



## Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas del parque eólico Playa La Herradura I a partir de la interpretación de métodos geofísicos\*

**Yosmany Leyva Trotman**

Especialidad: Ingeniería Geológica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

**Resumen:** Se evaluaron las condiciones ingeniero-geológicas del medio donde se realizarán las cimentaciones para emplazar los aerogeneradores del parque eólico Playa La Herradura I. A partir de la interpretación de los resultados se determinaron las propiedades físico-mecánicas, el corte ingeniero-geológico y los parámetros hidrogeológicos (profundidad del nivel del agua y coeficiente de filtración), lo que permitió conocer las condiciones ingeniero-geológicas del área de emplazamiento de los aerogeneradores y sus alrededores, identificar las zonas anómalas originadas por procesos de carsificación y determinar parámetros dinámicos y de deformación del corte geológico. Los resultados pueden ser empleados para obtener un mayor conocimiento sobre la geología y condiciones ingeniero-geológicas del área, para tomar medidas correctoras del comportamiento de los suelos evitando futuros problemas en la estructura de los aerogeneradores.

**Palabras clave:** parque eólico; métodos geofísicos; aerogenerador.

---

\* Trabajo tutorado por la Ing. Liuska Fernández Diéguez y el Ing. Carlos Bauza Ramos.

Recibido: 17 marzo 2015/ Aceptado: 3 febrero 2016.

Imagen de cabecera tomada de <http://periodico26.cu/index.php/destacamos/20694-por-una-estrategia-ambiental-en-funcion-del-desarrollo-sostenible-en-las-tunas>

## **Evaluation of the geological-engineering conditions of “La Herradura I” eolic beach park based on geophysical methods**

**Abstract:** The geological-engineering conditions of the area where the foundations for the aero-generators of La Herradura I Eolic Beach Park will be installed were evaluated. Based on the interpretation of the results, the physic-mechanical properties of the aero-generator installation area were determined as well as the hydro-geological parameters (water level depth and filtration coefficient). This allowed obtaining information on the engineering-mechanical conditions of the installation area of the aero-generators and its surroundings, to identify the anomalous zones caused by carsification, to determine the dynamic parameters and deformation parameters of the geological cut-off. The results can be used to obtain more information on the geology and the engineering-geological conditions of the area in order to take corrective actions associated with the soil behavior, thus avoiding future failures in the aero-generator structure.

**Key words:** eolic park; geophysical methods; aero-generator.

## Introducción

El parque eólico Playa La Herradura I ocupa alrededor de 12 km<sup>2</sup>, con una potencia de 51 MW. El estudio de las condiciones para su construcción comenzó en el año 2013, en la zona norte de Las Tunas y será el mayor de los construidos en Cuba. El proyecto contempla la instalación de 34 aerogeneradores en la costa norte, desde La Herradura hasta Punta de Lirio, en el municipio de Jesús Menéndez.

Según el estudio de prefactibilidad técnica y económica el parque tendrá capacidad para generar 150 GW-h, lo que permitirá reducir emisiones de gases contaminantes y ahorrar costos de importación.

Es necesario el estudio de las zonas de mayor potencial eólico del territorio cubano para instalar nuevos parques eólicos. Para esto se avanza rápidamente en los estudios previos de prospección del viento para conocer su real potencialidad, así como en la instalación de parques eólicos para probar en una escala limitada las más importantes tecnologías de aerogeneradores que hoy se conocen (Núñez *et al.*, 2014). Investigaciones analizadas abordan diversos aspectos de la prospección eólica para el montaje de los parques eólicos (Isaac, 2011; Saura *et al.*, 2007; Moragues & Rapallini, 2004; Pierra, 2014).

El trabajo evalúa las condiciones ingeniero-geológicas del medio donde se realizarán las cimentaciones para emplazar el parque eólico Playa La Herradura I.

## Ubicación geográfica

La zona seleccionada para el emplazamiento de los aerogeneradores está ubicada a lo largo de la faja litoral norte de la provincia de Las Tunas, al este del poblado de Playa La Herradura I. Tiene una longitud en dirección este-oeste de 6 km y de 2 km en dirección norte-sur, lo que representa una superficie aproximada de 12 km<sup>2</sup>.

## Características geológicas de la región

En la región afloran rocas pertenecientes a los dos niveles estructurales que caracterizan la estructura geológica del territorio cubano, el superior o Neoautóctono constituido por las rocas pertenecientes a los Sistemas Neógeno y Cuaternario y el inferior (subyacente) o Substrato Plegado compuesto por los depósitos pertenecientes

a los Sistemas Cretácico y Paleógeno; el contacto entre ambos complejos estructurales está representada por una significativa discordancia estructural.

Las rocas carbonatadas y carbonatado-terrágenas del complejo Neoautóctono que abarca la parte superior del corte litológico presentan bajo grado de fracturación y meteorización (a excepción de cuando son interceptadas por zonas de falla, donde aparecen de altamente fracturadas hasta trituradas) y, por tanto, baja calidad geotécnica. No obstante, dentro de estas las diferentes variedades petrográficas de las rocas carbonatadas aparecen en mayor o menor grado afectadas por los procesos de carsificación, presentando desde pequeñas cavidades y surcos de lixiviación hasta importantes sistemas cavernarios (Rodríguez & Reyes, 2012).

### **Metodología utilizada para los métodos geofísico empleado en la investigación**

#### Prospección sísmica

La longitud de las puestas en los cuatro perfiles realizados fue de 92,00 m con distancia entre geófonos de 4,00 m, según metodología 2D MASW (*Multichanne Anaslysis Surface Waves*), utilizando el sismógrafo GEODE-24 de 24 canales, marca Geometrics y la recepción de los datos se efectuó con el *Seis Module Controller*.

La excitación de las ondas sísmicas se hizo mediante golpes (percusión) sobre el terreno, provocados por una mandarina de 20 libras.

Este procedimiento de mediciones de las ondas superficiales mediante golpes se hace para conocer, de manera bidimensional (2D), la variabilidad de las ondas de cizalla. Al hacerse el estudio de manera activa o mediante golpes los registros son de frecuencias mayores y, por tanto, se puede conocer con mayor precisión la variación de las velocidades ( $V_s$ ) en la parte superior del corte. Los geófonos utilizados fueron los de 4,5 Hz. La excitación de las ondas superficiales se hace en todos los puntos medios entre los geófonos en todos los perfiles medidos.

Durante el procesamiento se obtuvieron los cortes de velocidad obtenidos del procesamiento activo 2D MASW mediante el paquete de software SeisImager.

### **Tomografía eléctrica (geoelectricidad)**

Los trabajos se ejecutaron por el Grupo de Geofísica de la UIC Camagüey con el objetivo de determinar la caracterización litológica del subsuelo hasta la profundidad de interés y el posible desarrollo cárstico (alcance máximo 16,00 m de profundidad).

Las observaciones se realizaron sobre una red de perfiles topográficos trazados previamente, con separación entre ellos de 5,00 m para los siete perfiles ubicados en dirección E-W y separación de 7,00 m para los tres perfiles ubicados en dirección N-S, todos con un paso de investigación de 5,00 m. Se utilizó el método de tomografía eléctrica Wenner (TEW), en su variante polo-dipolo.

El electrodo infinito (C2) fue ubicado a una distancia superior a los 200,00 m del área de estudio, en una casimba inundada para su colocación, con el objetivo de obtener señales confiables durante el proceso de adquisición de los datos.

Para la determinación de la resistividad aparente ( $\rho_a$ , Ohm.m) de los materiales rocosos, así como su distribución en el subsuelo, se utilizó la estación geoelectrónica digital TAYATA-2R acoplado a un sistema multielectrónico de veinticuatro electrodos DSM-24E y un generador de corriente continua VIL-3T de 180 V de salida. Este equipamiento permitió realizar lecturas consecutivas de los parámetros corriente (I, mA) en la línea de alimentación, así como también la diferencia de potencial ( $\Delta V$ , mV) entre los electrodos de potencial para seis niveles de profundidad.

La separación máxima entre electrodos (a) fue de 5,00 m, siendo la longitud máxima del dispositivo empleado igual a 30,00 m, lo que permitió alcanzar una profundidad promedio cercana a los 16,00 m.

De forma general el sistema estuvo compuesto por:

- Fuente de energía eléctrica, transmisor y receptor.
- Electrodos metálicos de latón, tanto de corriente como de potencia.
- Sistema multielectrodos de 24E y cables.

Durante la interpretación de los datos obtenidos se estableció la relación existente entre la resistividad eléctrica y varios parámetros geológicos tales como: la presencia de fluidos, la porosidad, la compactación y cementación del material rocoso.

Los datos geofísicos de campo fueron editados, proceso durante el cual se calcularon los valores de resistividad aparente del subsuelo ( $\rho_a$ ), creándose las bases de datos requeridas durante el procesamiento. El análisis estadístico muestra que la resistividad en el área presenta una variación significativa, en el orden de más de mil unidades Ohm.m (de menos de 20 hasta 1 040).

En el procesamiento de los datos se utilizó el software "RES2DINV" para crear un modelo bidimensional (2D) de la resistividad real del subsuelo. El modelo 2D usado por el programa divide el subsuelo en un número determinado de bloques rectangulares, para el cálculo de las propiedades eléctricas de dichos bloques.

Los datos primarios obtenidos en los trabajos de campo y de laboratorios fueron recopilados y procesados mediante métodos geoestadísticos y gráfico-analíticos.

### **Resultados de los métodos geofísicos**

Del procesamiento de las mediciones se confeccionaron los cortes de resistividad para los perfiles (del PG1 al PG10) y los cortes de velocidad ( $V_s$ ) por los perfiles PG3, PG4, PG5 oeste-este y PG9 sur-norte, así como los mapas con la distribución espacial para diferentes profundidades de las resistividades y velocidades ( $V_s$ ) asociadas al terreno. Las profundidades que se representan en estos mapas son: 0,50; 1,50; 2,60; 4,00; 6,50; 10,00; 14,00; 16,00; 20,00; 25,00; 30,00 y 35,00 m, respectivamente.

Entre 0,50 m y 16,00 m, que fue la máxima profundidad alcanzada por geoelectricidad, coinciden en profundidad ambas representaciones (tomografía eléctrica y sísmica 2D MASW), continuando la representación desde 20 m hasta 35 m solo por la sísmica que alcanzó profundidades de hasta 60 m.

Con el procesamiento de las mediciones sísmicas se pudo obtener las velocidades ( $V_p$  y  $V_s$ ), con las cuales fue posible el cálculo de los módulos dinámicos de rigidez ( $G$ ), young ( $E$ ) y coeficiente de Balasto ( $K$ ), así como el coeficiente de Poisson. El comportamiento de estos módulos a nivel espacial se representa en los mapas correspondientes para las profundidades de 0,50; 4,00; 10,00; 20,00 y 30 m, donde además se da la estimación del valor medio y la dispersión del módulo correspondiente para la profundidad que se representa (Tabla 1).

Tabla 1. Estimación de los módulos dinámicos asociados a las capas por método de prospección sísmica

Capa	H(m)	Poisson		Peso unitario		G(kg/cm <sup>2</sup> )		E(kg/cm <sup>2</sup> )		K(kg/cm <sup>2</sup> )		Resistividad (OHM.M)	Velocidad Vs (M/S)
		Medida	Desv	Medida	Desv	Medida	Desv	Medida	Desv	Medida	Desv		
1 Calcarenita Carbonatada	0,5	0,24	0,00	1,90	0,06	15700	6705	38724	16567	24440	10437	>20-500	480-1040
2 Caliza Biodetrítica Porosa	4	0,47	0,01	2,39	0,10	19100	8820	55949	25652	270361	81305	1-20	440-1000
3 Caliza Biodetrítica Masiva	14	0,46	0,00	2,62	0,06	34584	7462	100904	21596	409905	61373	>20-500	1000-1300
4 Marga Carbonatada	30	0,47	0,01	2,17	0,08	9564	5373	28156	15686	175322	54229	-	480-800

Con la interpretación conjunta de la información brindada por Geofísica y la información geológica disponible por perforaciones se confeccionaron los cortes geólogo-geofísicos por los perfiles PG4 oeste-este y PG9 sur-norte.

Teniendo en cuenta la representatividad y correlación de los datos se escogió el corte geólogo-geofísico por el perfil PG9 de orientación sur-norte para la estimación de los módulos dinámicos asociados a las capas ingeniero-geológicas presentes en este corte, de tal forma que las profundidades escogidas para los cálculos transiten por la capa correspondiente (Figura 1).

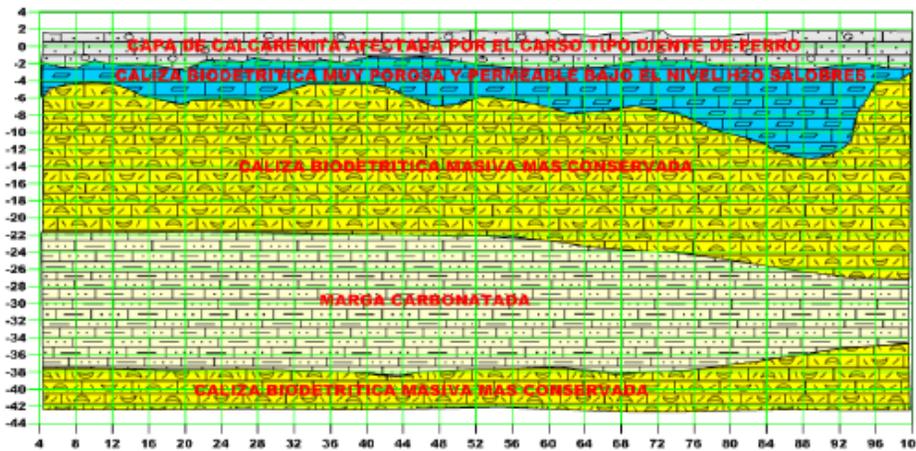


Figura 1. Corte geólogo-geofísico de orientación sur-norte.

**Sísmica**

Es de señalar que las ondas sísmicas (Vs) se transmiten por el esqueleto del material, siendo inmunes a la influencia del agua por lo que la información que brindan está directamente correlacionada con la rigidez del material por donde se transmiten.



dinámicos asociados a cada capa ingeniero-geológica, los cuales se presentan en donde, además de los módulos G, E y K, se estimaron los coeficientes de Poisson y el peso unitario, siendo los valores presentados el resultado del procesamiento estadístico de los cálculos por lo que se exponen los valores medios y la dispersión.

**Tomografía eléctrica**

Los mayores valores de resistividad caracterizan la roca masiva más conservada; estos valores se enmarcan hacia la porción norte y noroeste del emplazamiento. Esta circunstancia se puede observar muy bien tanto en los cortes de resistividad por los perfiles PG1-PG3 como en los mapas de distribución de las resistividades para diferentes profundidades, así como los cortes de velocidad por perfiles y mapas de distribución de las velocidades (Vs) y módulos dinámicos estimados (Figura 3).

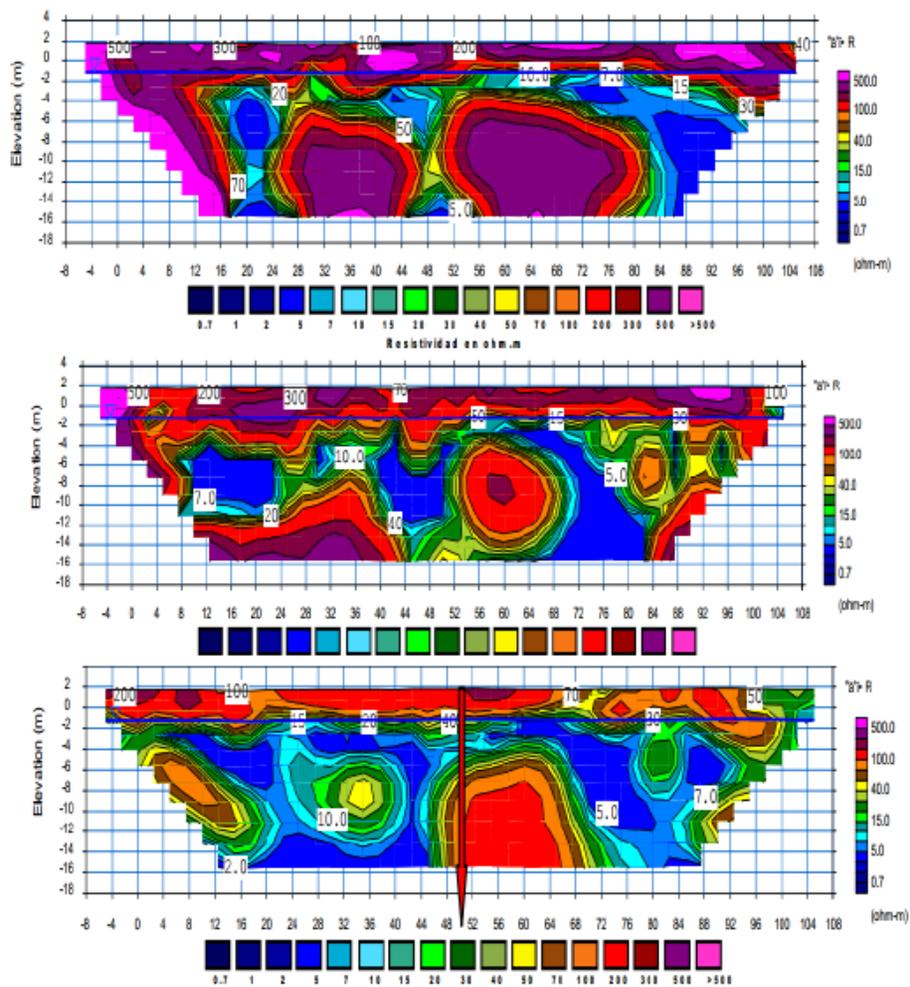


Figura 3. Cortes de resistividad por los perfiles PG1, PG2 y PG3, respectivamente.

De acuerdo con estos datos, la zona de mayor debilidad en los materiales se localiza hacia la porción sureste donde los valores de resistividad, velocidad y magnitud de los módulos estimados son comparativamente menores.

En los perfiles PG1-PG3 se alcanzan valores de resistividad de hasta 500  $\Omega$ .m, el corte de velocidades ( $V_s$ ) por el perfil PG3 refleja hacia esta zona (porción centro-oeste del perfil) una alta velocidad desde 1 040-1 300 m/s con un espesor de 14 m. Los mapas de distribución de velocidades y módulos dinámicos también reflejan altos valores relativos comparados con la zona sureste del emplazamiento.

Resulta interesante el cambio brusco en los valores de resistividad que se observa en los perfiles a partir de los 3 m de profundidad, donde los valores llegan a bajar anómalamente hasta alcanzar 1  $\Omega$ .m. Esta circunstancia se puede observar a nivel de área en los mapas de distribución de resistividades para diferentes profundidades donde es evidente que para la planta a 4 m de profundidad se manifiesta el bajón anómalo de la resistividad coloreado en las diferentes tonalidades del azul.

Es notable el caso de los perfiles PG1 y PG2 donde se observan bolsones anómalamente bajos de resistividad que alcanzan los 5  $\Omega$ .m, rodeados por una alta resistividad relativa que llega a alcanzar los 500 y mayor que 500  $\Omega$ .m., característico de las calizas duras recristalizadas donde se forman cavernas.

La disminución anómala de la resistividad a partir de los 3 m de profundidad está dada por la influencia de la intrusión salina en el área. Téngase en cuenta que la resistividad del agua de mar se estima en los 0,7  $\Omega$ .m. Estas zonas anómalas de baja resistividad se detectan a partir de la planta de 4 m de profundidad, llegando a alcanzar de 1-2  $\Omega$ .m. Obsérvese cómo la zona del emplazamiento delimitada por los pozos P-1 y P-2 queda invadida por la penetración proveniente del norte para los 6,5 m de profundidad, como se manifiesta en la planta de isohomas correspondiente.

Para las profundidades de 10 m a 14 m, según las plantas de isohomas correspondientes, la zona de emplazamiento es inmune a la penetración y puede observarse cómo esta, proveniente del norte, bordea la zona del emplazamiento por el oeste, extendiéndose hacia el sur del mismo con valores de resistividad, llegando a los 1-2  $\Omega$ .m. Para los 16 m de profundidad, según se observa en planta de isohomas

correspondiente, la zona del emplazamiento sufre los efectos de la penetración de la intrusión salina.

Por las características de estas zonas anómalas de baja resistividad se pensaba que pudieran ser cavernas rellenas de agua de mar ( $0,7 \Omega.m$ ) por lo que se mandaron a perforar tres pozos paramétricos en sendas anomalías correspondientes para discernir el origen de las mismas. Según los resultados de estos pozos, no existen cavernas, por lo que es de suponer que en estas zonas las rocas deben tener una alta porosidad producto de oquedades cársticas que se comunican y, por tanto, alta permeabilidad que permiten el paso a la penetración de la intrusión salina.

### **Parámetros hidrogeológicos**

En el área existe un acuífero freático o libre, de fisura, que descarga sus aguas en dirección al mar, con un caudal variable (según la época del año) entre 3,5 l/s y 8,5 l/s y que se alimenta fundamentalmente de las aguas pluviales que se infiltran por los poros, grietas y formas cársticas superficiales.

Las rocas acuíferas están representadas por diferentes variedades petrográficas: calizas arrecifales, arenosas, organógenas y biotriticas, biohémicas, arcillosas y calcarenitas, carsificadas en mayor o menor grado, de edad Pleistoceno Superior (Fm. Jaimanitas) con potencia en el sector entre 22,00 m y 24,00 m.

Subyacen a estas rocas poco permeables, representadas por margas calcáreas, arcillas, calizas margosas de edad Mioceno Medio (Fm. Vázquez).

Las aguas del acuífero freático presentan conexión hidráulica con las aguas del mar debido a la existencia de cavernas, canales y otras formas cársticas bien desarrolladas e interconectadas entre sí, de zonas de alta fracturación o de zonas de fallas permeables en toda la faja litoral.

### **Profundidad del nivel de las aguas**

Varias mediciones realizadas señalaron los niveles medios de las aguas: 1,71 m el nivel máximo y 1,67 m el mínimo.

### **Coefficiente de filtración**

La Tabla 2 muestra los valores de los coeficientes de filtración obtenidos de las pruebas realizadas en los pozos y los intervalos ensayados.

Tabla 2. Coeficientes de filtración por intervalos de ensayos (m/día)

Media	Intervalo de ensayo (m)		
	NF- 5,00	NF- 5,00	NF- 5,00
Máx	11,23	17,54	13,15
Mín	7,63	16,85	12,39

De acuerdo a los coeficientes de filtración por la clasificación de la permeabilidad los coeficientes de filtración caracterizan al medio como permeables a muy permeables.

### **Condiciones ingeniero-geológicas y propiedades físico-mecánicas**

Una interpretación integral de los resultados de los métodos geofísicos, las perforaciones y los ensayos de rocas y suelos permitió confeccionar cortes ingeniero-geológicos hasta la profundidad de 30,00-35,00 m; compuesto mayoritariamente por materiales calcáreos jóvenes, afectados por los procesos cársticos desarrollados con mayor intensidad desde la superficie hasta la cota -16,00 m, seguido por materiales terrígeno carbonatados con intercalaciones de rocas calizas.

#### **Capa 1**

Calcarenitas, roca sedimentaria de origen marino perteneciente a la formación Jaimanitas (Q 4 js), de colores blanco a blanco-crema claro, con intensidades grisáceas o carmelitas rojizo a intervalos por toda la capa. Compuesta por material arenoso, con predominio granulométrico de fino a media, restos de conchas de moluscos y corales de especies actuales, afectada por estructuras cársticas. En su desarrollo espacial muestra diferentes grados de cementación (con carbonato de calcio) y alteración. Está protegida en la parte más superficial (espesor entre 0,05-0,30 m) por una costra calcárea (caliche o calcrete), dura y recristalizada, con valores físico-mecánicos extremos no incluidos en el procesamiento estadístico.

El espesor promedio detectado es de 4,52 m (mínimo 4,00 m y máximo 5,00 m).

Los valores de densidad varían debido a que son rocas con diverso grado de porosidad, ofreciéndose los valores medios de esta propiedad. Los valores promedios de

resistencias a compresión simple (natural 3,54 MPa y saturada 3,30 MPa), determinados a testigos de roca por ensayos de laboratorio, clasifica como una roca de resistencia muy baja (Tabla 5), lo cual está en correspondencia con el índice RQD (*Rock Quality Designation*), promedio de 37 %, que es bajo pero está condicionado por la discontinuidad del macizo debido al desarrollo cársico y el inevitable deterioro que produce el proceso de perforación (Figura 4).

Tabla 3. Clasificación de la roca según su resistencia a compresión simple (qu)

Clasificación	Resistencia a compresión simple (qu en MPa)
MUY ALTA	$qu > 200$
ALTA	$50 < qu \leq 200$
MEDIA	$15 < qu \leq 50$
BAJA	$5 < qu \leq 15$
MUY BAJA (semirroca)	$1 < qu \leq 5$

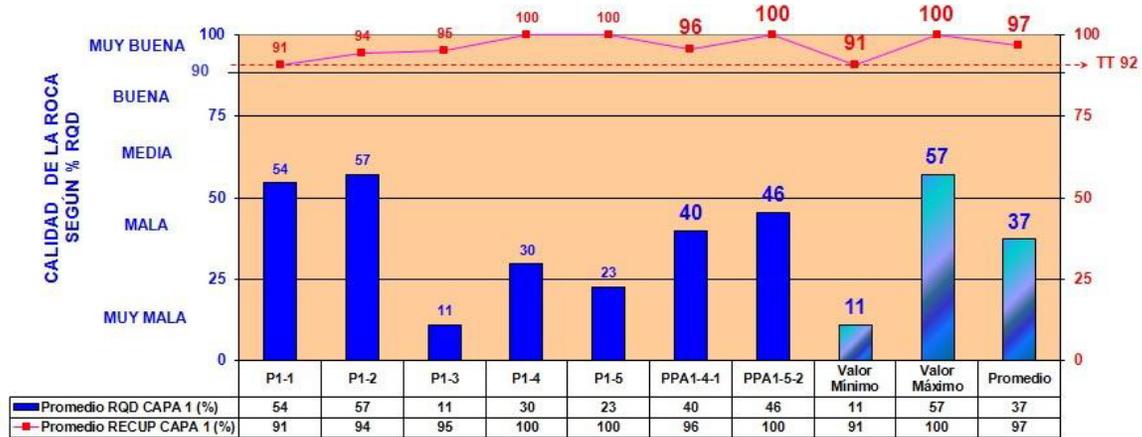


Figura 4. Comportamiento del RQD y de la recuperación en la capa 1.

Sin embargo, como corroboran los resultados de los métodos geofísicos, el valor alto del coeficiente de ablandamiento es 0,93 obtenido a partir de los promedios de las resistencias secas y saturadas y las observaciones de algunas excavaciones en la zona. Esta capa en su conjunto tiene comportamiento favorable para utilizarla como base de la cimentación de este objeto.

En la Tabla 4 se muestran los módulos dinámicos determinados a partir de los valores mínimos de Vs registrados en la zona base del cimiento para las rocas de esta capa. Esta capa está cubierta por tierra vegetal, suelo mullido de color carmelita, joven, de escaso espesor (0,05-0,30 m) y con alto contenido de humus, que constituye material de limpieza durante la construcción.

Tabla 4. Propiedades físico-mecánicas de la capa 1 (según métodos geofísicos)

Gs	G	E	K	Po	pa	Vs	Vp
19,0	66,27	163,74	103,16	0,24	50-300	600	1 020

Gs- peso específico; G- módulo dinámico de rigidez; E- módulo de Young; K- coeficiente de balasto; Po- coeficiente de Poisson; pa- resistividad aparente; Vs- velocidad de ondas superficiales; Vp- velocidades de ondas transversales.

## Capa 2

Calizas biodetríticas, roca sedimentaria de origen marino (organógenas autóctonas), enmarcada en la formación Jaimanitas (Q 4 js), de color blanco a blanco-crema claro, con intensidades grisáceas a crema rojizo por intervalos.

Compuestas por un material areno-gravoso calcáreo, con matriz de cementación similar, que agrupa restos de corales y conchas de especies actuales, en distintos grados de conservación, en ocasiones compuesta totalmente por corales (denominadas biohermas o arrecifales).

En su desarrollo presenta diferentes grados de alteración, porosidad y cementación. En profundidad se detectaron cavidades cársticas rellenas, al parecer no relacionadas entre sí, que se desarrollan entre las cotas -10,80 m y -19,50 m, referidos al NMM. Superior. Al nivel -10,80 m, hasta su contacto con el piso de la capa 1 a la cual subyace, no se detectaron estructuras cársticas. El espesor promedio perforado es de 16,00 m (mínimo 13,60 m y máximo 19,00 m).

Esta capa se detectó en los cinco pozos subyaciendo a la capa 1 y sobreyaciendo o intercalada con la capa 3.

Según los valores de resistencias a compresión simple (natural 8,48 MPa y saturada 8,45 MPa), determinados por ensayos de laboratorio, clasifica la roca de resistencia baja. El índice RQD promedio es de 53 % (Figura 5) que, unido a las altas velocidades de ondas transversales y su coeficiente de ablandamiento próximo a la unidad, muestran que esta capa posee condiciones favorables para la cimentación.

Tabla 5. Propiedades físico-mecánicas de la capa 2 (según métodos geofísicos)

Gs	G	E	K	Po	pa	Vs	Vp
25,05	153,99	452,30	2399,09	0,47	5-200	800	3 290

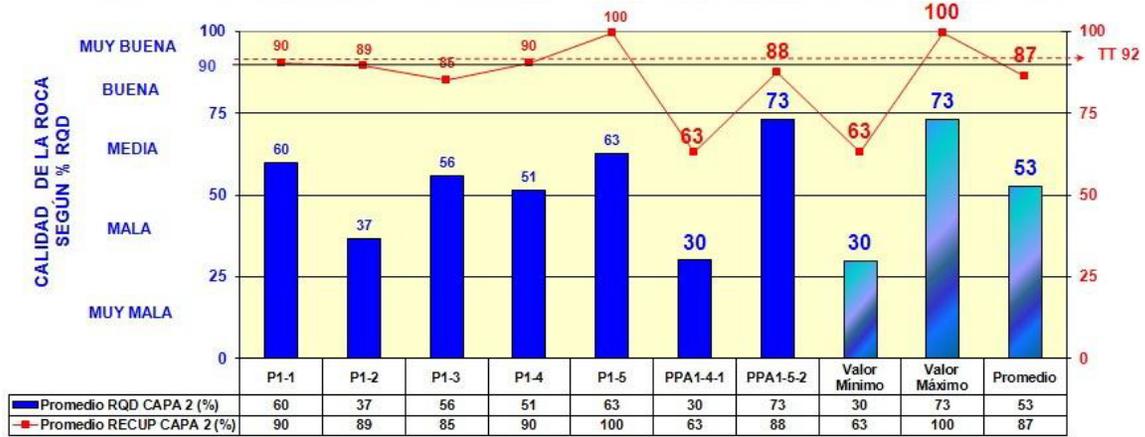


Figura 5. Comportamiento del RQD y recuperación de la capa 2.

### Capa 3

Marga carbonatada, paquete sedimentario con alternancia de suelos calcáreos y arcillosos, representados por margas, limolitas calcáreas o arcillosas y arenas arcillosas con gravas o gravosas, con alternancias de pequeños lentes de caliza biotritica o arcillosas, débiles y poco cementadas. Los materiales presentan coloraciones predominantes crema, amarillentas con tonalidades verdosas y grisáceas. Se le detectó a esta capa un espesor promedio de 8,41 m (máximo 13,00 m y mínimo 7,25 m), y puede aparecer desde los 22,00 m de profundidad hasta los 24,60 m, medidos a partir del nivel actual del terreno. Este paquete subyace, transicional o se intercalan con la capa 2, pertenece a la formación Vázquez (N 1 1-N 1 2 vq).

Debido al proceso de perforación estos litotipos deterioran su estructura natural (macizo rocoso o semirrocoso) y son recuperados en forma de suelos. En la tabla 6 se muestran las características de los suelos predominantes recuperados, según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Estos transitan desde arenas arcillosas (donde predominan las fracciones del material granular) con gravas o gravosas (SC), gravas arcillosas (o arcillo limosas) con arena o arenosas (GC), arcilla de baja plasticidad con gravas (CL) hasta arcilla muy plástica gravosa (CH), presentando datos similares en el peso específico y la plasticidad de intermedia a ligeramente alta.

Tabla 6. Propiedades físicas promedio de los suelos recuperados (rocas o semirrocas alteradas por el proceso de perforación) en la capa 3 según ensayos

SUCS	Intervalo de muestreo (m)	Granulometría (%)				Plasticidad (%)		Condiciones naturales (kN/m <sup>3</sup> )	
		Gra	Are	Lim	Arc	LL	LP	IP	Gs
<b>SC</b>	21,80 -30,00	25	31	45		49	20	29	27,9
<b>GC</b>	23,00 -34,60	41	24	35		44	20	24	27,5
<b>CL</b>	27,60 -32,20	14	31	56		46	19	27	27,7
<b>CH</b>	23,10 -33,10	17	18	65		54	19	35	27,8

SUCS- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; Profund.- intervalo de muestreo; Gra- grava; Are- arena; Lim- limo; Arc- arcilla; LL- límite líquido; LP- límite plástico; IP- índice de plasticidad; Gs- peso específico.

### Fenómenos físico-geológicos

Los fenómenos físico-geológicos se concentran principalmente en el desarrollo erosivo-disolutivo del carso, en general, poco desarrollado, visible superficialmente en toda el área de estudio y zonas colindantes, sin orientación preferencial, actuando al parecer asociado a las zonas de debilidad estratigráfica.

La capa 1 (roca calcarenitas) está afectada por un carso de actividad baja a moderada, y se evidencia en los campos de lapiés (dientes de perro), los hoyos de disolución y las casimbas (inundadas o no) con desarrollo predominantemente vertical o subvertical.

Las formas cársicas de dientes de perro tienen bordes filosos y alturas que no sobrepasan los 5 cm, alternando en la superficie con un pavimento calcáreo (caliche), en ocasiones cubierto por escasa capa vegetal. También aparecen hoyos y casimbas dispersas con formas muy irregulares en planta (dimensiones desde 0,09 m hasta 1,45 m), desarrollo limitado o puntual que en profundidad alcanza promedio de 1,80 m (medidos a partir del nivel actual del terreno). Como generalidad, hacia el fondo estas estructuras aumentan el diámetro (forma de embudo inverso).

El desarrollo cársico más profundo desarrollado en las rocas que componen la capa 2 (caliza biotritica) es inactivo o de actividad baja. Se presenta como cavidades cársicas rellenas, con desarrollo predominantemente horizontal, a profundidades que oscilan desde 12,60 m (cota -10,80 m en el P-4) y 21,30 m (cota -19,50 m en el P-5) medidos a partir del nivel actual del terreno, con formas de bolsones y alturas (de techo al piso) desde 0,40 m hasta 2,30 m.

Para ofrecer una idea de la magnitud del desarrollo cástico se debe decir que del total de metros perforados (155,95 m) en las capas 1 y 2, corresponden a rocas afectadas por este fenómeno (10,35 m), equivalente al 6,64 % del volumen del macizo que servirá de base natural a la cimentación.

Los suelos que en su generalidad rellenan estas cavidades son compactos y de composición gravo o areno arcillosos carbonatado-ferruginosos, de color rojizo a crema oscuro o carmelita, de origen cástico-eluvial, en menor medida aluvial (por transporte de corrientes de aguas superficiales que se infiltran por grietas y oquedades). Según el SUCS los suelos que rellenan las cavidades existentes en la capa 2 transitan desde arenas arcillosas con gravas (SC) hasta gravas arcillosas (o arcillo limosas) con arena (GC), y puntualmente arcillas muy plástica con gravas (CH), coincidiendo estos grupos en valores similares de peso específico, plasticidad de intermedia a ligeramente alta. Más detalles de los valores físicos promedios expuestos en la Tabla 7.

Tabla 7. Propiedades físicas promedio de los suelos que rellenan las cavernas (según ensayos)

SUCS	Intervalo de muestreo (m)	Granulometría (%)				Plasticidad (%)		Condiciones naturales (kN/m <sup>3</sup> )	
		Gra	Are	Lim	Arc	LL	LP	IP	Gs
SC	14,80-20,10	20	38	42	50	21	29	27,4	
GC	12,60-20,20	40	23	37	41	16	25	27,2	
CH	14,00-14,60	24	18	58	53	19	34	27,9	

A partir de los resultados obtenidos fue posible confeccionar el mapa de zonación de la carsificación de toda el área de estudio (Figura 6).

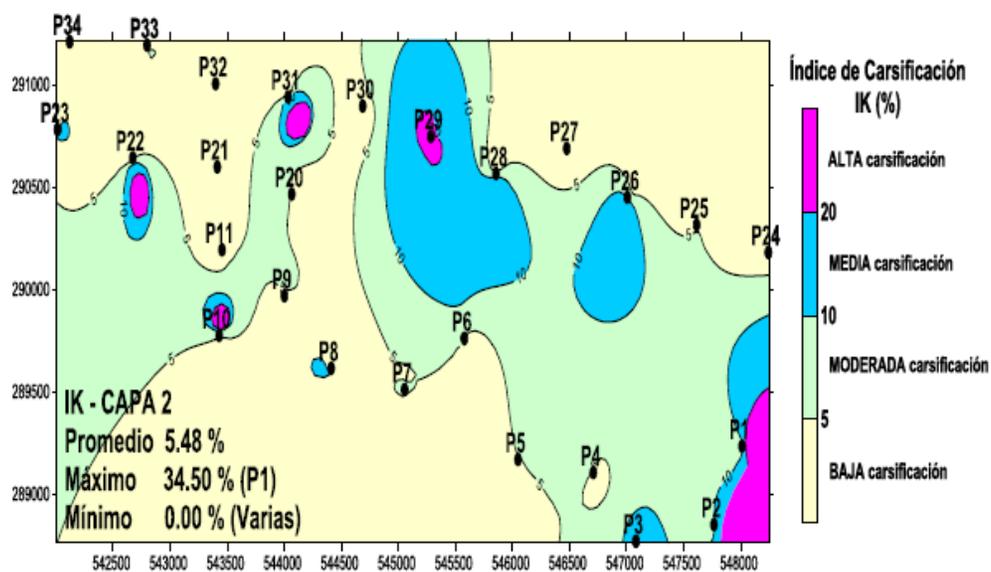


Figura 6. Mapa de zonación de la carsificación de acuerdo al índice IK (N máxima).

Capa 1: Calcarenitas afectadas por un carso de actividad baja a moderada y se evidencia en los campos de lapiés (dientes de perro), los hoyos de disolución y las casimbas (inundadas o no) con desarrollo predominantemente vertical o subvertical.

Capa 2: Caliza biodetrítica, el carso desarrollado en las rocas es de actividad baja, mostrando cavidades cársticas rellenas y vacías, predominando las primeras, probablemente con extensión horizontal a profundidades que oscilan desde 5,50 m hasta 18,50 m medidos a partir del nivel actual del terreno, con formas de bolsones y alturas (de techo al piso) desde 0,30 m hasta 2,65 m.

Los suelos que rellenan estas cavidades por lo general son compactos y de composición variable desde arcillosos hasta gravo o areno arcillosos, carbonatados, ferruginosos, de color rojizo a carmelita o crema oscuro, de origencársico-eluvial, en menor medida aluvial (por transporte de corrientes de aguas superficiales que se infiltran por grietas y oquedades). Los suelos que rellenan las cavidades cársticas transitan desde arenas arcillosas con gravas (SC) hasta gravas arcillosas (GC) y, en ocasiones, arcillas de baja a media plasticidad con gravas (CL), coincidiendo todos estos grupos en valores similares de peso específico, plasticidad de intermedia a ligeramente alta.

## **Conclusiones**

Los estudios realizados a través de los métodos geofísicos empleados en el área de estudio (cimientos y alrededores desbrozados) no detectaron la presencia de carso con envergadura que invalide la construcción de la cimentación y futuro montaje de los aerogeneradores proyectados. Los resultados de los tres pozos paramétricos, perforados en las zonas de anomalías de baja resistividad y velocidad ( $V_s$ ), confirmaron la existencia de rocas alteradas, porosas, permeables y pobremente cementadas, descartando el supuesto de cavernas vacías o rellenas por suelos saturados de agua salobre o marina, producto de los efectos de la intrusión salina.

De la interpretación y análisis de los datos geofísicos obtenidos se infiere que la mejor conservación de las rocas existentes es hacia la porción norte y noroeste (N-NW) del emplazamiento; así mismo la zona de menor conservación de las rocas se detecta hacia el sureste del emplazamiento. Los estratos más superficiales del corte geológico existente en el área presentan condiciones favorables para usarse como base de

cimentación, aunque existen zonas donde se debe prestar mayor atención a la hora de realizar dichos cimientos.

### Referencias bibliográficas

ISAAC, R. 2011: Proyectos de Inversión de Parques de Energía Eólica. *COFIN Habana* Revista de la Facultad de Contabilidad y Finanzas de la Universidad de La Habana. ISSN 2073-6061.

MORAGUES, J. A., & RAPALLINI, A. T. 2004: Aspectos ambientales de la energía eólica. Documento del Instituto Argentino de la Energía, Buenos Aires.

NÚÑEZ, E.; RODRÍGUEZ, R.; PIERRA, A. & REYES, O. 2014: Sistema de Información para el Análisis de Datos del Viento. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas* 8(3): Pág. 100-113.

PIERRA, A. 2014: Sistema de Gestión de Información de los parámetros del viento. *Ciencia & Futuro* 4(3): 22-32.

RODRÍGUEZ, P. & REYES, Z. 2012: Informe del mapeo ingeniero-geológico realizado en el área de emplazamiento del parque eólico de 51 MW Playa Herradura I. Centro de Servicios de Investigaciones Aplicadas. Empresa de Ingeniería y Proyectos de la Electricidad (INEL). Unión Nacional de Empresas Eléctricas (UNE).

SAURA, G.; OSÉS, R.; DÍAZ, R.; GARCÍA, J. & OROPESA, R. 2007: Tiempo de observación para la prospección eólica de un punto de interés. [En línea]. *Ecosolar*. Consultado: 29 sept 2013. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/ecosolar/Ecosolar01/HTML/Articulo07.htm>