br. R. Aké Couoh, Br. H. Castro Magaña, Br. J.

V. Cervantes Pérez, Br. L. Belén Gamboa S., Yenisey
Pérez C. y A. Zetina Góngora.

REFERENCIAS

1. Sánchez I., Pérez I. y Espinosa L.(1998), "El método geofísico eléctrico: una alternativa en estudios geotécnicos para la detección de cavidades" Revista de Ingeniería (México) 2: No. 1, 41-50.
2. Beck, B. F., Pettit, A. J. y Herring J. G. (1999). Referencia a 8 artículos del tema 5: "Applications of geophysics to karst investigations", contenidos en el libro de las Memorias de la Séptima Conferencia sobre Hydrogeology and Engineering Geology of Sinkholes and Karst 1999, Ed. A.A. Balkema, Rotterdam, Holanda, 187-259
3. Burger, H.Robert. (1992), "Exploration geophysics of the shallow subsurface", Edit. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
4. Robinson, E. S. y Coruh, C. (1988), "Basic exploration geophysics", Cambridge, England, Edit. Wiley
5. Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. y Keys , D. A. (1976), "Applied Geophysics", Cambridge University Press, Cambridge, England, pp 451-455.
6. Ward, Stanley, H. (1990), "Resistivity and induced polarization methods", Geotechnical and enviromental geophysicas, Editor Ward, S. H., Volumen 1, Review and tutorial: Society of Exploration Geophysicists Investigations in Geophysics.
7. Press, Frank. (1966), "Seismic velocities", Handbook of physical constants, Editor Clark, S. P. Jr., Revisada y Re-editada (1997) por Geological Society of America Memoir 97.
8. D.S. Parasnis. (1967), "Principles of applied geophysics", Ed. Methuen, Londres, Inglaterra, 86-120
9. Bonet, F. y Butterlin, J. (1959), "Reconocimiento geológico de la Península de Yucatán", Instituto de Geología, UNAM, México, D. F.
10. James Instruments Inc. (1980), "Instruction Manual Model C-4902, C4901 V-Meter", James EIEG CGO, 4048 N. Rockwell St., Chicago, Illinois, E. U.
11. Timoshenko, S. y Goodier, J. N., (1934), "Theory of elasticity", McGraw-Hill, New York, E.U.