

Factores geológicos que afectan la continuidad espacial del flujo en la inyección de agua en las unidades del yacimiento LGITJ-0102

Ilver Michel Soto-Loaiza
José Quintín Cuador-Gil

Resumen

La investigación tuvo como propósito determinar los factores geológicos que afectan la continuidad espacial del flujo durante el proceso de inyección de agua por flanco en unidades productivas del yacimiento de hidrocarburos Lagunilla Inferior (LGITJ-0102), estado de Zulia, Venezuela. Se evaluó el comportamiento del factor de recobro, las variables petrofísicas: porosidad, permeabilidad, saturación de agua y el tipo y calidad de roca en cada unidad de flujo. Se comprobó que en el yacimiento el tipo de roca de la estructura geológica es variable. Los valores más bajos de las propiedades petrofísicas se manifestaron en el área sur, mientras que las zonas norte y central evidenciaron una elevada variabilidad de estos parámetros. Se concluye que la zona norte es la de mayor potencial para el desarrollo de nuevos proyectos de inyección para la recuperación de petróleo.

Palabras clave: recuperación de petróleo; inyección de agua por flancos; yacimiento Lagunilla Inferior; factor de recobro.

Geological factors affecting flow spatial continuity in water injection of units operating in the LGITJ–0102 ore body

Abstract

The objective of the investigation was to identify the geological factors affecting the spatial continuity of the flow during the process of flank water injection in the units operating in the Lower Lagunilla Hydrocarbon Ore Body. This included the evaluation of the recovery factor, the petro-physic properties such as porosity, permeability, water saturation and rock type and quality in each flow unit. It was observed that the rock type of the geologic structure in the ore body is variable. The lowest values for the petro-physic properties were found in the southern area while a high variability of these parameters was observed in the northern and central areas. It was concluded that the northern area has a great potential for the development of new injection projects for petroleum recovery..

Keywords: petroleum recovery; flank water injection; Lower Lagunilla Hydrocarbon Ore Body; recovery factor.

1. INTRODUCCIÓN

Alrededor del 85 % de la producción mundial de petróleo se obtiene a través de métodos convencionales de recuperación primaria y secundaria (Paris de Ferrer 2001), con lo que se garantiza un recobro promedio del 35 % del crudo *in situ*. Debido a que la mayor parte del petróleo queda atrapado en la roca, la industria petrolera dedica gran esfuerzo al desarrollo de métodos y técnicas que permitan incrementar el factor de recobro. En Venezuela estos métodos han sido empleados para la recuperación de crudos en los yacimientos a través de 66 proyectos de inyección de agua por flanco, con un recobro promedio del 41 %, según información reflejada por PDVSA (2000). Internacionalmente se conocen otros estudios al respecto (Gallardo 2012).

La presente investigación tuvo lugar en el yacimiento Lagunilla Inferior, (conocido también como LGITJ-0102) perteneciente al miembro inferior de la formación Lagunilla, de edad Mioceno. Se ubica al noreste de la unidad de explotación Tía Juana Lago y geológicamente se encuentra en arenas poco consolidadas. Se originó en un ambiente fluvio-deltaico, su espesor promedio es de 149,35 m. La estructura es un homoclinal con rumbo noroeste-sureste, con buzamiento de tres a cinco grados al suroeste. En el miembro Lagunilla Inferior se encuentran los principales intervalos productores del yacimiento, conformados, de base a tope, por las unidades informales: Lagunilla Inferior D (LL-D), Lagunilla Inferior C (LL-C), Lagunilla Inferior B (LL-B) y Lagunilla Inferior A (LL-A).

Se trata de un yacimiento maduro, en etapa de agotamiento y bajo recuperación secundaria. Desde 1959 fue sometido a un proyecto de recuperación mejorada con inyección de agua por flancos en su zona sur; la máxima producción fue de 250 000 barriles diarios en el año 1966 (Salazar 2006). Estudios realizados por EXGEO PDVSA (2005) refieren declinación del nivel de presión y de producción, lo cual atenta contra la recuperación final de las reservas recuperables totales. La declinación de la tasa de petróleo está alrededor de 10,7 % anual, por lo que se supone que algunos pozos productores podrían no estar recibiendo el efecto de la inyección, o de que esta no es uniforme en todo el yacimiento, al existir diferencias en el comportamiento entre sus tres regiones: norte, central y sur, así como entre las diferentes unidades productoras.

Al no existir un cabal conocimiento de las causas que provocan estas diferencias de comportamiento en la recuperación entre las distintas regiones y unidades del yacimiento, este trabajo tuvo el propósito de determinar los factores litológicos, tectónicos, estratigráficos y petrofísicos

que inciden en la continuidad espacial del flujo en las unidades productivas del yacimiento LGITJ-0102 durante el proceso de inyección de agua por flanco

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se definieron tres fases de trabajo que se describen a continuación:

Fase 1. Recopilación, interpretación y síntesis de la información geológica del yacimiento Lagunilla inferior LGITJ-0102.

Se tomaron como referencia los estudios previos realizados por EXGEO (2001) en el yacimiento LGINFTJ-0102, el modelo de simulación numérica de todo el yacimiento y la caracterización geológica detallada del área, lo que permitió obtener una información básica del modelo geológico del área.

Para lograr dicho objetivo se solicitó al Departamento de Petrofísica la base de datos de los pozos que tuvieran pruebas de núcleo o perfiles con valores de algunas propiedades como permeabilidad, porosidad y saturación, datos útiles para el análisis y determinación de los factores geológicos que pueden provocar la variabilidad del flujo en el yacimiento. Asimismo se revisaron las coordenadas de los pozos a través del Oil Field Manager (OFM) que permitió identificar espacialmente cada pozo, además de considerar las zonas de producción. Se estudiaron otros trabajos como: Roure e investigadores (1996), Stapor (1998), PDVSA (2000), Morales (2002) y PDVSA (2010).

Una vez recopilada la información se procedió a promediar la distribución espacial de los pozos descrita en la Figura 1, considerando las tres regiones dentro del yacimiento.

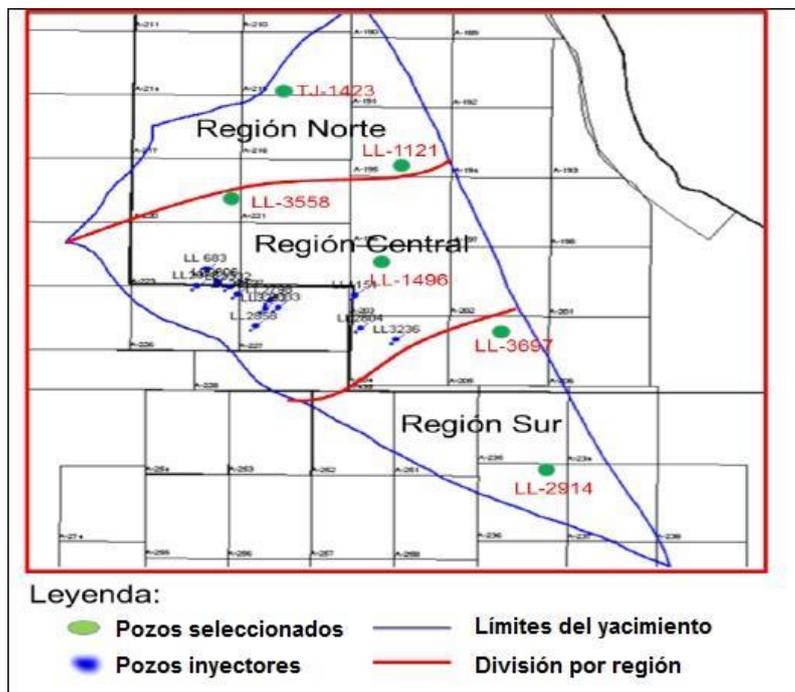


Figura 1. Esquema de la distribución espacial de los pozos en el área de estudio.

Fase 2. Análisis y procesamiento de los elementos geológicos y petrofísicos por áreas y unidades productoras en el yacimiento LGINFTJ-0102.

Con base en la información geológica descrita en la fase anterior se procedió a generar un bloque diagrama mediante la implementación de la herramienta *Rock Work* para representar los rasgos estructurales y estratigráficos del yacimiento. En esta etapa se creó una base de datos que incluyó el tope y la base de cada unidad de flujo: Bachaquero, Laguna, LL-A, LL-B, LL-C y LL-D, las dos primeras no productoras.

Para elaborar la base de datos se partió del cálculo del factor de recobro por parcela y por regiones, utilizando los datos de petróleo original en sitio (POES) y petróleo producido (NP), a partir de la información básica del yacimiento aportada por el Departamento de Recuperación Mejorada de Hidrocarburos (RMH) (PDVSA 2010).

El factor de recobro calculado (ver tablas) constituyó referencia para conocer el comportamiento variado de las tres regiones en que está dividido el yacimiento y las relaciones entre las propiedades petrofísicas de las rocas y el potencial de recuperación.

En la base de datos, además, se incluyeron los datos de las variables porosidad, permeabilidad y saturación de agua así como los tipos de roca por cada unidad de flujo del yacimiento según la clasificación realizada por EXGEO PDVSA (2005) y obtenidos a través de los registros de rayos gamma y de potencial espontáneo y los registros de densidad.

En esta etapa también se generaron los mapas resultantes de la superposición del mapa tectónico a los mapas de frente de inyección de agua de cada unidad de flujo (Figura 2). Los mapas de frente de agua fueron obtenidos del departamento de RMH (PDVSA 2010).

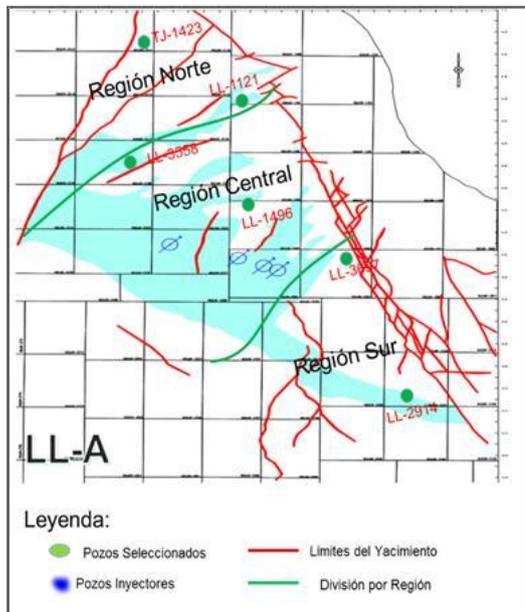


Figura 2. Frente de agua de la unidad LL-A del yacimiento LGITJ-0102.

Fase 3. Interpretación del comportamiento de los factores geológicos frente al proceso de inyección de agua.

En esta fase se interpretará la información geológica obtenida, partiendo de la estratigrafía de las unidades de flujo que componen el yacimiento, las estructuras tectónicas que los afectan y las propiedades petrofísicas establecidas por los rangos de permeabilidad, porosidad, saturación de agua y calidad de la roca en cada una de las regiones, a partir de la data suministrada por los pozos seleccionados. A partir de esa información, del comportamiento del flujo y el avance del frente de agua para cada unidad, se determinan los factores geológicos que condicionan en cada caso la continuidad espacial del flujo en el proceso de inyección.

Los mapas de frente de agua por unidades del yacimiento y los mapas del modelo estructural fueron superpuestos para fundamentar el comportamiento de las unidades de flujo frente a la inyección de agua.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La superposición al mapa tectónico de los mapas de frentes de agua dio como resultado la Figura 3. Al observar el mapa de avance del frente de agua de la unidad LL-A, la menos drenada, se refleja un barrido irregular, con un avance de frente de agua en un 40 % del total del área del

yacimiento y una baja influencia de inyección en la región norte con un aproximado de 10 %.

Haciendo la comparación con los mapas estructurales se evidencia que dicho comportamiento obedece a la influencia del sistema de fallas de dirección NE que atraviesa la parcela A-195. La región sur mostró un 11 % de avance total que, al igual que en la región norte, puede estar condicionado por un sistema de fallas en la parcela 234.

En la unidad LL-B se observa un avance de frente de agua de 54 % distribuido en las tres regiones, registrando en la región norte 12 %, influenciada por la falla que se ubica en la parcela A-195 (dicha área registra una heterogeneidad en el tipo de roca). En la región central se registró un avance de 24 % y en la región sur un avance de 18 %, con respecto al área total.

Los valores de permeabilidad en las Tablas 1 y 2 reflejan que en la parcela 220 las intercalaciones de arenas masivas y arenas limo-arcillosas registran una permeabilidad baja de 776 mD y la región sur un 23 %, observándose una recuperación mayor con respecto al LL-A y LL-B en la región.

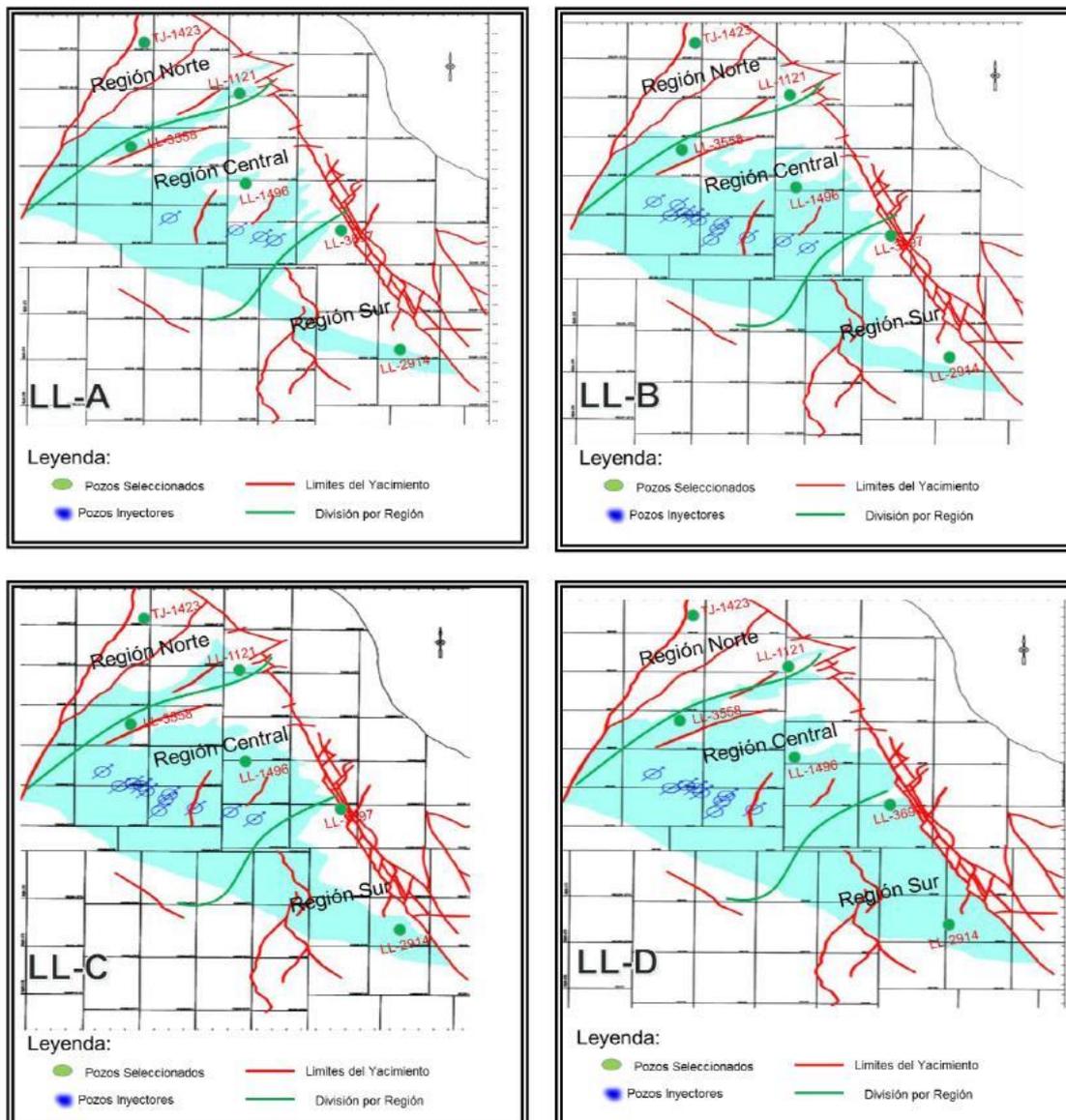


Figura 3. Mapas resultantes de la superposición del mapa tectónico a los frentes de agua por unidades de flujo.

Por último, se analizó la unidad LL-D, la cual presenta el mayor avance del frente de agua con un 81 % del área total del yacimiento, reflejándose una alta inundación del área, distribuida con 11 % en la región norte donde se mantuvo el bajo efecto de la inyección producto de que la región, además de presentar una heterogeneidad en el tipo de roca, no cuenta con una fuente de desplazamiento más cercana en el área ya que los pozos inyectores se concentran en la región central.

Con respecto a la región central el avance de inyección fue de 41 %, manteniéndose una baja uniformidad de barrido en la parcela 220 debido a la falla y un 30 % en la región sur la cual sí tuvo un avance de frente de

agua efectivo, confirmándose con la saturación de 0,26 % al 0,35 % mostrada en la data de los pozos interpretados (LL-2914 y LL-1427).

3.1. Modelo geológico del yacimiento

Los perfiles geológicos realizados en las direcciones NO-SE y SW-NE muestran la continuidad de las cuatro unidades estratigráficas que conforman el yacimiento, las que se observan en la Figura 4.

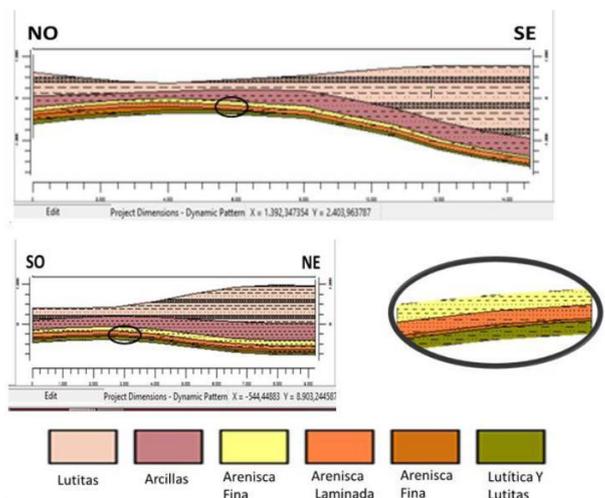


Figura 4. Cortes estratigráficos del yacimiento LGITJ-0102, donde se detallan las cuatro unidades productivas.

En la valoración de la calidad de las rocas se consideraron los supuestos referenciados por Salazar (2006) sobre los patrones litológicos predominantes en el yacimiento LGITJ-0102: 1) arenas masivas, 2) arenas con intercalaciones de limolitas y lutitas, 3) arenas limo-arcillosas y 4) lutitas y limolitas, resultados obtenidos de la extrapolación a 1 350 pozos del yacimiento. Los resultados anteriores indicaron que la distribución de calidad de roca, dada por la clasificación anterior 1 y 2, está en correspondencia con el movimiento de los fluidos, determinando que la mejor calidad de roca está localizada hacia la región central y norte, que corresponde al área con mayor producción acumulada.

Estructuralmente se evidencia (Figura 5) que la región sur es la que se encuentra a mayor profundidad respecto a la superficie y a la estructura tectónica que sustenta al yacimiento. Esta región es considerada en algunos informes como un monoclin, sin embargo, el bloque diagrama confeccionado indica una estructura anticlinal de bajo ángulo de buzamiento en sus flancos, encontrándose la región central en la cúpula de la estructura, lo que justifica la mayor recuperación para esta zona (Lugo 1992; Malaspina *et al.* 2006).

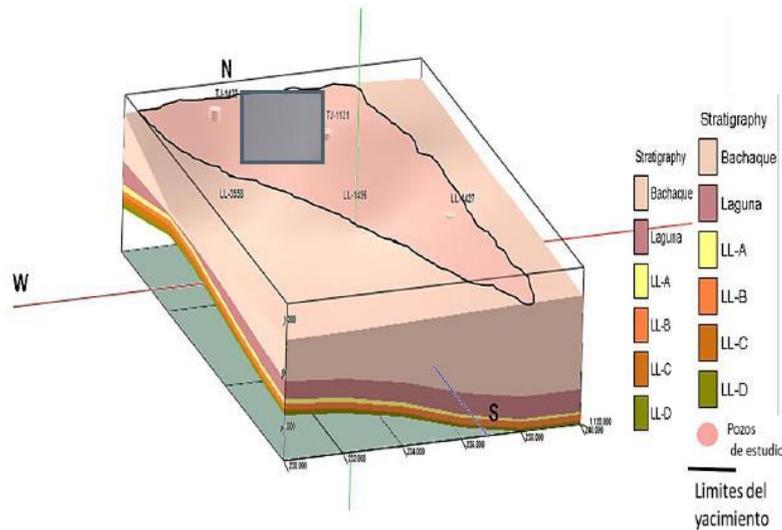


Figura 5. Bloque diagrama del yacimiento LGITJ-0102.

Otro elemento geológico importante para poder comprender las variaciones en el factor de recuperación es la presencia de una zona de fallas que pone en contacto la región norte con la central (Figuras 2 y 3), a través de la cual puede estar ocurriendo la declinación de la presión del yacimiento, sobre todo si tenemos en cuenta que los pozos de inyección se encuentran ubicados en la región central.

3.2 Análisis petrofísico

3.2.1 Unidad de flujo LL-A

Los datos mostrados en las tablas corroboran lo planteado por Salazar (2006), ya que en las regiones norte y centro predominan las litologías de tipo 1 y 2, mientras que en la región sur prevalecen patrones litológicos con mayores contenidos limo-arcillosos.

En la región norte de una unidad de flujo LL-A se registró un factor de recobro mayor del 20 % y menor del 40 %. Se puede concluir que esta región está influenciada por el tipo de roca, que oscila entre las arenas masivas y las arenas limo-arcillosas. Se destaca la parcela A-195 de esta región, la cual muestra una saturación de agua mayor del 46 % producto de la baja permeabilidad, con valor de 711,48 mD y una porosidad de 28 %, resultando buena (Tabla 1).

Tabla 1. Datos petrofísicos y de producción de los pozos. Unidad LL-A

No	Factor de recobro FR (%)	Parcela	Pozo	Porosidad (ϕ) %	Permeabilidad (K) mD	Saturación de agua (S_w) %	Rango petrofísico	Región
1	35,1	A-215	TJ-1423	0,3239	1 999,22	0,4061	1,3590	Norte
2	20,6	A-195	TJ-1121	0,2882	711,48	0,4645	2,0345	Norte
3	19,2	A-220	LL-3558	0,3217	1 531,00	0,4421	1,5650	Central
4	124,5	A-203	LL-1496	0,3227	1 798,10	0,2880	1,5472	Central
5	4,6	A-208	LL-2914	0,2986	994,20	0,4556	1,3760	Sur
6	21,32	A-235	LL-1427	0,2655	289,22	0,4638	2,9500	Sur

La mayor recuperación de crudo se concentra en la región central, que muestra un alto porcentaje de recobro del 124 %. Esto obedece a las buenas condiciones de las propiedades petrofísicas que inciden de forma positiva en la continuidad espacial, tal como el tipo de roca, que muestra valores entre 1 y 2, según los rangos petrofísicos del yacimiento (Salazar 2006), lo cual se corresponde con los tipos de rocas de arenas masivas y arenas con intercalaciones de limolitas y lutitas.

Seguidamente se muestra el comportamiento geológico en la región sur, la cual registra valores de rangos petrofísicos entre 1 y 3. Esto denota la prevalencia de intercalaciones de arenas masivas y arenas limo-arcillosas, que influye directamente en la permeabilidad de la roca, la cual manifestó valores de 280 mD a 995 mD, es decir, una interconexión de los poros muy baja; además de la capacidad de acumulación por los bajos porcentajes de porosidad que van desde 26 % a 29 %. Cabe destacar que la saturación de agua es alta.

3.2.2 Unidad de flujo LL-B

Se observa en la región norte (Tabla 2) un tipo de roca excelente como unidad de flujo, arenas masivas, con alta permeabilidad, registrada con valores de 2 500 mD y 2 900 mD. Se destaca la parcela A-195 que presenta una alta saturación, mayor del 48 %, debido a las altas porosidades, mayores del 35 %.

Tabla 2. Datos petrofísicos y de producción de los pozos. Unidad LL-B

No	Factor de recobro FR (%)	Parcela	Pozo	Porosidad (ϕ) %	Permeabilidad (K) mD	Saturación de agua (S_w) %	Rango petrofísico	Región
1	35,1	A-215	TJ-1423	0,3445	2 839,06	0,3165	1,1538	Norte
2	20,6	A-195	TJ-1121	0,3509	2 596,51	0,4831	1,0455	Norte
3	19,2	A-220	LL-3558	0,3213	1 622,57	0,4356	1,4630	Central
4	124,5	A-203	LL-1496	0,3258	2 885,13	0,1920	1,5727	Central
5	4,6	A-208	LL-2914	0,3442	2 684,74	0,2377	1,9540	Sur
6	21,32	A-235	LL-1427	0,2969	712,19	0,4141	2,1842	Sur

En la región central se registran altos valores de permeabilidad, mayores de 1 600 mD y menores de 3 000 mD. Esto favorece la continuidad espacial de flujo, propicia para la recuperación de petróleo, lo que se refleja en el factor de recobro con valores mayores del 70 % promedio. El tipo de roca, según los datos de registros y núcleo, osciló entre 1 y 2: arenas masivas y arenas con intercalaciones de limolitas y lutitas, traduciéndose en excelente unidad de flujo. En la parcela A-203 se registró una baja saturación de agua, según la información analizada del pozo LL-1496, con valores altos de porosidad entre el 30 % y el 32 %.

En la región sur el recobro es menor del 22 %, siendo los tipos de rocas predominantes de 2 y 3: arenas con intercalaciones de limolitas a lutitas y arenas limo-arcillosas. En la parcela A-208 se registran valores de saturación bajos (23 %), a pesar de presentar una alta permeabilidad, mayor de 2 600 mD, con buena porosidad, mayor del 35 %. Ello parece deberse a factores tectónicos, ya que en la misma aparecen cartografiadas estructuras que se cortan ortogonalmente, que impiden la continuidad espacial en la unidad de flujo.

3.2.3. Unidad de flujo LL-C

Aparecen en la región norte arenas masivas y arenas con intercalaciones de limolitas y lutitas, con altas permeabilidades, mayores de 3 700 mD y porosidades de 35 % a 36 %. En esta unidad de flujo (Tabla 3) se encuentran anomalías que no se explican para los datos con los que se ha trabajado y están referidas a la baja saturación (28 %) que presenta la parcela 195, indicando afectación en la continuidad de flujo a pesar de presentar alta porosidad y permeabilidad. El elemento que podría justificar esa situación sería la presencia de una estructura agrietada o fallada, lo que no ocurre en los resultados que muestran las unidades superiores.

Tabla 3. Datos geológicos y de producción de los pozos. Unidad LL-C

No	Factor de recobro FR (%)	Parcela	Pozo	Porosidad (ϕ) %	Permeabilidad (K) mD	Saturación de agua (S_w) %	Rango petrofísico	Región
1	35,1	A-215	TJ-1423	0,2536	3 787,06	0,4254	2,4300	Norte
2	20,6	A-195	TJ-1121	0,3677	3 849,57	0,2806	1,0855	Norte
3	19,2	A-220	LL-3558	0,2021	776,76	0,5847	3,0000	Central
4	124,5	A-203	LL-1496	0,3270	1 686,51	0,3387	1,4699	Central
5	4,6	A-208	LL-2914	0,3054	938,71	0,5683	1,2080	Sur
6	21,32	A-235	LL-1427	0,2338	141,36	0,4154	3,0000	Sur

La parcela A-220, ubicada en la región central, presenta un tipo de roca arcillosa limolita, de baja permeabilidad (valores de 776 mD) y con porosidad del 20 %; por tal motivo se evidencia en la zona un bajo factor de recobro que no llega a un 20 % a pesar de la alta saturación de agua del 58 %. En la parcela A-203 se incrementa a un 124 % el factor de recobro con saturaciones de agua del 33 % y permeabilidades altas mayores de 1 680 mD, debido al tipo de roca que favorece la continuidad espacial del flujo.

Por otro lado, se analizó la región sur que registró una baja permeabilidad, además de heterogeneidad, en cuanto al tipo de roca que va desde 1 hasta 3: arenas masivas y arenas intercaladas limo y lutíticas, alcanzándose una alta saturación por el hinchamiento de las arcillas, mas no existe una eficiente continuidad de flujo.

3.2.4 Unidad de flujo LL-D

En la unidad de flujo LL-D el comportamiento de los factores geológicos es muy variable. En todas las regiones se manifiesta una alta saturación de agua, que oscila entre 30 % hasta 53 % (Tabla 4), es decir, la unidad de flujo está muy invadida por agua por efecto de la inyección; además de otros elementos, como la permeabilidad, que se manifiesta heterogénea, oscilando entre 418 mD hasta 1 650 mD. Los tipos de roca van desde arenas masivas hasta arenas intercaladas con limo y lutitas y, por tanto, una variación en el coeficiente de porosidad entre 26 % y 31 %.

Tabla 4. Datos geológicos y de producción de los pozos. Unidad LL-D

No	Factor de recobro FR (%)	Parcela	Pozo	Porosidad (ϕ) %	Permeabilidad (K) mD	Saturación de agua (S_w) %	Rango petrofísico	Región
1	35,1	A-215	TJ-1423	0,3179	1 487,00	0,3172	1,5700	Norte
2	20,6	A-195	TJ-1121	0,3057	1 048,63	0,5350	1,8344	Norte
3	19,2	A-220	LL-3558	0,3150	1 250,55	0,4782	1,3300	Central
4	124,5	A-203	LL-1496	0,2654	418,05	0,4620	2,4211	Central
5	4,6	A-208	LL-2914	0,3127	1 652,20	0,3558	1,6271	Sur
6	21,32	A-235	LL-1427	0,2862	660,09	0,2642	2,2600	Sur

Las variables permeabilidad, porosidad y saturación confirmaron la diferenciación del tipo de roca en las tres regiones: norte, en la que se observó en la parcela 196 una baja permeabilidad a pesar de lo somera que se encontraba la unidad. Revisando los estudios de Stapor (1998) se constató que la baja permeabilidad se debió a que la unidad sufrió un proceso de inundación que influyó en el tipo de roca, otros de los elementos son los bajos valores de porosidad que se promedian en 22 % y bajas permeabilidades en valores promedio de 600 mD, lo que repercuten en la continuidad espacial del flujo. Por otro lado, se realizó la revisión de los mapas tectónicos donde se reflejan zonas de fallas significativas en las parcelas A-195 y A-196.

En la región central se manifestó un cambio litológico en la parcela A-220, según los datos interpretados de la porosidad en un promedio del 30 %, permeabilidad con valores mayores de 1 600 mD y rango petrofísico entre 1 y 2, según la clasificación referida por Salazar (2006). La región sur está influenciada por las intercalaciones de arenas masivas y arenas limo-arcillosas que se manifestaron en las cuatro unidades, lo que se evidenció mediante el modelo geológico, presentando zonas más profundas, que se encuentran en la parte más baja de la estructura tectónica, viéndose así más saturada y logrando un recobro en las unidades de flujo LL-B y LL-C (Figura 5) mayor del 19 % de factor de recobro.

4. CONCLUSIONES

- Las propiedades petrofísicas mostraron gran variabilidad con valores bajos de permeabilidad y porosidad en la región sur, donde se registraron permeabilidades menores de 800 mD, saturaciones mayores del 50 % y porosidades menores del 20 %. Mientras que la región norte presenta mejores características para la recuperación de petróleo, dado por sus mayores porosidades, permeabilidades más altas y bajas saturaciones.

- El análisis del bloque de diagrama del yacimiento indica la necesidad de reevaluar los parámetros de inyección partiendo de la morfología del yacimiento y las estructuras que lo atraviesan, que condicionan las direcciones de flujo y generan migración de fluidos por pérdida de presión.
- Los efectos de distribución de flujo obtenidos por cada región indican que la región de menor influencia de saturación por agua es la norte, que registra saturaciones inferiores a 25 %.
- Las regiones con características geológicas más adecuadas para nuevos proyectos de redistribución de pozos inyectores es la zona norte y central. La zona sur se encuentra con un tipo de roca más empobrecida y más saturada por agua con valores por encima del 50 %, lo que indica menos posibilidades de recuperación.

5. REFERENCIAS

- EXGEO. 2001: Report of the integrated Study LL-05 Field. Informe PDVSA. Maracaibo, Edo Zulia.
- EXGEO C.A. PDVSA. 2005: Actualización y revisión del modelo estático y dinámico y plan para el desarrollo del yacimiento LL-05. Maracaibo, Edo Zulia.
- GALLARDO, H. 2012: *Modelo de flujo por imbibición en yacimientos fracturados*. Trabajo de Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México.
- LUGO, J. 1992: Historia tectónica a lo largo de los sistemas de fallas de Icotea y Pueblo Viejo, cuenca de Maracaibo. VI Congreso Venezolano de Geofísica. Memorias. Caracas, p. 118-124.
- MALASPINA, M.; PALACIOS, Z.; MÉNDEZ, M. & CUBILLAN, G. 2006: Actualización del modelo estático para la región central del proyecto de inyección de agua en el yacimiento C-6S/SVS-13, bloque IX, flanco oeste. U.E Lagomedia. Universidad de los Andes. Venezuela.
- MORALES, M. 2002: *Caracterización sedimentológica del yacimiento B-1 Svs0073 de la formación Misoa en la cuenca de Maracaibo*. Tesis de Maestría. Universidad Central de Venezuela. 226 p.
- PARIS DE FERRER, M. 2001: *Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos*. Ediciones Astro data S.A. Maracaibo, Venezuela.
- PDVSA. 2000: Comunidades de conocimientos en métodos convencionales de recobro. Informe PDVSA. Maracaibo, Edo Zulia.

- PDVSA. 2010: Revisión y optimización del proyecto de inyección de agua del yacimiento LGINF-05, Tía Juana Lago. Informe Departamento de Recuperación Mejorada de Hidrocarburo, PDVSA. Maracaibo, Edo Zulia.
- ROURE, F.; COLLETTA, B.; DE TONI, B.; LOUREIRO, D.; PASSALACQUA, H. & GOU, Y. 1996: Within-plate deformations in the Maracaibo and East Zulia basins, western Venezuela. *Marine and Petroleum Geology* 14(2): 139-163.
- SALAZAR, V. 2006: *Caracterización petrofísica del yacimiento Lagunillas Inferior 05*. Trabajo de diploma. Universidad del Zulia.
- STAPOR, F. 1998: Facies, Depositional Environments, and Sequence Stratigraphic Framework of the La Rosa Formation (Miocene) and the Lagunillas Inferior Member of the Lagunillas Formation (Miocene), LL05 Region, Maracaibo Lake. Informe PDVSA. Maracaibo, Edo Zulia.

Iiver Michel Soto-Loaiza, ilveto@hotmail.com

Ingeniero en Petróleo, Máster en Ciencias Geológicas.
Universidad Bolivariana de Venezuela, Venezuela.

José Quintín Cuador-Gil, cuador@upr.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Física,
Universidad de Pinar del Río, Cuba.

Modelación de la aptitud ingeniero-geológica de los suelos de la ciudad de Luanda

Gabriela J. Pereira Teixeira-Pires
Héctor Manuel Fernández-Núñez
Carlos Sacasas-León

Resumen

Este trabajo tuvo como objetivo obtener, mediante lógica difusa, un modelo espacial de aptitud de los suelos de la ciudad de Luanda a partir de dos parámetros: litología y pendiente. Se detectaron zonas favorables para la construcción civil (infraestructuras urbanas y viales) y sectores con comportamiento diferenciado que pueden condicionar riesgos, lo que exige un reordenamiento territorial. El modelo establece orientaciones para la confección de la carta geotécnica para la ciudad de Luanda y sirve como instrumento que ayuda en el planeamiento territorial

Palabras clave: lógica difusa; cartografía geotécnica; modelación; ordenamiento territorial.

Modeling for the soil engineering-geological capabilities in the city of Luanda

Abstract

The objective of this investigation was to obtain, by means of fuzzy logic, a spatial model for the soil aptitude in the city of Luanda based on two parameters: lithology and slope. Favorable areas for civil constructions were identified (urban infrastructures and roads) and sectors with differentiated behavior that can pose a risk, requiring a territorial planning. The model establishes the directions for the preparation of the geotechnical map for the city of Luanda, which is a helpful instrument for the territorial planning.

Keywords: fuzzy logic; geotechnical mapping; modeling; territorial planning.

1. INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Luanda y sus alrededores, en la última década, los suelos han sido objeto de innumerables intervenciones de obras socioeconómicas, a veces de forma incontrolada y no muy bien planificada, que han producido numerosas pérdidas por construcciones realizadas en lugares inadecuados que han provocado derrumbes o agrietamiento de las vías de comunicación y, en otros casos, han inducido problemas de inundaciones o deslizamientos de tierras. Todo esto tiene como causa fundamental la inexistencia de una cartografía geotécnica que oriente y ayude a una mejor planificación física de la ciudad.

Los suelos tienen usos muy diversos, por tal motivo, estudiar las propiedades que determinan su comportamiento, así como la aptitud para diferentes tipos de actividades, siempre ha constituido una parte importante en la confección de cualquier cartografía geotécnica.

Se ha utilizado la cartografía geotécnica para representar los productos de mapeo de las propiedades de los suelos (Baptista-Moitinho 1991); además del conocimiento de la geología para planeamiento regional y urbano. Por otra parte, Silva y colaboradores (2000) se refieren al mapeo geotécnico como el levantamiento de informaciones referentes a las características de los atributos del medio físico y al manejo y conservación de determinada porción del espacio. Silva (2000) trabaja en la cartografía ingeniero-geológica y peligros y riesgos de Almada. En tanto, Pires (2007) trata aspectos generales de la cartografía geotécnica para el ordenamiento para la ciudad de Luanda.

Han existido para la cartografía geotécnica diferentes metodologías a partir de la década del cincuenta, las cuales fueron aplicadas conforme a las necesidades y características de cada región, algunas son utilizadas hoy con determinadas adaptaciones (Guardado-Lacaba 1995; Cabrera 2002; Rodrigues & Augusto Filho 2007 citado por Franco *et al.* 2010; Ordaz-Hernández *et al.* 2012). Y otras no han atendido las condiciones ambientales, tecnológicas y socioeconómicas de cada país (Andrade 2005 citado por Franco *et al.* 2010).

Entre las metodologías para la cartografía geotécnica se destaca la presentada por la *International Association for Engineering Geology and the Environment* (IAEG 1968) en la que se propone la creación de una comisión de mapeo ingeniero-geológico para desarrollar estudios que regulen la elaboración de la cartografía geotécnica y sus productos; además de una guía de preparación de mapas geotécnicos para la UNESCO (1976).

En 1976 la IAEG define que una carta o mapa geotécnico es un tipo de mapa geológico que clasifica y representa los componentes del ambiente físico de importancia en las actividades de ingeniería, planificación, construcción, operación y conservación del medio ambiente. Además, se refiere a la inclusión de las clasificaciones de los suelos y de sus propiedades ingenieriles.

Las metodologías de clasificación textural y las clasificaciones geotécnicas, expresadas en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS (ASTM D 2487-85) y la clasificación *Highway Research Board* (HRB-AASHTO E 240-1970), son las más comúnmente utilizadas e incluyen la caracterización geotécnica de las unidades así como las propiedades mecánicas de los suelos y de las rocas (Silva 2000; Zuquete y Galdonfi 2011).

A partir de los años 60 se inicia la cartografía digital geotécnica, que aún incipiente con el desarrollo de la computadora, revoluciona la cartografía tradicional, pero todas ellas utilizan en ocasiones los mismos factores naturales, que una vez ponderados, clasificados o simplemente analizados, intervienen en la creación de los modelos que pueden ser validados o verificados con trabajos de campo.

El análisis de la aptitud de los suelos, desde el punto de vista geotécnico, no representa hechos absolutos, sino juicios relativos. Los modelos de diagnóstico y pronóstico que la componen, por más informaciones que posean, son abstracciones –o simplificaciones– de la realidad, que imponen la elección de determinados factores entre la enorme complejidad de los mismos, que afecta incluso áreas de pequeñas dimensiones. Más allá de este hecho, y en función del tipo de análisis, el proceso puede exigir la ponderación de la importancia relativa de los factores (sometidos a juicios subjetivos) que intervienen en los modelos creados y la adopción de algunos presupuestos basados también en juicios con diferentes grados de subjetividad (Azevedo 2004). El mismo autor refiere que la atribución de pesos envuelve cierto grado de subjetividad en el proceso de combinación de variables, sin embargo, actualmente se desarrollan herramientas matemáticas, en el campo de la inteligencia artificial, que ayudan a disminuir esta subjetividad, por ejemplo, las redes neuronales y la lógica difusa.

Los procesos de decisión pretenden satisfacer múltiples objetivos y son desarrollados con base en la evaluación de uno o varios criterios. Eastman (1997, citado por Ramos y Mendes 2001) en sus trabajos ha presentado el concepto de áreas de aptitud. Este término, según Partidario (1999), es la

mayor o a menor facilidad que una parcela dada del territorio presenta, en función de sus características biofísicas y del medio socioeconómico en el que se integra, para producir bienes o prestar servicios de forma equilibrada y con eficacia sin deteriorar su capacidad productiva o sus características intrínsecas.

El presente trabajo, caracterizado por factores de carácter subjetivo que imponen la elección de estos, según su grado de complejidad, hace necesario la aplicación de la lógica difusa de modo que permite la utilización de conceptos como "verdad parcial" –el conjunto verdad que se sitúa entre "enteramente verdadero" y "enteramente falso" (Zadeh 1960 citado por Jané 2004). Además, se utiliza como instrumento para modelar la incertidumbre y como metodología capaz de generalizar cualquier teoría, partiendo de una forma discreta para una forma continua. Los factores fueron analizados y combinados a través de la atribución de diferentes grados de valoración y posteriormente normalizados a través de la aplicación de la lógica difusa.

El objetivo del presente trabajo es presentar un modelo que describa la aptitud ingeniero-geológica de los suelos de la ciudad de Luanda utilizando las herramientas de geo-procesamiento que brinda la lógica difusa.

En este modelo se tuvieron en cuenta dos factores principales: la pendiente del relieve y los tipos de suelos, según los resultados de laboratorio y en las clasificaciones con base en SUCS y AASHTO, para conocer cuáles son los grupos de suelos predominantes en las diferentes unidades litológicas de la ciudad de Luanda, Angola.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Localización y caracterización del área

El área en análisis (Figura 1) fue la provincia de Luanda, capital de la República de Angola. Forma parte de la cuenca sedimentaria del Kwanza, con las cuencas sedimentarias que están genéticamente ligadas a la separación del Gondwana y a la apertura del Atlántico Sur, eventos que datan desde el Barremiano, final del Cretácico (Marinho 1957 citado por Brandão y Pires 1984).

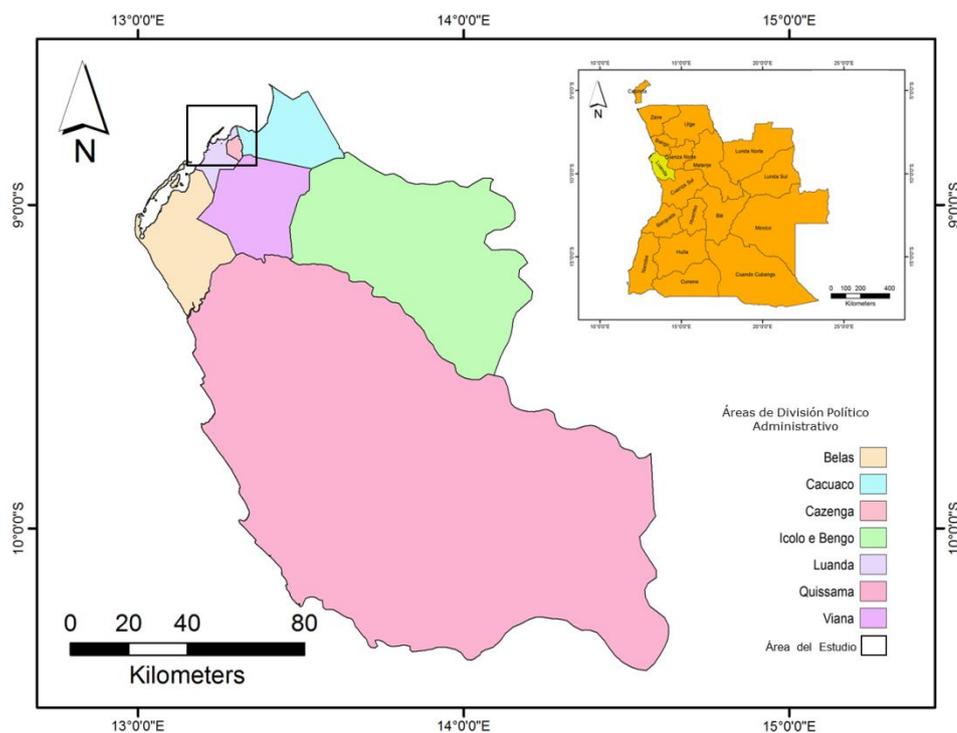


Figura 1. Localización del área de estudio en la provincia de Luanda.

En la región de Luanda se distinguen dos unidades litológicas: las someras, que corresponden a las unidades recientes del Pleistoceno y las del substrato del Plioceno y del Mioceno (Figura 2).

Las unidades recientes incluyen los terraplenes (A), los aluviones, constituidos por materiales heterogéneos y los sedimentos fluvio-lacustres (Al), las arenas de playa (ap) que constituyen las islas y cordones litorales, los depósitos de vertiente (a3) y conos de eyección (a2), los aluviones recientes (a1), que están asociados a las líneas de agua, y la unidad de las arcillas negras o arcillas del Cazenga (Q3). Las formaciones Quelo con dos unidades, arenas rojas (Q2) y arenas grises (Q1) constituidas esencialmente por arenas de edad Pleistocénica, se incluyen también en las unidades someras. Las unidades del substrato corresponden a la formación Luanda (p1) del Pliocénico, constituida por materiales no consolidados arenas, silicitos y arcillas y materiales consolidados arenitas y la formación Cacuaço (m1c), constituida por carbonatos descompuestos y calizas.

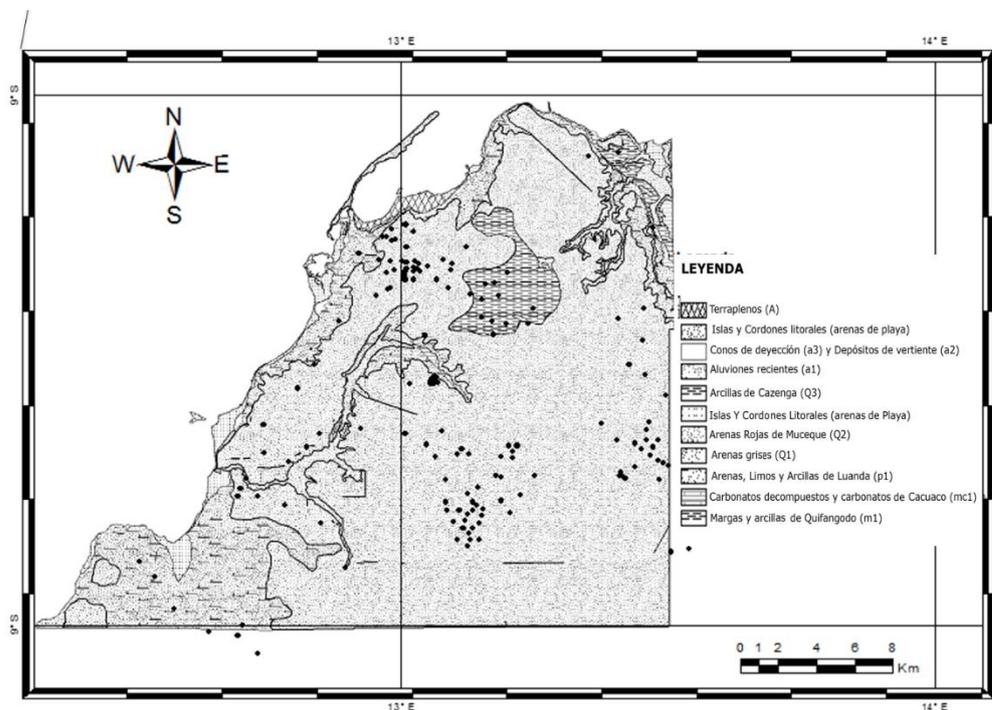


Figura 2. Carta litológica del área de la ciudad de Luanda y sus alrededores.

2.2. Metodología

Para la caracterización geotécnica del área se utilizaron informaciones recogidas de informes, que incluyen prospecciones, ensayos *in situ* y ensayos de laboratorio de muestreos realizados en el campo (pozos, y prospecciones con ensayos de penetración estándar - SPT) referentes a las diferentes unidades litoestratigráficas. Fueron utilizados documentos cartográficos (mapas topográficos y geológicos) para la evaluación y actualización de la distribución espacial de las unidades litológicas.

Los factores fueron analizados y combinados a través de la atribución de diferentes grados de importancia (valoración) y posteriormente normalizados a través de la aplicación de la lógica difusa.

La lógica difusa, con base en la teoría de los conjuntos nebulosos, se ha mostrado más adecuada para tratar defectos de información que la teoría de las probabilidades. De forma más objetiva y preliminar, se puede definir la lógica difusa, como una herramienta capaz de capturar informaciones vagas, en general descritas en un lenguaje natural y convertirlas para un formato numérico, de fácil manipulación por las computadoras (Jané 2004). Esta herramienta ha encontrado aplicación en diversas áreas (Ramos y Mendes 2001), con demostración en la capacidad de adaptación y facilidad de interface con el ser humano (Jané 2004).

El procedimiento para aplicación de la lógica difusa tiene, como base, necesariamente una matriz en la que las variables y sus posibles combinaciones son determinadas según su grado de aptitud, este hecho inicialmente envuelve un cierto grado de subjetividad. En cuanto a la subjetividad del análisis, esta está presente tanto en los procedimientos basados en operaciones matemáticas, desde el momento en el que son atribuidos pesos relativos o donde la selección de variables es necesaria.

Para la evaluación total de cada unidad lito-estratigráfica se realizó el cálculo de los valores ponderados, resultantes de la distribución de los tipos de suelos en las diferentes unidades geotécnicas, a lo cual se asoció la distribución porcentual y el conjunto difuso atribuido para cada grupo de suelos, logrando de esta forma una evaluación difusa para cada unidad litológica.

Para la valoración difusa de la pendiente se utilizó la función sigmoideal inversa y continuada que corresponde al intervalo logrado para la litología, manteniendo de esta forma el mismo peso para los dos parámetros.

El mapa de pendientes (Pires 2007), como se muestra en la Figura 3, presenta la morfología del terreno y los intervalos de clases utilizados son los que se utilizan en el ámbito de la cartografía geotécnica, en función de las limitaciones que se imponen al uso del suelo que son < 2 %, 2-5 %, 5-8 %, 8-15 % y > 15 %. Con relación a los fenómenos de erosión y deslizamientos se establecieron intervalos de pendiente expresados en grados y se indica, para cada intervalo, el equivalente en porcentaje, según la tabla de equivalencias presentada (Marsh 1978 citado por M.O.P.T. 1992).

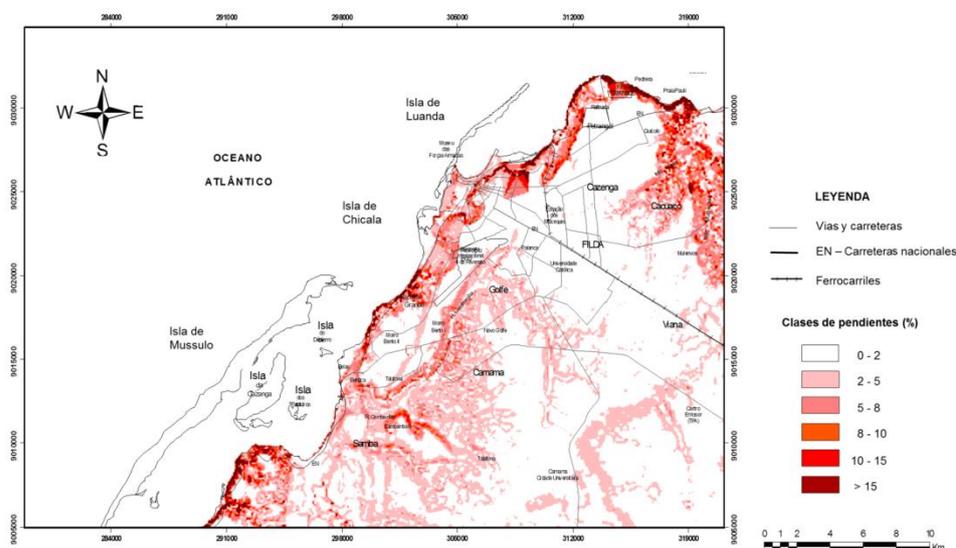


Figura 3. Carta de pendientes (Pires 2007).

3. RESULTADOS

3.1. Características de las unidades geotécnicas

Las unidades geotécnicas se distribuyen en unidades superficiales y subterráneas. Los terraplenes (A), a lo largo de la marginal, son constituidos por materiales heterogéneos, arcillo-arenosos, arenosos y pedregosos. Estos depósitos se encuentran sobre las arenas de playa, sobre los depósitos de vertiente o sobre depósitos fluviales marinos y constituyen los terraplenes en la parte baja de la ciudad. El espesor varía entre 2 m y 5 m, alcanzando un espesor máximo de 9 m.

Las arenas de playa (ap) ocupan una banda a lo largo del litoral y son constituidas por arenas heterogéneas, limpias, de granulometría variada, muchas veces con fragmentos de conchas. Estos depósitos alcanzan espesores en el orden de dos decenas de metros, en la isla de Luanda y en los depósitos a lo largo del marginal el espesor está en el orden de los cinco metros.

Los depósitos de vertiente (DV) están constituidos por materiales de carácter heterogéneos provenientes de las zonas elevadas, que ocupan la base de las vertientes en la zona baja de la ciudad de Luanda. Los conos de deyección (a2) son unidades constituidas por arenas y guijarros que abarcan áreas restringidas en la desembocadura de las líneas de agua.

Los depósitos de aluviones (Al) más antiguos ocupan los terrenos de cotas bajas. Son constituidos por depósitos fluviales marinos, con arenas de granulometría variada y arcillas.

Los aluviones recientes (a1) que constituyen los depósitos heterogéneos de arenas y guijarros se encuentran en el fondo de los valles del río Cambamba y Cambolombo, al sur de Luanda; en tanto al norte estos depósitos son encontrados en el valle Mulenvos.

Las arcillas de Cazenga (Q3) presentan espesores que varían entre 1,5 m a 6 m y son constituidas por arcillas arenosas y arcillas limosas, arenas limosas y arenas arcillosas y limos arcillosos o arenosos. El porcentaje de arcilla varía entre 8 % y 71 %, de limos entre 3 % a 51 % y de arena entre 11 % y 73 %. El límite de liquidez varía entre 30 % y 74 % y el índice de plasticidad entre 8 % y 45 %. Son suelos de baja a alta plasticidad. Los suelos finos son del grupo CL, CH, MH, y ML, que corresponden a los grupos A-6, A-7-5 y A-7-6 y los suelos gruesos son del grupo SC, que son materiales granulares que corresponden a los grupos A-2-4 y A-4, con índices de grupo inferiores a 2. Los minerales presentes en la muestra total son: cuarzo, feldspatos y vestigios de calcita. En la fracción arcillosa se

encuentran la caolinita, illita y esmectites, cuya presencia confiere propiedades particulares a esta unidad.

Las arenas de Quelo cubren la mayor parte del área de la planicie de Luanda y forman los terrenos someros del tope de las terrazas costeras, con espesores próximos a cuatro metros, que disminuyen en el tope de los terrenos litorales a menos de un metro. En el área urbana esta planicie alcanza espesores entre 4 m y 12 m. Los suelos están constituidos por arenas, arenas limosas, arenas arcillosas, limos y arcillas limosas o arenosas. El límite de liquidez varía entre 13 % a 44 %, el límite de plasticidad entre 9 % y 25 % y el índice de plasticidad entre 1 % y 22 %. Son suelos con baja plasticidad y, en general, son suelos no plásticos. La actividad corresponde a las arcillas inactivas y activas con valores entre 0,09 a 1. Los suelos más gruesos son de los grupos SW-SM, SP-SM, SM, SC, que corresponden a los materiales granulares de los grupos A-2-4 y A-3, con índice de grupo igual a cero. Los suelos finos son de los grupos CL y ML, que corresponden a los materiales silíceos arcillosos de los grupos A-4, con índice de grupo inferior a 7, A-6 con índice de grupo inferior a 8 y A-7-6 con índice de grupo inferior a 12.

Las unidades del substrato comprenden:

Las arenas, arcillas y limos de Luanda: tienen una amplia distribución geográfica y bajo las arenas del Quelo, constituyen los suelos del substrato en casi toda el área de la provincia de Luanda. Se trata de suelos con arenas, arenas limosas y arenas arcillosas; limos arenosas y limos arcillosos; arcillas y arcillas limosas y arenosas. Los suelos más gruesos son del grupo SW, SM, SC, SP, SW-SM, SP-SM y SC-SM, que corresponden a los grupos A-1, A-2-4, y A-3, con índice de grupo (0). Los suelos finos son CL, ML, CH, MH, CL-ML, que corresponden a los suelos silíceos-arcillosos de los grupos A-4, A-6, A-7-5 y A-7-6. Las arenas presentan baja plasticidad con límite de liquidez entre 19 % y 28 % e índice de plasticidad entre 3 % y 12 %; las arcillas tienen límite de liquidez entre 23 % y 33 %, e índice de plasticidad entre 7 % y 39 %, que representan materiales de plasticidad baja a alta. Los limos y las arcillas presentan plasticidad alta a muy alta, con límite de liquidez entre 57 % y 75 % e índice de plasticidad entre 25 % y 39 %.

Los carbonatos de Cacuaco: son rocas calizas detríticas pulverulentas, más o menos dolomitizadas y afloran en áreas muy reducidas, constituyendo dos manchas en el planalto de Luanda. La mayor extensión se observa a lo largo de la costa al norte de Luanda, desde el Puerto Pesquero al Faro de las Langostas. La mayor exposición de estas unidades es visible en la

terrazza de San Pedro de la Barra donde los carbonatos y calizas fosilíferas poseen estructura maciza y en el yacimiento de SECIL. Como consecuencia de diversas fases y procesos de alteración, los carbonatos de Cacuaco estuvieron en la génesis de las arcillas de Cazenga, más recientes y de otros tipos de suelos de alteración, agrupada en la designación de "carbonatos descompuestos de Cacuaco", que son constituidos por arcillas, arcillas arenosas, arenas arcillosas, arenas limosas y limos. Estos suelos presentan plasticidad baja a alta; el límite de liquidez se encuentra entre 24 % y 79 % y el índice de plasticidad entre 3 % y 46 %. Los suelos constituyentes son, según la clasificación unificada de los grupos, SM, CL y CH, que corresponden a los grupos A-4, A-2-4, A-6, A-7-5 y A-7-6, con índices de grupo entre 8 y 20.

Las arcillas y margas de Quifangondo: están constituidas por arcillas y margas con intercalaciones de calizas, las cuales pueden ser de tipo arcillas, arcillas limosas, limos y limos arcillosos. En estos suelos las cantidades de arcilla son elevadas hasta 82 %, el porcentaje de sílice varía entre 40 % y 100 % y el de arena varía hasta 41 %. Los suelos pertenecen a los grupos MH, CH y OH, que corresponden a los suelos de los grupos A-6, A-7-5 y A-7-6. El límite de liquidez se encuentra entre 49 % y 86 % y el índice de plasticidad entre 27 % y 47 %, que representan plasticidad alta a muy alta. La distribución porcentual de los grupos de suelos en Luanda, según las unidades litológicas y de acuerdo con la SUCS (ASTM D 2487-85), que se utiliza para la ingeniería y la HRB-AASHTO (E 240-1970), que se destinan para fines viales, se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución de los grupos de suelos, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y según la clasificación HRB-AASHTO

CLASIFICACIÓN	Tipo de suelo	Símbolo del grupo	Descripción materiales constituyentes más frecuentes y significativos	Unidades geológico-geotécnicas/distribución en porcentajes					
				Arcillas del Cazenga (Q3)	Arenas de Quelo (Q2;Q1)	Arenas, arcillas y limos de Luanda (p1)	Carbonatos descompuestos y Carbonatos de Cacuco (p1)	Arcillas y margas de Quifangondo (m1)	
SUCS	Suelos de grano grueso	SW	Arenas bien equilibradas o arenas gravosas			1			
		SM	Arenas limosas, mezclas arena/limo		42	29	33		
		SC	Arenas arcillosas, mezclas arena/arcilla	20	24	3			
		SP	Arenas pobremente equilibradas o arenas gravosas		3	6			
		SW-SM	Arenas bien equilibradas con limo			1			
		SW-SC	Arenas bien equilibradas con arcilla						
		SP-SM	Arenas pobremente equilibradas con limo		4	12			
		SP-SC	Arenas pobremente equilibradas arcillo-limosas			12			
		SC-SM	Arenas limosas, arcillosas, mezclas limo-arcilla		18	3			
	Suelos de grano fino	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas con débil plasticidad	13	3	8			
		CI	Arcillas inorgánicas con plasticidad baja/media	13	6	19	11	4	
		MH	Limos inorgánicos, limos elásticos	41		11		49	
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas			10	56	47	
		CL-ML	Limos y arcillas inorgánicos de baja plasticidad			1			
CH		Arcilla orgánica de plasticidad media/alta limo orgánico							
HRB/AASHTO	MATERIALES GRANULARES	A-1-a			1				
		A-2	Fragmentos de rocas, gravas y arenas						
		A-1-b							
		A-3	Arena fina			40			
		A-2-4	Grava limosa o arcillosa y arena	7	73	2	36	2	
	MATERIALES LIMOSOS	A-2	A-2-5	Grava limosa o arcillosa y arena					
		A-2-6	Grava limosa o arcillosa y arena	7	3				
		A-2-7	Grava limosa o arcillosa y arena						
		A-4	Suelos limosos		8	21		2	
		A-5	Suelos limosos						
A-6	Suelos arcillosos	7	11	11	18				
A-7-5	Suelos arcillosos	7		17	9	80			
A-7-6	Suelos arcillosos	66	1	9	37	16			

Teniendo en cuenta la distribución de la clasificación SUCS (Tabla 1) y considerando los resultados de Correia (1988), fueron transformados los diferentes grupos de suelos en un conjunto de valores difusos en el intervalo [0,15; 0,63], tal como se muestra en la Tabla 2. Cada unidad litológica presenta comportamiento diferenciado debido a la presencia de determinados grupos de suelos, así tenemos condicionamientos en cuanto a utilización o ante una solicitud.

Tabla 2. Valoración de los grupos de suelos con base en la clasificación SUCS, modificado con la lógica difusa

Suelos de grano grueso	Símbolo	GW	GP	GM	GC	SW	Sp	SM	SC
	Valoración	0,99	0,94	0,89	0,84	0,79	0,74	0,69	0,64
	Símbolo	SW-SM		SW-SC	SP-SM	SP-SC		SC-SM	
	Valoración	0,59		0,54	0,49	0,44		0,39	
Suelos de grano fino	Símbolo	CL	ML	OL	CH	MH	OH	CL-ML	
	Valoración	0,34	0,29	0,24	0,19	0,14	0,09	0,04	

Los grupos de los suelos que constituyen las unidades someras, como las arcillas del Cazenga, las arenas de Quelo y arenas grises, bien como las unidades del substrato arenas, limos y arcillas de Luanda, carbonatos descompuestos y rocas calizas de Cacuaco y las arcillas y margas de Quifangondo, son constituidas por grupos de suelos ya estudiados.

Fue realizada, de igual manera, una valoración de los grupos de suelos para las unidades litológicas con base en la clasificación HRB-AASHTO. En este intervalo el valor máximo alcanzado fue de 0,99 y el valor mínimo fue de 0,08 (Tabla 3).

Tabla 3. Valoración de los grupos de suelos con base en la clasificación HRB-AASHTO, modificado con la lógica difusa

Suelos granulares						
A-1		A-3	A-2-4			
A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
0,9999	0,9167	0,8333	0,7500	0,6667	0,5833	0,5000
Suelos limo-arcillosos						
A-4	A-5	A-6	A-7			
			A-7-5	A-7-6		
0,4167	0,3333	0,2500	0,1667	0,0833		

Para la valoración difusa de la pendiente el intervalo obtenido fue [0,15; 0,63] que corresponde al intervalo logrado para la litología, manteniendo de esta forma el mismo peso para los dos parámetros, donde

los valores cercanos a cero (0) son los que corresponden a los declives altos (menos favorables); mientras que los valores próximos a 0,63 representan los declives bajos (más favorables).

Tabla 4. Valoración de los intervalos de pendientes del terreno, según la lógica difusa

Clasificación	Muy suave a suave		Moderado			Alto
	< 2	2 - 5	5 - 8	8 -10	10 -15	> 15
Intervalos (%)	< 2	2 - 5	5 - 8	8 -10	10 -15	> 15
Valoración	0,630	0,525	0,420	0,315	0,210	0,105

Las unidades someras (terraplenes, arenas de playa, aluviones, depósitos de vertiente y conos de deyección) fueron evaluadas nuevamente de forma subjetiva, por escasez de datos y debido a ausencia de datos relativos a los ensayos de laboratorio, considerándose así la litología descrita en los perfiles de las prospecciones existentes en los informes. En este caso fueron observadas varias muestras y fue atribuida una valoración por extrapolación. Los grupos de suelos que constituyen las unidades someras, como las arcillas del Cazenga, las arenas rojas y las arenas grises del Quelo, así como las unidades del substrato arenas, silices y arcillas de Luanda, carbonatos descompuestos y los carbonatos de Cacuaco, las arcillas y las margas de Quifangondo, están constituidos por los grupos de suelos que sirvieron de base para este trabajo.

Para la evaluación total de cada unidad lito-estratigráfica se realizó nuevamente el cálculo de los valores ponderados resultantes de la distribución de los tipos de suelos en las diferentes unidades geotécnicas, lo cual se asoció a la distribución porcentual y el conjunto difuso atribuida para cada grupo de suelos, logrando de esta forma una evaluación difusa para cada unidad litológica (Tabla 5).

Tabla 5. Valoración de los grupos de suelos en las diferentes unidades geotécnicas, modificados con la lógica difusa

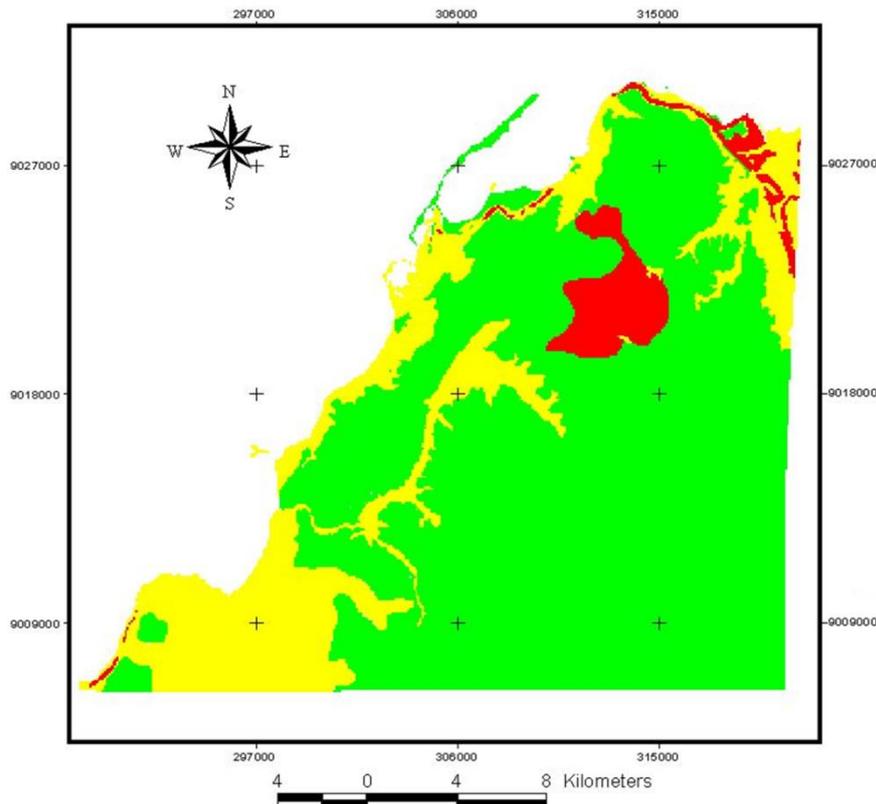
Unidades geotécnicas	Valoración SUCS	Valoración HRB-AASHTO
Islas y cordones litorales	0,5	0,56
Terraplenes	0,5	0,57
Aluviones (sedimentos fluvio-marinos)	0,4	0,16
Conos de deyección y depósitos de vertiente	0,5	0,56
Aluviones recientes	0,5	0,53
Arcillas de Cazenga	0,3	0,19
Arenas rojas (Quelo)	0,6	0,63
Arenas grises (Quelo)	0,6	0,60
Arenas, arcillas y limos de Luanda	0,4	0,4
Carbonatos descompuestos y carbonatos de Cacucaco	0,4	0,36
Margas y arcillas do Quifangondo	0,2	0,17

El modelo presentado resulta de la combinación de dos mapas fuzzy temáticos litológicos, con base en las clasificaciones SUCS y HRB-AASHTO y los de declive, utilizando la extensión ARCSDEM (Sawatzky *et al.* 2004) de ArcGis, definiéndose el operador lógico AND como el más aceptable, para la creación de mapas de aptitud (Figura 4). Los resultados logrados con este operador se presentan más conservadores que los otros operadores, adaptándose mejor a las necesidades de este análisis.

Las áreas no favorables incluyen las arcillas de Cazenga, debido a la presencia en la fracción de arcillas del grupo esmectita (montmorillonita), lo cual influye en su comportamiento expansivo.

Las unidades geotécnicas ampliamente distribuidas son las arenas del Quelo, que son las capas más superficiales y presentan grupos de suelos que proporcionan comportamiento de bueno a regular, favorables ante las diferentes solicitudes.

Las arenas, arcillas y los limos de Luanda componen una gran variedad de grupos de suelos con materiales granulares, que incluyen los grupos con una utilización ingeniero-geológica favorable, en tanto las áreas con arcillas y margas son no favorables porque predominan los limos arcillosos, como ilustra la Tabla 1.



LEYENDA

APTITUD:

- No favorables: suelos muy arcillosos e impermeables
- Favorables con reservas: suelos muy heterogéneos
- Favorables: suelos arenosos

Figura 4. Mapa de aptitud ingeniero-geológica de los suelos de la ciudad de Luanda. Para el análisis de la aptitud, teniendo en cuenta las condiciones geológicas, en particular las características geotécnicas y algunos elementos de la geomorfología (pendiente), se muestra un escenario de las áreas favorables a la ocupación y áreas no favorables asociada a los riesgos.

4. CONCLUSIONES

El empleo de la lógica difusa para la evaluación de los suelos, teniendo en cuenta aspectos relacionados con la calidad geotécnica y la pendiente como factor geomorfológico, permitió definir que los suelos de la ciudad de Luanda poseen una aptitud ingeniero-geológica en la que se detectan zonas favorables para la construcción civil (infraestructuras urbanas y viales) y sectores con comportamiento diferenciado que pueden condicionar riesgos,

lo que exige un reordenamiento territorial en los actuales uso del desarrollo general constructivo de la ciudad.

5. REFERENCIAS

- AZEVEDO, J. R. R. 2004: A análise de aptidão como instrumento de planeamento de empreendimentos imobiliários e de lazer de base natural. V Seminário Internacional de LARES. S. Paulo, Brasil. Disponible en: www.lares.org.br/SL4A_azevedo.pdf.
- BAPTISTA-MOITINHO, I. M. 1991: *Características geotécnicas dos solos de Lisboa*. Dissertação de Doutoramento. Universidade de Lisboa, 391 p.
- BRANDÃO, M. G. P. & PIRES, E. S. 1984: Bacias Sedimentares de Angola. (Compilação, arranjo e actualização de vários artigos) 40 p.
- CABRERA, C. 2002: *Introducción al catastro ingeniero-geológico y geoambiental de la provincia de Pinar del Río. Aplicando tecnología SIG*. Tesis doctoral. Universidad de Pinar del Río, 130 p.
- CORREIA, A. G. 1988: Revisão da classificação de solos para propósitos de engenharia. *Geotecnia* 52: 75-90.
- FRANCO, G. B.; MARQUES, E. A. G.; CALIJURI, M. L.; GOMES, R. L. 2010: Cartografia geotécnica: estágio atual do conhecimento-geotechnical cartography: actual state knowledge. *Caminhos de Geografia* 11(35).
- GUARDADO-LACABA, R. 1995: Para la regionalización ingeniero-geológica. *Minería y Geología* 12(2): 3-9.
- JANÉ, D. A. 2004: Uma introdução ao estudo da lógica fuzzy. *Hórus Revista de Humanidades e Ciências Sociais Aplicadas* 2: 1-16. Disponible en: www.faesu.edu.br/horus/artigos%20anteriores/2004/artigo_dario.pdf
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES (M.O.P.T) (1992): Guía para La elaboración de estudios del medio físico: Contenido y metodología. 2ª edición. Monografías de la Secretaría del Estado para las Políticas del Agua y del Medio Ambiente, 572 p.
- ORDAZ-HERNÁNDEZ, A.; CHUY, T. J.; HERNÁNDEZ-SANTANA, J. R. & GARCÍA, J. A. 2012: División geológico-geotécnica aplicada a la zonación sísmica urbana: San Cristóbal, Cuba Occidental. *Cuaternario y Geomorfología* 26(1-2): 89-104.
- PARTIDARIO, M. R. 1999: Introdução ao Ordenamento do Território. Universidade Aberta, Lisboa, 210 p.
- PIRES, G. J. P. T. 2007: *Caracterização geológica e geotécnica dos solos de Luanda para o Ordenamento do Território*. Tese de Mestrado. Universidade de Lisboa, 218 p.
- RAMOS, R. A. R. & MENDES, J. F. G. 2001: Avaliação da aptidão do solo para localização industrial: O caso de Valença. *Engenharia Civil* 10: 7-30. Disponible en: www.civil.uminho.pt/cec/revista/Num10/Pag_7-30.pdf.

- SAWATZKY, D. L.; RAINES, G. L.; BONHAM-CARTER, G. F. & LOONEY, C. G. 2004: ArcSDM: ArcMAP extension sea spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis.
- SILVA, A. P. F. 2000: *Cartografia Geotécnica do Concelho de Almada e o Sistema de Informação Geo-Almada*. Dissertação de Doutoramento. Universidade Nova de Lisboa, 341 p.
- SILVA, C. E.; PEDROSA, L. E.; DIAS, L. M. C.; MORENO, M. I. C. & NISHIYAMA, L. 2000: Mapeamento Geotécnico da Folha Córrego das Moças, no Município de Uberlândia- MG. *Caminhos da Geografia* 1(2): 1-24. Disponible en: http://www.ig.ufu.br/revista/volume02/artigo01_vol02.pdf
- UNESCO – IAEG. 1976: Engineering geological mapping. A guide to their preparation. Commission on Engineering Geological Maps of the IAEG. Earth Sciences, 15, The Unesco Press, 79 p.
- ZUQUETE, L. V. & GANDOLFI, N. 2011: *Cartografia geotécnica*. Oficina de Textos, São Paulo, 190 p.

Gabriela J. Pereira Teixeira-Pires, gabrielapires@hotmail.com
Máster en Geología Aplicada y Economía. Profesora Auxiliar.
Departamento de Geología, Facultad de Ciencias.
Universidad Agostinho Neto, Luanda, Angola

Héctor M. Fernández-Núñez, hector@civil.cujae.edu.cu
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Cuba

Carlos Sacasas León, csl@civil.cujae.edu.cu
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Cuba

Estratigrafía del sector Morro–Bacuranao, provincia de La Habana, Cuba

Yaimeli Almaguer-Alvarez
Raydel Toyrac-Proenza
Santa Gil-González

Resumen

El presente trabajo aborda la estratigrafía del sector Morro-Bacuranao, zona perspectiva para producción de hidrocarburos. A la luz de recientes perforaciones que permitieron correlacionar estratigráficamente seis pozos ubicados en los municipios Habana del Este y Cojímar de la provincia de La Habana se confeccionaron los esquemas de correlación de los pozos y una columna geológica generalizada del área. Los nuevos datos estratigráficos y bioestratigráficos permiten concluir que en este sector el reservorio es del tipo Grupo Veloz, al ser una secuencia carbonatada donde predominan los mudstones calcáreos con una edad Jurásico Superior Tithoniano Superior-Cretácico Inferior. Estos resultados son de gran utilidad en la prospección petrolera, al disminuir el riesgo de la exploración en la Franja Norte de Crudos Pesados, principal zona productora de hidrocarburos de Cuba.

Palabras clave: correlación estratigráfica; prospección de petróleo; bioestratigrafía; columna geológica.

Morro-Buracanao stratigraphy, Havana province, Cuba

Abstract

This investigation presents the stratigraphy of the Morro-Bacuranao, which is a potential area for hydrocarbon prospection. Well correlation charts and the overall geologic column of the area were designed based on recent drillings that allowed making the stratigraphic correlation of six oil wells located in the municipalities of East Havana and Cojímar of Havana province. Based on revised stratigraphic and bio-stratigraphic data it was possible to conclude that in this sector the reservoir is of a Veloz Group type as it is a carbonated sequence where the calcareous mudstones of the Jurassic Superior, SuperiorTithonian- Lower Cretaceous prevail. These results are very useful for oil prospection due to the reduction of risks associated with the explorations in the Northern Strip of Heavy Crude Oils, the main hydrocarbon prospection area.

Keywords: stratigraphic correlation; oil prospection; bio-stratigraphic; geologic column.

1. INTRODUCCIÓN

El sector Morro-Cabañas se encuentra enmarcado en la Franja Norte de Crudos Pesados (FNCP), la cual se ubica en la costa norte de la provincia de La Habana y se extiende desde la bahía de Cabañas hasta Guanabo. Se corresponde con el sector marino inmediatamente aledaño a la costa ensanchándose hacia el norte hasta aproximadamente la línea que representa el frente de los cabalgamientos del cinturón plegado y cabalgado cubano (Figura 1).

La FNCP constituye la principal zona productora de hidrocarburos de Cuba, donde se han explotado históricamente yacimientos como Varadero, Boca de Jaruco, Puerto Escondido, Guanabo, entre otros. El aumento de las reservas de este recurso es de importancia estratégica para cualquier nación por lo que se realizan acciones de exploración hacia el occidente del país, tales como extender la franja hasta el Morro de La Habana.

En el norte de la provincia de La Habana se han realizado estudios estratigráficos desde la década de los cuarenta. Ejemplos de estos son los artículos de Brönnimann y Rigassi (1963); Albear & Iturralde-Vinent (1985); García-Delgado e investigadores (2001) y Gil-González, García-Delgado y Díaz-Otero (2009). En los últimos años se han perforado casi una decena de pozos en el sector Morro-Bacuranao para comprobar resultados revelados por los métodos sísmicos.

El método principal de muestreo es a partir de recortes de perforación cada 5 m o 10 m, elemento que hace compleja la interpretación estratigráfica del corte perforado. Por esta razón es de vital importancia la correlación de los estudios de superficie con estos nuevos datos y su integración en un modelo geológico coherente que ayude a reducir los riesgos de la exploración petrolera.



Figura 1. Ubicación geográfica del sector Morro-Cojímar de la Franja Norte de Crudos Pesados.

El área de estudio se enmarca fundamentalmente en el bloque 7 designado por el organismo Cuba Petróleo (CUPET), donde se localizan varios prospectos asociados al cinturón plegado y cabalgado cubano. Desde el 2007 comienza la perforación con el pozo COJ-100 y hoy suman ya diez pozos de exploración y evaluación. Se utilizaron los informes finales de seis de estos pozos como principal fuente de datos primarios. En la Figura 2 se muestra la ubicación y trayectoria de los mismos.

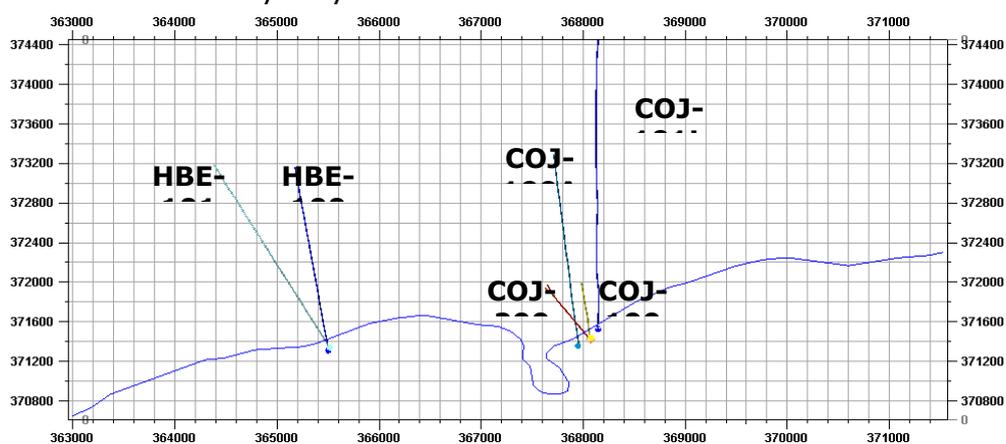


Figura 2. Mapa de ubicación de los pozos estudiados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se hizo un levantamiento de materiales primarios y de las bases cartográficas a escala 1:100 000 para la ubicación del área en el marco regional y a escala 1:50 000 para los estudios de campo. Se revisaron

artículos que aportaron información de carácter regional sobre las características del área de estudio (García-Delgado *et al.* 2011; Gil-González *et al.* 1998), así como proyectos de investigación e informes vinculados con la explotación petrolera (Blanco-Bustamante *et al.* 2007; Brey del Rey *et al.* 2008 y Valladares, García & Brey 1997).

El análisis exhaustivo del material disponible en el archivo del Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET) permitió la reinterpretación estratigráfica de los pozos LCB-100, HBE-100, HBE-101, COJ-100, COJ-100A, COJ-101L y COJ-200.

La elaboración de columnas litológicas en porcentaje, a partir de las descripciones de muestras de canal, permitieron una correlación litológica más precisa, mostrando de manera gráfica el predominio de diferentes rocas y la posibilidad de litologías "caídas". En las tablas anexas a los informes de los pozos no se detalla de manera sistemática esta información.

Se emplearon los registros geofísicos corridos en cada pozo, específicamente el de rayos gamma, por ser un registro litológico o de composición. De esta manera se pudieron correlacionar rápidamente distintos paquetes rocosos y junto a los datos litológicos y paleontológicos caracterizar los mismos.

El pozo COJ-100A, a diferencia del resto, contaba con información litológica desde superficie, por lo que se asumió como pozo patrón para la correlación. El intervalo de 395,0 m a 477,0 m fue redescrito nuevamente, desde el punto de vista paleontológico, para confirmar el tope de la formación Vía Blanca.

Toda esta información permitió conformar una tabla de topes y bases, que modificó las columnas de los pozos, además de establecer una nueva correlación y finalmente una columna generalizada del área.

Se realizaron itinerarios geológicos irregulares por el área de trabajo para reconocer las diferentes unidades en superficie. Se caracterizaron las distintas formaciones visitadas, profundizando su estudio con apoyo de la literatura consultada, lo cual, más adelante, ayudó al reconocimiento en el subsuelo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La correlación entre todos los pozos y, posteriormente, la conformación de una columna geológica generalizada del área ayudó a establecer el modelo de columna geológica para futuras perforaciones. Se partió de las columnas originales, observándose que en muchos casos resultaba incoherente la

información de un pozo a otro. En la Figura 3 se aprecia lo antes mencionado.

Debido a que las muestras desde el Eoceno Superior al Reciente constituyen el tramo del tranque de agua estas, en su mayoría, son tomadas aleatoriamente; por ejemplo, en los pozos de Cojímar, las secuencias del Eoceno al Reciente no guardan una estrecha correlación o no se detalla en los informes, aún cuando se nota que se ubican entre sí a menos de 500 m (los más distantes).

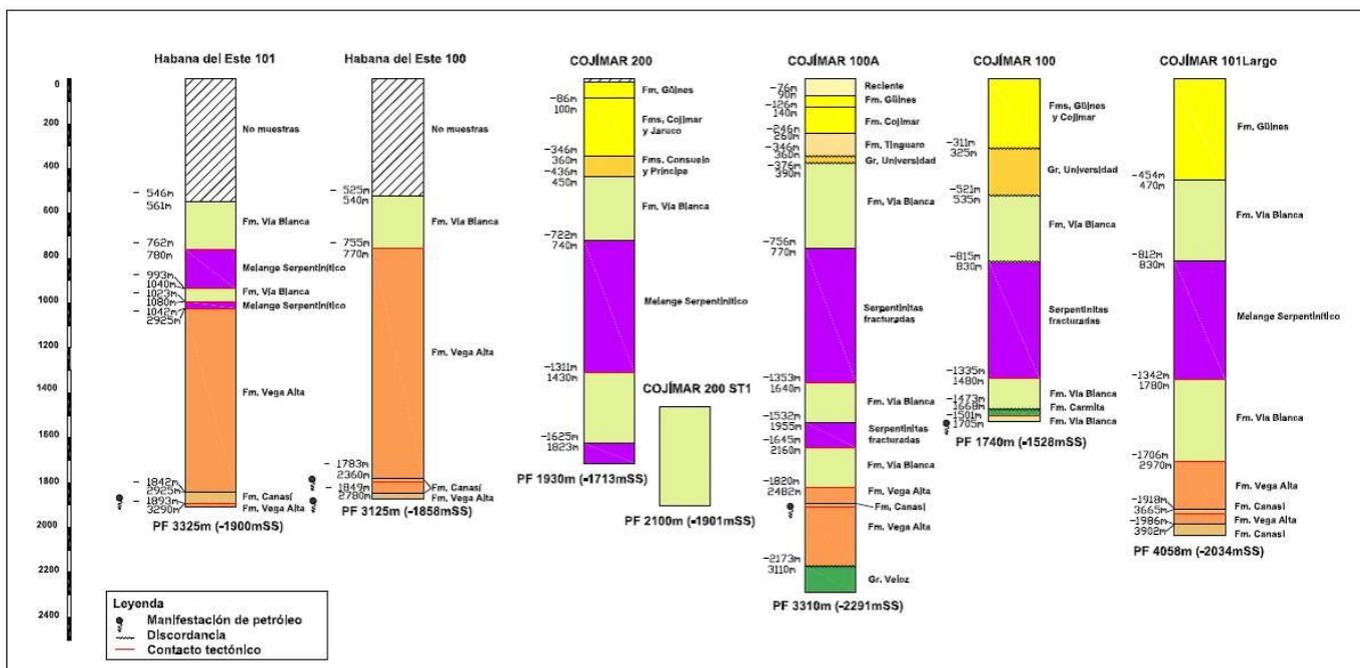


Figura 3. Columnas de seis pozos de exploración y evaluación del área de estudio. Se emplearon los topes y contactos tal y como aparecían en los informes finales de cada pozo.

Por otra parte, se aprecia una continuidad de rocas serpentínicas desde Habana del Este hasta Cojímar, las que se interpretan como un paquete serpentínico continuo; sin embargo, en el pozo HBE-100 estas fueron incluidas, al parecer, dentro de la formación Vega Alta. Otro elemento importante es la identificación del reservorio principal como Grupo Veloz en el pozo COJ-100A y formación Canasí en el resto. En este trabajo se asumirán todas estas secuencias como pertenecientes al Grupo Veloz por ser la formación Canasí una unidad informal, que actualmente se encuentra en estudio ya que no está reconocida en superficie, ni en el léxico estratigráfico del 2013.

Como muchos de los pozos son dirigidos costa afuera para correlacionarlos es necesario tener presente la ubicación espacial de los distintos paquetes,

acuñamientos en distintas direcciones, etcétera. Se empleó el software Petrel (2008) que facilita la visualización tridimensional de datos (Figura 4).

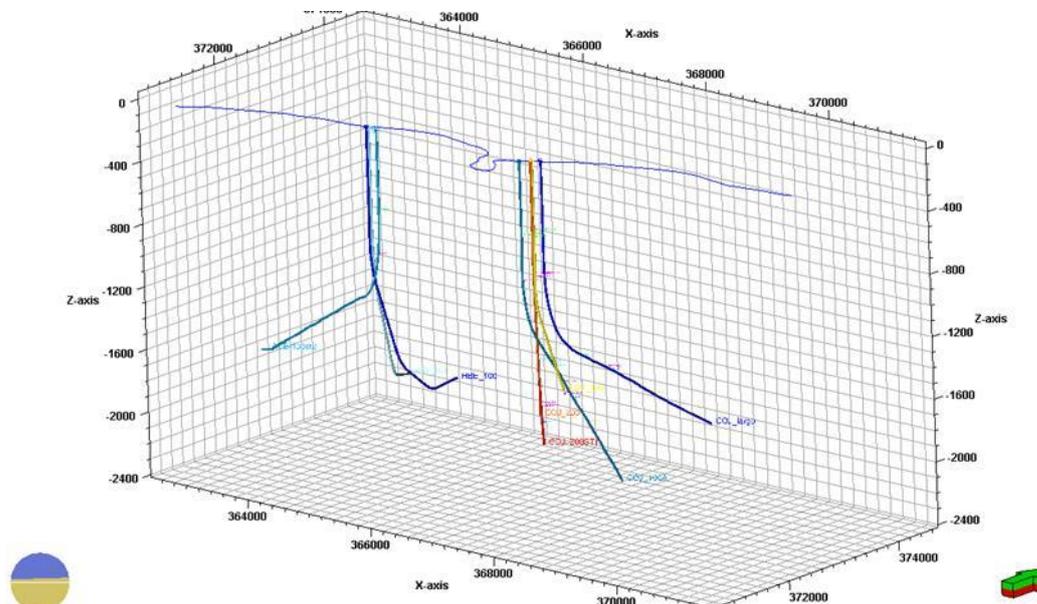


Figura 4. Vista 3D de los pozos estudiados.

El control geológico de los pozos de CUPET tiene un carácter operativo, enfocado en el cumplimiento de un principal objetivo, la obtención de hidrocarburos; esta puede ser la causa principal del poco detalle en el muestreo de secuencias jóvenes o muy someras. Es de destacar, además, que en secciones perforadas en rocas carbonatadas muy porosas y cavernosas del postorogénico se producen fuertes pérdidas de circulación y baja recuperación de cortes (ver pozos Habana del Este).

En todos los casos se comienza perforando carbonatos biogénicos y arrecifales de la formación Jaimanitas, que aflora en toda la zona costera y de manera visible en todas las instalaciones de superficie. Inmediatamente se continúa con calizas cristalinas duras, de aspecto sacaroidal, en parte dolomíticas, color crema claro, asociadas a la formación Güines. Seguidamente se describen calizas arcillosas y calizas fosilíferas de la formación Cojímar con un espesor aproximado de 100-150 m.

El Oligoceno (formación Tinguaro) es solo reconocible en el pozo Cojímar-100A, determinado por la siguiente asociación fosilífera: *Globigerina aff ampliapertura*, *Globorotalia mayeri*, *Hastigerina aequilateralis*, *Globoquadrina dehiscens*, *Globigerinoides ruber*, *Briozoo*, *Valva de Ostrácodo*. En el informe final del pozo se asume edad Oligoceno con probable fauna caída del Mioceno. Aunque parece acuñarse cabe la posibilidad de encontrarse en el resto de los pozos pero el intervalo de muestreo no es detallado en este caso.

En los pozos COJ-200, COJ-100 y COJ-100A se describen rocas asociadas al Grupo Universidad, con un espesor entre 100 m y 120 m. En el pozo COJ-200 se precisa una edad de Eoceno Medio-Superior, formaciones Consuelo y Príncipe. No es posible una división entre ambas. En el pozo COJ-101 no se encuentra fauna paleogénica, sin embargo, por registros geofísicos puede extenderse el mismo paquete de los pozos antes mencionados. El registro Gamma puede usarse como herramienta para la correlación, permitiendo la separación de paquetes litológicos; combinándolo con las descripciones de cuttings y las determinaciones paleontológicas.

La formación Vía Blanca se describe en todos los pozos con un espesor cercano a los 300 m y se caracteriza por un predominio de rocas siliciclásticas, destacándose limolitas, claystone (arcilita), arenisca polimíctica a tobácea. Predominan los colores gris y verde claro. Una amplia asociación fosilífera caracteriza esta secuencia como Cretácico Superior Campaniano-Maastrichtiano.

Rocas del Cinturón Ofiolítico del Norte de Cuba se evidencian en todos los sondeos, describiéndose fundamentalmente serpentinitas muy fracturadas, color verde, gris verdoso y negro, en ocasiones alteradas a minerales arcillosos y con elementos de otras litologías subordinados. Las serpentinitas presentan un reflejo evidente en el registro Gamma, mostrando valores muy bajos y homogéneos (Figura 5).

Litológicamente se describe muy bien el cambio; la ausencia de fauna es otro elemento característico. A continuación se relacionan algunos ejemplos:

- Pozo COJ-100A. En el intervalo de 686-762 m se describe: 10-70 % arenisca polimíctica, de granos medios a gruesos, cemento tobáceo, con buena selección de sus granos, de color gris claro y oscuro, dureza media; 20-40 % arcilla de color gris verdoso, de difícil lavado, no calcárea. A partir de 770 m por litología comienza a aparecer serpentinita de color gris oscuro con tonalidades azulosas, fracturada, dureza media. Serpentinita alterada de color gris claro a verde claro, formando material arcilloso que llega hasta un 50 %. A partir de 762 m se describe hasta un 90-100 % de serpentinitas.
- Pozo COJ-200. En el intervalo 740-760 m se describe: 100 % de serpentinita de color gris oscuro con tonalidades azulosas, fracturada, dureza media. Serpentinita alterada de color gris claro a verde claro.

- Pozo HBE-100. En el intervalo 770-990 m se describe: Predominio en más de un 70 % de serpentinitas muy alteradas; se observan minerales del grupo de la serpentinita (crisotilo). Limolitas y calcarenitas 20 %, margas 10 % (caídas). Se reportan trazas de pedernal blanco amarillento (770 m). Se observa en los 830 m incremento de arcilita limosa con fragmentos o restos de serpentinitas en una matriz arcillosa producto de la alteración de las serpentinitas (grauvacas serpentiniticas con matriz arcillosa producto de su alteración). Esta secuencia presenta característica arenosa limosa, pero se debe tener en cuenta que esta textura puede estar dada por el grado de alteración de las serpentinitas, donde los granos de la misma quedan atrapados en la arcilla producto de su alteración. En este último pozo se incluye un intervalo mayormente serpentinitico (770-1072 m) de 300 m dentro de la formación Vega Alta; el mismo que en los demás fue diferenciado como melange serpentinitico o simplemente serpentinitas.

Otra incoherencia detectada es que se asume en Habana del Este el tope de la formación Vega Alta alrededor de 1 000 m (b.n.m.m) y en Cojímar 700-800 m más abajo, con varias repeticiones o imbricaciones de las serpentinitas con la formación Vía Blanca. La correlación de los paquetes de serpentinitas a lo largo del área puede ayudar en gran medida (Figura 6). Se pueden correlacionar mediante el registro Gamma dos escamas o cuerpos serpentiniticos, litológicamente caracterizados, además, por predominio evidente de serpentinitas. El superior tiene hasta 600 m de espesor aparente y el inferior es de menores proporciones (100 m máximo). El tope de la formación Vega Alta en Habana del Este se ubicó entonces por encima del segundo paquete serpentinitico, mientras que en Cojímar por debajo del mismo (Figuras 3 y 6).

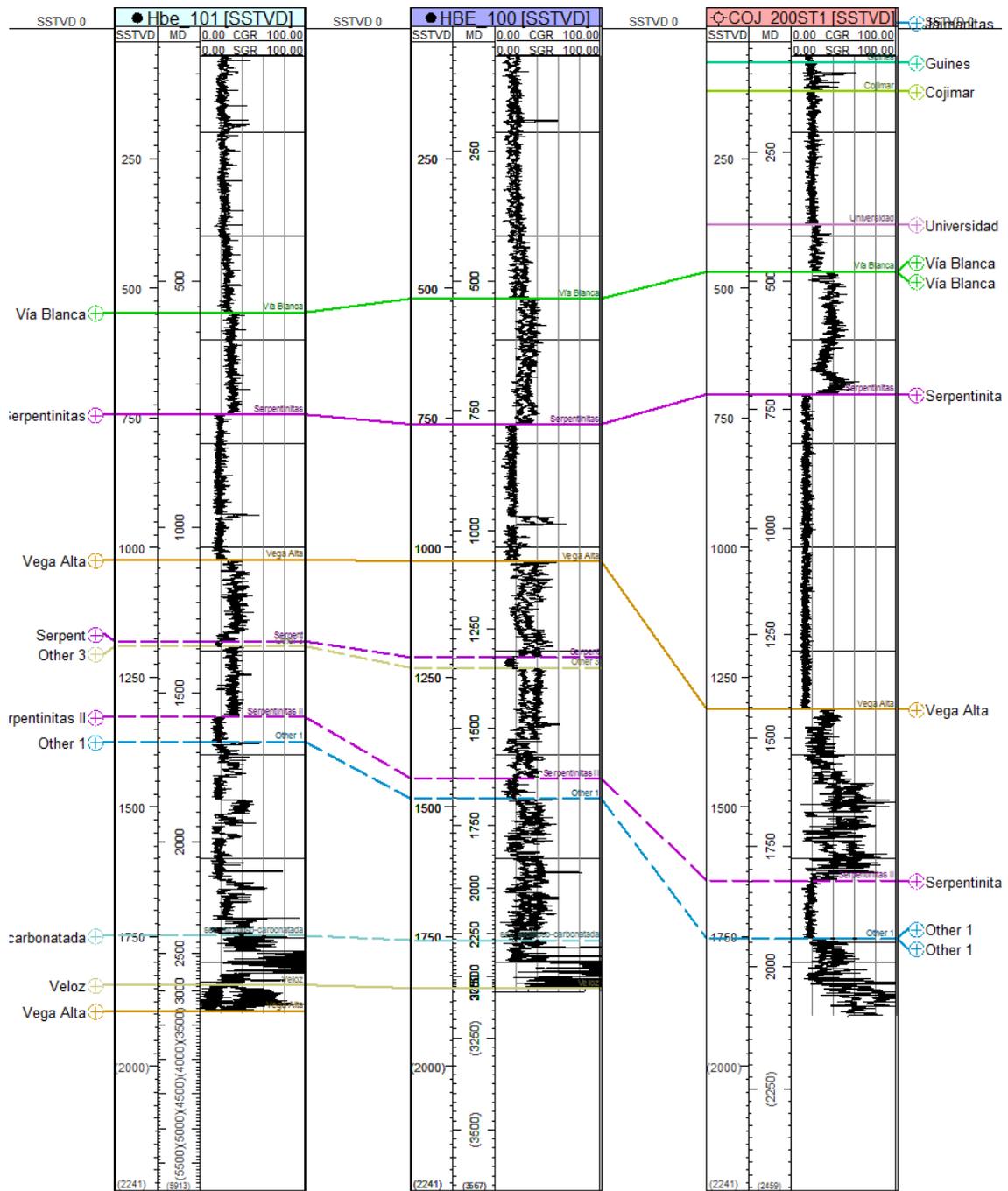


Figura 5. Correlación a partir del registro Gamma. Se distinguen varios paquetes serpentiniticos con una respuesta peculiar en las diagramas.

Para solucionar este problema se revisaron primeramente los argumentos que conducen a definir el tope de la formación Vega Alta en ambos casos y las características de la segunda y tercera escama de la formación Vía Blanca en los pozos Cojímar.

Los geólogos de pozo no cuentan, por lo general, con datos paleontológicos durante el proceso de perforación. De manera empírica se han usado

algunos indicadores de cambio que apuntan a la entrada en secuencias de la formación Vega Alta. Posteriormente se calibra el tope dado por los registros geofísicos y los estudios paleontológicos. Algunos de estos elementos son:

- Aparición de pedernales varicolores y aumento de su proporción de manera progresiva.
- Cambio a una secuencia muy arcillosa que puede traducirse en una disminución considerable de la velocidad de perforación (ROP por sus siglas en inglés).
- Secuencias conglomeráticas con muchos fragmentos de distintos litotipos de calizas (estos fragmentos posteriormente arrojan edades de Cretácico Medio, Jurásico Superior-Neocomiano, Campaniano Maastrichtiano o más joven).
- Si bien es típico encontrar abundante fauna redepositada del Campaniano-Maastrichtiano en la formación Vega Alta, en los pozos de Habana del Este se pudo describir fauna Terciaria. Además, elementos litológicos ajenos a la formación Vía Blanca son descritos desde la base de las serpentinitas:
- Abundante pedernal: Pozo HBE-101. En el intervalo 1 085-1 090 m se describe: 15 % calizas microcristalinas grises, cremas, blancas; 30 % pedernales negros, verde, algunos arcillosos; 40 % claystone gris oscuro poco calcáreo, 10 % limonitas polimícticas de matriz arcillosa gris clara. Más abajo se mantiene la presencia de estos pedernales en un 10 %.

En ambos pozos se describen secuencias conglomeráticas muy carbonatadas y con abundantes fragmentos de serpentinitas.

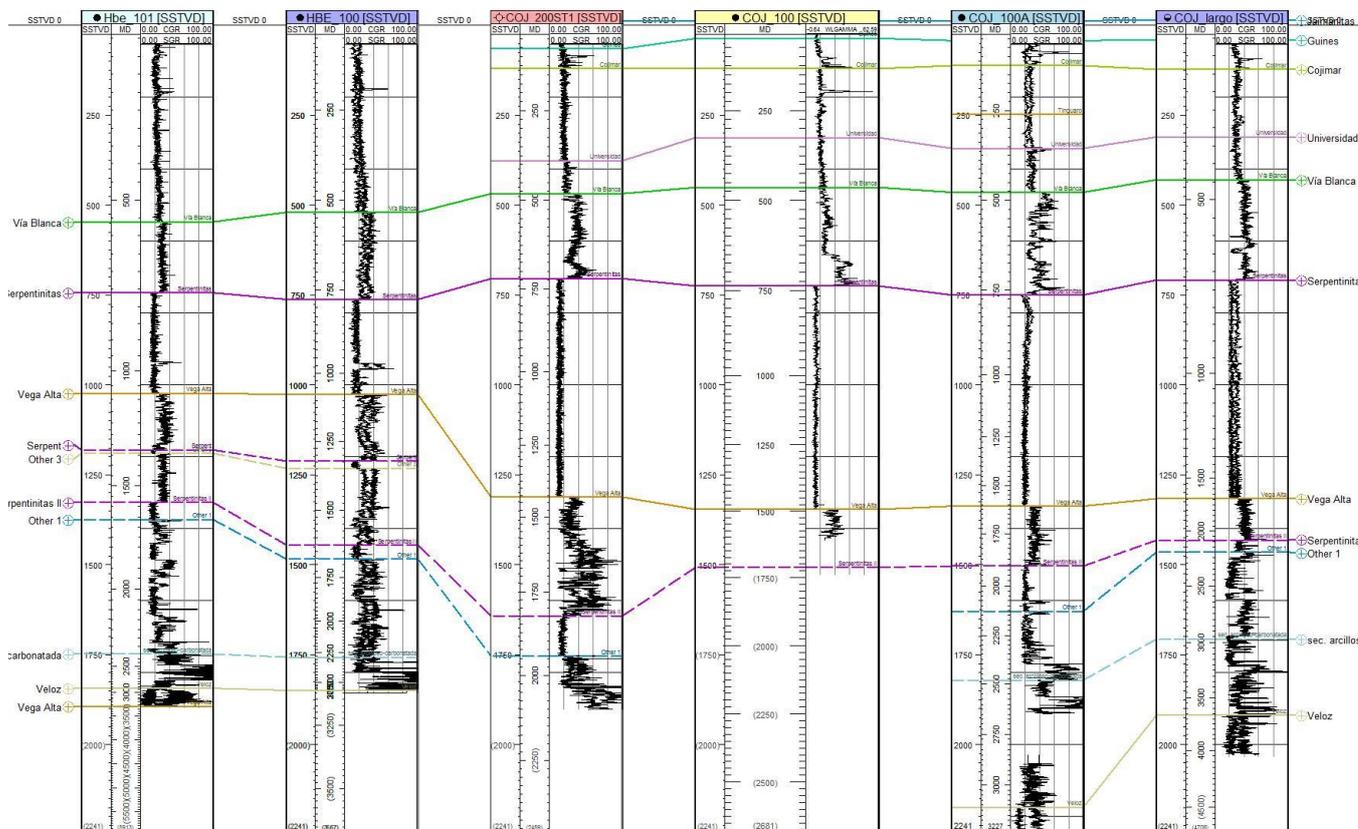


Figura 6. Correlación de paquetes serpentiniticos en los seis pozos estudiados.

Las descripciones apuntan a una secuencia conglomerática polimíctica con predominio de fragmentos de serpentinitas, carbonatos, pedernales, con matriz areno-arcillosa o limosa. En ocasiones puede tratarse de olistostromas como los descritos en innumerables levantamientos de superficie en Cuba Central (formación Vega Alta) y Pinar del Río (formación Manacas). En el ambiente geológico que nos ocupa esto es característico, pues se trata del frente de los cabalgamientos de las rocas del complejo ofiolítico sobre el margen continental de América del Norte (Figura 7).

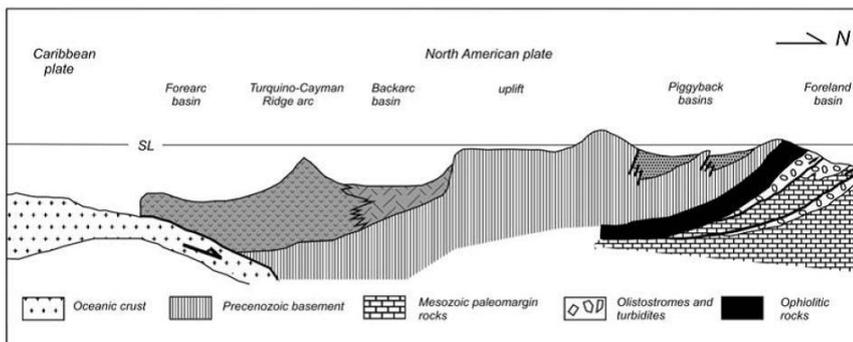


Figura 7. Perfil paleotectónico conceptual del Paleoceno–Eoceno Medio parte baja. (Cobiella–Reguera 2009). Obsérvese en el extremo norte del perfil las secuencias olistostrómicas que asociamos a la formación Vega Alta.

Al analizar los intervalos asumidos como formación Vía Blanca en los pozos de Cojímar por debajo de 1 400 m aparecen dos elementos importantes: ausencia o escasez de determinaciones paleontológicas y descripciones litológicas que se alejan de las típicas de esta formación. Las únicas determinaciones fueron de edad Cretácica, esto pudo influir en gran medida en la división estratigráfica. El pozo COJ-200 cuenta con más determinaciones, en muchos casos parece tratarse de fragmentos de la formación Carmita, por su composición y edad Cretácico Medio. En los trabajos de superficie (Brönnimann y Rigassi 1963; Albear e Iturralde-Vinent 1985) se describen varios tipos de conglomerados con fragmentos de calizas y serpentinitas pero no en tan alta proporción y en ningún caso se describen fragmentos o capas de pedernales.

Por lo antes mencionado, y siguiendo un mismo criterio en todos los pozos, se tomó como tope de la formación Vega Alta la base de las rocas del cinturón ofiolítico, evidenciado por la primera escama. Se asume entonces por debajo de las serpentinitas una secuencia principalmente conglomerática, probablemente hasta olistostrómica. Varios cuerpos menores u olistolitos de serpentinitas pudieran definirse como parte de esta aunque solo uno correlacionable en todos los pozos. La presencia de bloques u olistolitos en la formación Vega Alta es conocida de muchos afloramientos.

Por lo general, cuando se describe la formación Vega Alta en la FNCP se trata principalmente de una secuencia arcillosa (unidad sello), subordinadamente carbonatada, con intercalaciones de variedades de pedernal; pero en muchos casos se excluye la parte olistostrómica, ampliamente desarrollada en superficie (Cuba Central) y que se reconoce también en los pozos estudiados. Si se compara con secuencias similares de Cuba occidental encontramos una gran similitud con la formación Manacas (miembro Olistostroma Vieja y miembro Pica Pica).

Finalmente se correlaciona el reservorio (Grupo Veloz) solo con discretos cambios respecto a los topes originales. Se describen calizas (en un 60-80 % como promedio) color crema, blanco, bandeadas, en secciones delgadas mudstone calcáreo o wackestone; pedernales negros, ámbar y pardos, en menor proporción, así como intercalaciones arcillosas. Es abundante la fauna de edad Jurásico Superior–Neocomiano; se relacionan algunos ejemplos:

Pozo COJ-100A

- 3 145 m: Mudstone calcáreo/wackestone bioclástico finamente recristalizado algo arcilloso. a) *Nannoconus* sl (Jurásico Superior

Titoniano alto - Cretácico Inferior), b) *Nannoconus* sl, calpionélidos radiolarios recristalizados (Jurásico Superior Titoniano alto - Cretácico Inferior Valanginiano).

- 3 165 m: Mudstone calcáreo finamente recristalizado impregnado y piritizado. Nannopláncton calcáreo recristalizados, *Nannoconus* ¿sl (Jurásico Superior Titoniano alto - Cretácico Inferior).
- Pozo HBE-100
- 2 965 m: Packstone intraclástico con matriz carbonatada friable (ab. cocolitos), mudstone calcáreo impregnado. Moldes de radiolarios. Cocolitos abundantes, calpionélidos ss (Jurásico Superior Titoniano alto - Cretácico Inferior Valanginiano).

Pozo HBE-101

- 3 150 m: Mudstone calcáreo recristalizado, impregnado. *Calpionélidos* ss (recristalizados). Tithoniano Superior-Cretácico Inferior, Valanginiano.
- 3 180 m: Wackestone bioclástico. *Calpionélidos* ss (recristalizados). Tithoniano Superior-Cretácico Inferior, Valanginiano.

En la Figura 8 se muestra un ejemplo de registros de imágenes apreciándose las características estructurales del reservorio en el pozo COJ-100A.

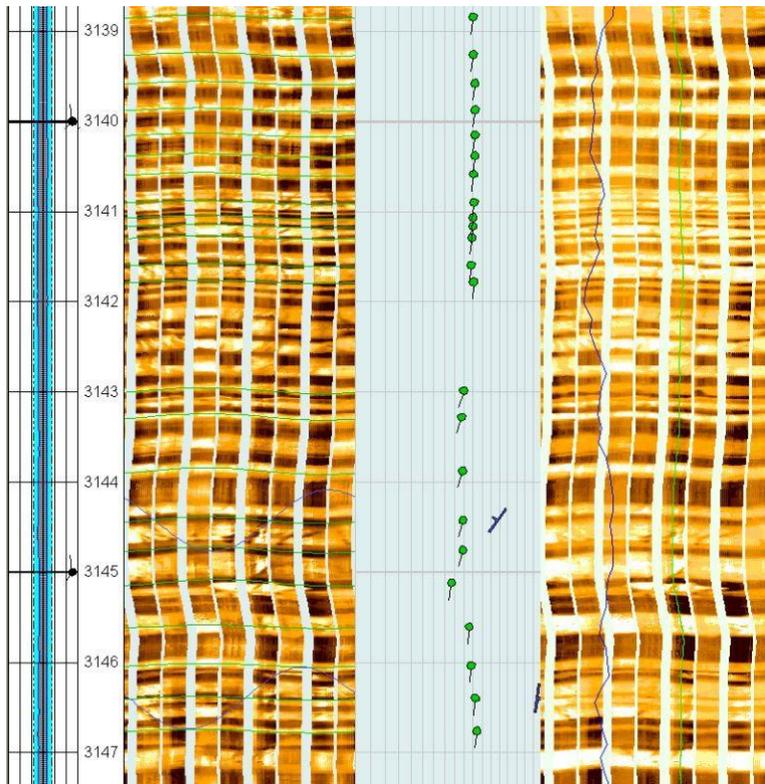


Figura 8. Imagen del registro FMI del pozo COJ-100A. Se aprecian capas estratificadas (10-20 cm de espesor) buzando al S-SW.

El reservorio principal del área de estudio es precisamente el Grupo Veloz y se caracteriza como un colector carbonatado, fracturado-poroso.

Después de este análisis se redefinen los topes en cada pozo y se obtiene una correlación de toda el área estudiada (Figura 9). Además de una columna geológica generalizada del sector Morro-Bacuranao (Figura 10).

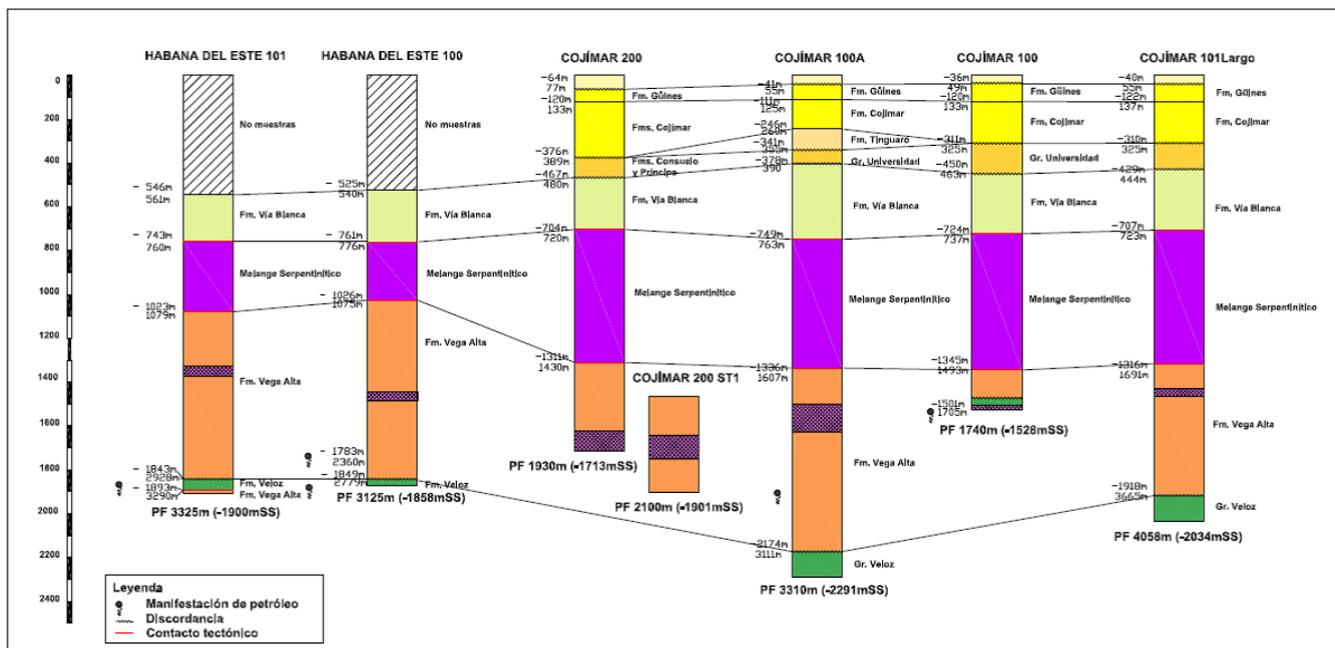


Figura 9. Esquema de correlación final de los pozos estudiados.

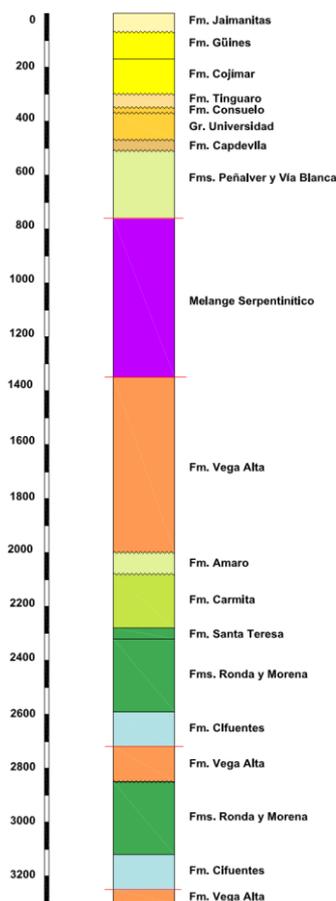


Figura 10. Columna geológica generalizada del sector Morro-Bacuranao.

4. CONCLUSIONES

- Como resultado del estudio detallado de los pozos en La Cabaña, Habana del Este y Cojímar se obtuvo una nueva división del corte estratigráfico en cada uno de ellos y se observó que existe una estrecha correlación entre los pozos estudiados.
- Las unidades estratigráficas observadas en el subsuelo mostraron características muy similares a las descritas en superficie.
- El Oligoceno representado por la formación Tinguaro se determinó solamente en el pozo Cojímar – 100A por lo que no se descarta que a partir de un muestreo de mayor detalle se pueda establecer una continuidad con el resto de los pozos.
- Se determinó la existencia del melange serpentínicos en el pozo HBE-100, en el intervalo de 770 m a 1 072 m, por datos litológicos y registros geofísicos, logrando correlacionarlo con el resto de los pozos estudiados.
- Se concluyó que en este sector el reservorio es de tipo Grupo Veloz por ser una secuencia carbonatada donde predominan los mudstone calcáreo y por tener una edad Jurásico Superior Tithoniano Superior-Cretácico Inferior.
- Se establecen las secuencias o formaciones presentes con mayor exactitud a partir del reestudio de los datos primarios, informes y muestras, lo que conllevó a la realización de una columna geológica generalizada para el área de estudio.

5. REFERENCIAS

- ALBEAR, J. F. & ITURRALDE-VINENT, M. 1985: Estratigrafía de las provincias de La Habana. En: *Contribución a la Geología de las provincias de La Habana y Ciudad de La Habana*. Científico Técnica, La Habana, 12-54.
- BLANCO-BUSTAMANTE S.; BREY DEL REY, D.; CASTRO- CASTIÑEIRAS, O. & PÉREZ-ESTRADA, L. 2007: Consideraciones faciales de la formación Amaro en el yacimiento de Boca de Jaruco. En: II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Memorias. La Habana, Cuba.
- Brey-Del Rey, D.; Blanco, S.; Aguilar, A.; Gil-González, S.; García-Delgado, D.; Pérez, L.; Morales, C.; Medina, A.; Flores, A.; Castro, O.; Rodríguez, M.; Villavicencio, B.; Sotolongo, A.; Rodríguez-Loeches, J.; Mejías, L.; Perera, C.; Menéndez, L.; Laguardia, R. & Lazcano-Véliz, Y. 2008: Proyecto 2801: Sedimentos sinorogénicos asociados a la Franja Norte de Cuba y su relación con los sellos y reservorios - Etapa 1: Estudiar, precisar y definir los cambios litofaciales y biofaciales de los diferentes

- sedimentos sinorogénicos de la Franja Norte de Cuba y sus características como sello y reservorio. Archivo técnico CEINPET. La Habana, Cuba (Versión digital).
- BRÖNNIMANN, P. & RIGASSI, D. 1963: Contribution to the geology and paleontology of the area of the city of La Habana, Cuba and its surroundings. *Eclogae Geologicae Helveticae* 56(1): 193-430.
- COBIELLA-REGUERA, J. L. 2009: Emplacement of the northern ophiolites of Cuba and the Campanean-Eocene geological history of the northwestern Caribbean-SE Gulf of Mexico region. *Geological Society, London, Special Publication* 328 (1): 315-338.
- García-Delgado, D.; Delgado, R.; Millán, G.; Rojas, Y.; Peñalver, L.; Cabrera, M.; Padilla, I.; Díaz, C.; Torres, A.; Furrázola, G.; Llanes, A.; Torres, M.; Pérez, R.; Bernal, L.; Morales, R.; Pérez, C.; Stracevich, V.; Pérez, R.; García, I.; Batista, R.; Rodríguez, L.; Triff, J. & Ugalde, C. 2001: Informe proyecto 216: Generalización y actualización geológica de la región Habana–Matanzas. Escala 1: 100 000. Archivo técnico CEINPET. La Habana, Cuba (Versión digital).
- GARCÍA-DELGADO, D. E.; PÉREZ-ESTRADA, L.; BLANCO-BUSTAMANTE, S. & GARCÍA, Y. 2011: La formación Vega Alta en la región occidental de Villa Clara, correlación con el sello de la Franja Norte de Crudos Pesados. En: IX Congreso Cubano de Geología. Memorias. La Habana, Cuba.
- GIL-GONZÁLEZ, S.; ECHEVERRÍA-HERNÁNDEZ, B.; TORRES-SILVA, A. I. & GARCÍA-DELGADO, D. 1998: Estudio cuantitativo de la composición bioclástica de los depósitos del Maastrichtiano Superior de la Sierra del Rosario, Cuba Occidental. En: Geología y Minería '98. Memorias. La Habana, Cuba, 301-303.
- GIL-GONZÁLEZ, S.; GARCÍA-DELGADO, D. & DÍAZ-OTERO, C. 2009: Formaciones del Maastrichtiano Superior en Cuba Occidental y Central. Composición bioclástica y litofacies. En: III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Memorias. La Habana, Cuba.
- VALLADARES, S.; GARCÍA, R. & BREY, D. 1997: Reservorios carbonatados pertenecientes a las unidades tectonoestratigráficas. Placetes. Etapa I. Archivo técnico CEINPET. La Habana, Cuba.

Yaimeli Almaguer Alvarez. yaimeli@ceinpet.cupet.cu
Máster en Ciencias. Geóloga y Sedimentóloga.
Centro de investigación del petróleo, La Habana, Cuba

Raydel Toyrac Proenza. toirac@ceinpet.cupet.cu
Ingeniero Geólogo.
Centro de investigación del petróleo, La Habana, Cuba,

Santa Gil Gonzáles. Colaborador Externo.

Escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por sismos de gran magnitud en Santiago de Cuba

Liuska Fernández-Diéguez
Rafael Guardado-Lacaba
Isabel Herrera-Delfín
Ricardo Oliva-Álvarez
Pedro Díaz-Santo

Resumen

El propósito fue obtener, para el Consejo Popular Guillermon Moncada del municipio de Santiago de Cuba, la zonación del potencial de licuefacción de los suelos; para ello se evaluaron las condiciones ingeniero-geológicas y las particularidades sísmicas que propician este fenómeno. Se calculó el factor de seguridad corregido después de determinar las intensidades máximas posibles, a partir de magnitudes sísmicas que puedan provocar licuefacción en el área de estudio. Se obtuvo como resultado el esquema de susceptibilidad a la licuefacción, a partir del cual se concluye que los sectores de mayor susceptibilidad a la ocurrencia de licuefacción ante sismos de magnitudes entre 7 y 8 se ubican hacia el centro-este del Consejo Popular, donde predominan los suelos arenarcillosos. Este resultado es de gran utilidad para la ubicación y planificación de obras ingenieriles en el área.

Palabras clave: licuefacción del suelo; ingeniería geológica; ordenamiento urbano; sismos; Santiago de Cuba.

Scenarios susceptible to induced liquefaction caused by high magnitude earthquakes in Santiago de Cuba

Abstract

The objective of this investigation was to define the zoning of soil liquefaction potential for the Guiller món Moncada Popular Council in the municipality of Santiago de Cuba. The engineering and geological conditions and seismic peculiarities favoring a seism to take place were assessed. The safety factor was re-calculated after determining possible maximum intensity values based on seismic magnitudes that can trigger the soil of the investigated area to liquefy. A scheme of the area's soil susceptibility to liquefaction was obtained. Based on this result, it was concluded that the sectors that are most likely to experience soil liquefaction if an earthquake of magnitudes ranging between 7,75 and 8 occurs are located towards the center-east of the Popular Council with sandy-clayey soils being predominant. This information is very useful for the location and planning of engineering construction works in the area.

Keywords: soil liquefaction; geological engineering; urban planning; Santiago de Cuba.

1. INTRODUCCIÓN

La sismicidad es uno de los fenómenos naturales que más ha preocupado a la humanidad a través del tiempo, pues aún no se dispone de un mecanismo predictivo que permita alertarnos ante la inminencia de un terremoto. Por otra parte, el planeamiento territorial y urbano precisa de estudios del riesgo sísmico para conocer el comportamiento del terreno ante los efectos destructivos de un terremoto de gran magnitud. La pérdida de la firmeza o rigidez del suelo que provocan los movimientos sísmicos es la responsable del desplome de edificaciones, deslizamientos de tierra, daños en las tuberías, entre otros.

La licuefacción del suelo inducida por terremotos es uno de los principales contribuyentes al riesgo sísmico urbano. El término licuefacción incluye todos los fenómenos donde se dan excesivas deformaciones o movimientos como resultado de transitorias o repetidas perturbaciones de suelos saturados poco cohesivos (Perucca, Pérez & Navarro 2006).

Los suelos licuables son aquellos con contenido areno-limoso, en estado saturado, que al experimentar esfuerzos cortantes anómalos y rápidos permiten un aumento de las presiones intersticiales (por falta de drenaje), en los que la resistencia al corte desaparece y el material se comporta como un líquido, dando lugar a movimientos verticales y horizontales de su masa que se traducen en deslizamientos o en grandes asientos (Vallejo 2002).

Las investigaciones sismológicas sitúan a Santiago de Cuba (Figura 1) como la región de mayor peligro sísmico del territorio nacional. Más del 60 % de los sismos perceptibles y fuertes reportados en Cuba han tenido su epicentro en territorio santiaguero, el que ha sido sacudido por más de mil sismos perceptibles desde el año 1528 hasta hoy (Álvarez, Chuy & Cotilla 1991; Chuy 2010). Los terremotos del 3 de febrero de 1932 y el 8 de agosto de 1947 reportaron serios daños en la ciudad, fundamentalmente en los alrededores de la bahía.

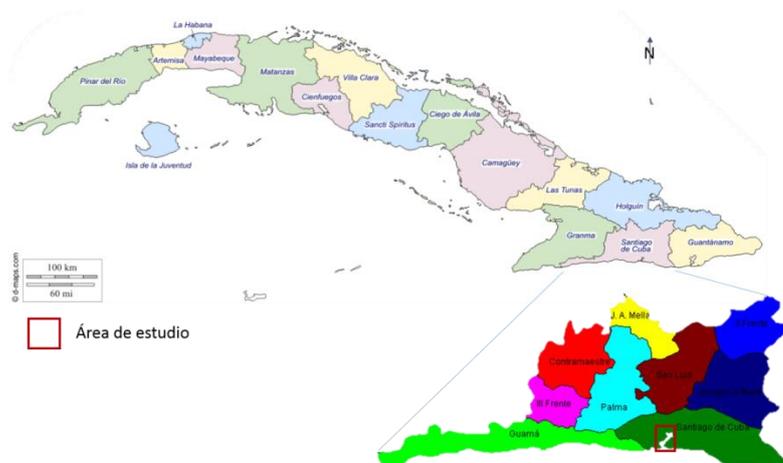


Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Santiago de Cuba.

1.1. Características sismológicas de la región

La falla Oriente y la falla Norte de la Española constituyen las principales fallas activas de primer orden donde pueden ocurrir sismos fuertes que afectan el territorio oriental de Cuba. Con estas estructuras se relaciona la principal actividad sísmica registrada en esta región, tanto en magnitud como en frecuencia. La Figura 2 ilustra la sismicidad registrada instrumentalmente por tres o más estaciones para la región oriental de Cuba, desde el año 1967 hasta agosto de 2014.

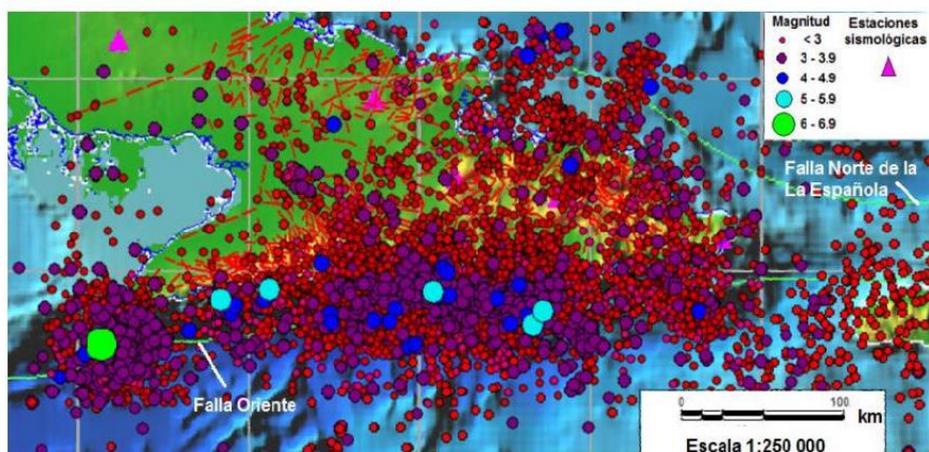


Figura 2. Terremotos registrados por el Servicio Sismológico Nacional de Cuba desde 1967 hasta agosto de 2014 en la región oriental de Cuba. Fuente: Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS).

El registro histórico de la ocurrencia en la región oriental de Cuba de terremotos de magnitud mayor de 5, desde el año 1900 hasta la fecha, aparece en la Figura 3. Para esta parte del país se ha establecido un ciclo sísmico de terremotos fuertes de entre 80 y 100 años, aproximadamente; esto significa que un sismo fuerte en esta región puede ocurrir en cualquier

momento, debido a la energía acumulada desde los últimos sismos ocurridos en la primera mitad del siglo XX (Guasch & Oliva 2014).

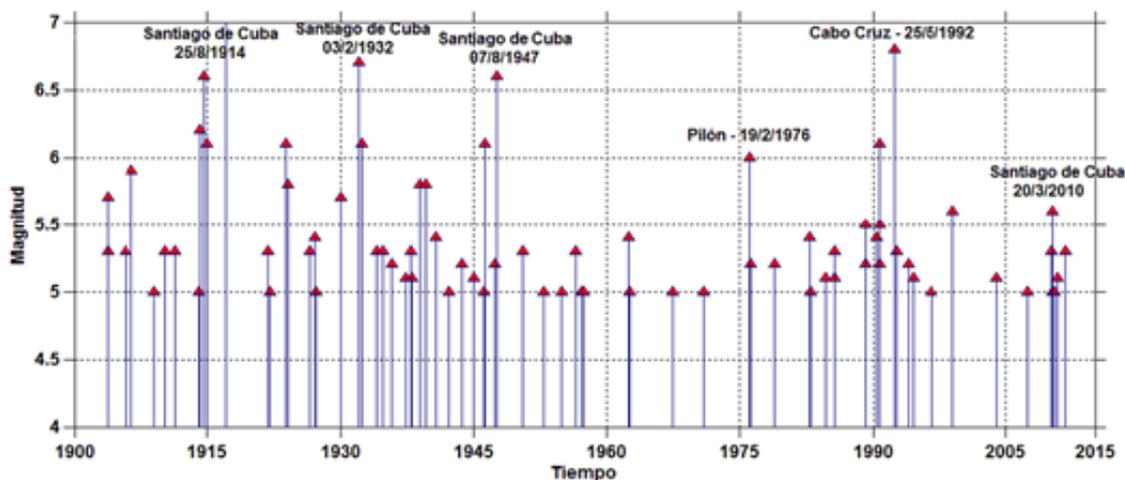


Figura 3. Terremotos de magnitud mayor de 5 reportados en la región suroriental de Cuba desde 1900. Fuente: CENAIS.

En particular, para la provincia de Santiago de Cuba predomina el tipo de sismicidad conocida como de "entre placas", vinculada a la estructura de Bartlett-Caimán (Zona Sismogénica Oriente), por la frecuencia de los terremotos y los valores altos de magnitud e intensidad alcanzados históricamente. Más del 60 % de los sismos perceptibles y fuertes reportados en el territorio nacional han tenido su epicentro en esta provincia. Por estas razones, este territorio es considerado el de mayor peligrosidad sísmica del país, reportándose 20 terremotos fuertes (Intensidad I MSK $\geq 7,0$) en el sector comprendido entre las localidades de Chivirico a Baconao.

El Consejo Popular Guiller món Moncada fue elegido para el estudio porque en este se encuentran las zonas de la bahía y de la alameda, donde existen reportes de ocurrencia de licuefacción tras el sismo de 1932.

A partir de los antecedentes expuestos surge la necesidad de este trabajo, el cual tiene como objetivo evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por terremotos de gran magnitud para zonificar el potencial de licuefacción en el área antes mencionada.

1.2. Contexto geológico

La geología del área está representada por sedimentos cuaternarios recientes que descansan sobre sedimentos de origen marino sedimentario. Dentro del Neógeno se encuentra un grupo de formaciones sedimentarias, fundamentalmente carbonatadas, representadas por la formación La Cruz

(periferia de la bahía de Santiago de Cuba), formación San Luis, formación Camarones y otras predominantemente terrígenas, como la formación Puerto Boniato.

Las formaciones más recientes, predominantemente sedimentarias, pertenecen al Cuaternario y se desarrollan en forma discontinua en pequeñas áreas de la cuenca de Santiago de Cuba; están representadas por las formaciones Camaroncito y Maya, donde se desarrollan depósitos arrecifales que alternan con episodios de intenso aporte de materiales clásticos terrígenos (Carrillo *et al.* 2009, citado por Herrera 2015).

1.3. Factores condicionantes de la licuefacción

La sobresaturación de los suelos es un fenómeno común en algunas zonas dentro del área de estudio. En esta situación influyen las corrientes de agua subterránea que existen, por ejemplo, en los alrededores de la bahía de Santiago de Cuba, en las cercanías de los valles aluviales de los ríos del municipio de Santiago de Cuba. Este es un factor que, junto al tipo de litología que presentan estas áreas (depósitos aluviales, palustres y rocas sedimentarias de baja cohesión), incrementa los efectos de los deslizamientos sobre las infraestructuras ubicadas en estas locaciones.

Cuando se analizan los factores que condicionan la licuefacción, entre los que se encuentran la distribución del tamaño de los granos, profundidad de las aguas subterráneas, densidad, peso del recubrimiento y profundidad del suelo, amplitud y duración de la vibración del terreno, edad del depósito y origen del suelo se apreció la coincidencia en varios aspectos.

En la cuenca de Santiago de Cuba aparecen en las formaciones más recientes los depósitos marinos, arenas, guijarros de playas y bancos de tormenta (m Q1v) y otros depósitos de tipo aluvial (al Q1v), compuestos por limo gris y pardusco, limos arenosos y arcillas arenosas (Herrera 2015).

Un criterio que se tuvo en cuenta fue la cercanía a una zona sismogeneradora, la probabilidad de ocurrencia y período de recurrencia de un sismo fuerte, la sismicidad del área y las posibles amplificaciones de las aceleraciones sísmicas dado el efecto de sitio. El escenario propuesto está cerca de depósitos fluviales y deltaicos, además, hay pequeña representación de depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, aunque estos no son tan susceptibles como en los casos antes mencionados.

Los suelos se encuentran semisaturados y saturados dado la poca profundidad del nivel freático. Las áreas que se estudiaron pertenecen a formaciones del Cuaternario y en algunos casos al Holoceno, donde los

estratos son poco consolidados y de poca densidad. Se tuvo en cuenta que los depósitos fueran de arena arcillosa, arena limosa, entre otras, con poco contenido de finos que estuvieran uniformemente gradadas y limpias, compuestas de partículas redondeadas preferiblemente. Se analizó que fueran muelles, tierra recuperada, canal de río abandonado, relleno sobre pantano o ciénaga o relleno de tierra recuperada por drenaje.

Conforme a los perfiles realizados se pudo determinar la presencia de las capas siguientes:

Relleno (R): Relleno muy heterogéneo, compuesto por una arena limosa con gravas: 34 % de arena de grano medio; 28 % de gravas de diámetro predominante entre 2,0 mm y 4,0 mm, duras, subredondeadas, con restos de ladrillos, algo húmedo, compacidad baja, color carmelita. Espesor de 2,25; 1,80 y 1,10 m en las calas de todas las obras, respectivamente.

Capa 1: Compuesta por arena arcillosa con grava (SC) de grano medio, 58 % de finos, LL = 67 %, IP = 41 %; 34 % de arena de granos medios a finos; 8 % de gravas finas, subredondeadas; húmeda, color carmelita, de origen aluvial. Su espesor total varía de 5,95 m a 7,75 m en el perfil I—Í y de 5 m a 10,35 m en el perfil II—ÍÍ (Figura 6).

Capa 2: Compuesta por arcilla muy plástica gravosa con arena (CH), 52 % de arena de granos finos a medios; 32 % de finos, LL = 45 %, IP = 23 %; 16 % de gravas de granos finos a medios subredondeadas; compacidad alta, poco húmeda, color carmelita, de origen aluvial. Su espesor total es mayor a la profundidad de investigación ejecutada.

Con ayuda de los datos y características citadas anteriormente se realizó la representación del corte litológico del área de estudio.

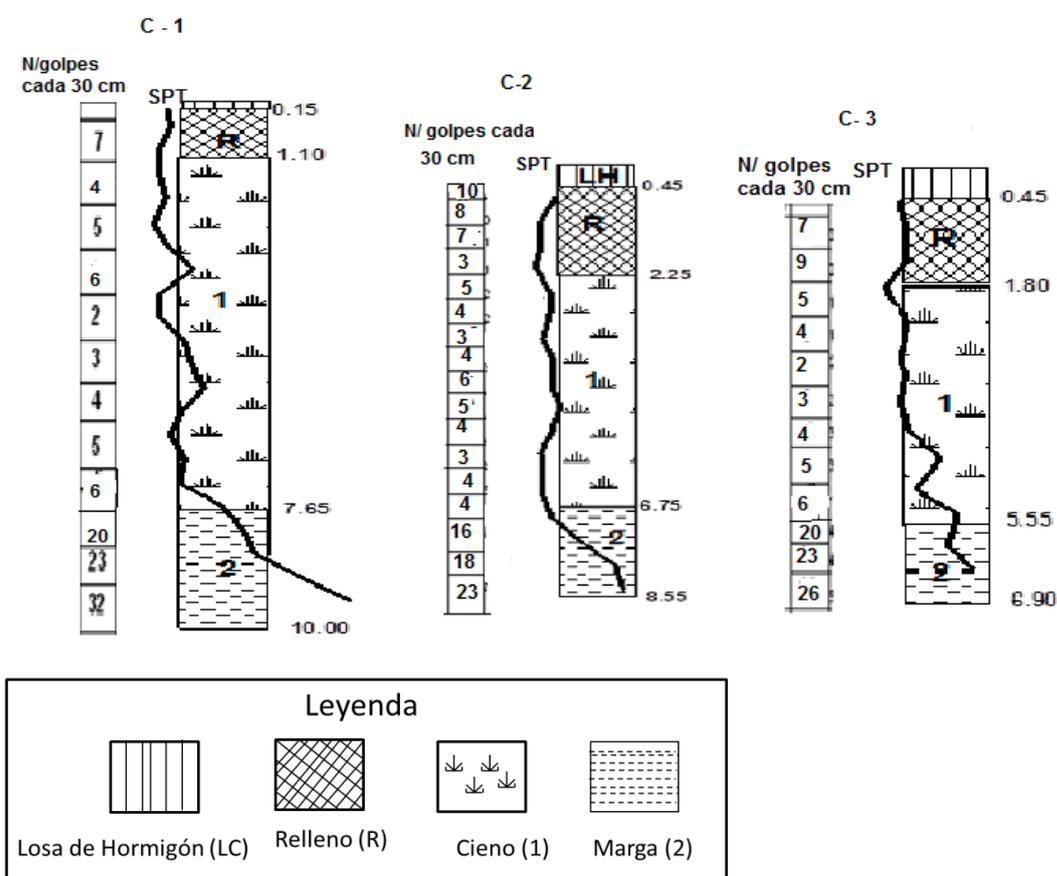


Figura 4. Representación del corte litológico del área de estudio.

2. MATERIAL Y MÉTODO

Para realizar el estudio de los suelos susceptibles a licuar se revisaron 87 informes de las obras realizados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Santiago de Cuba. Se utilizaron los datos de 14 investigaciones, en las cuales se realizaron 54 calas.

Para el estudio de las condiciones ingeniero-geológicas se confeccionó la tabla resumen con algunas propiedades entre las que se encuentran: porcentaje de grava (Gr), porcentaje de arena (Ar), porcentaje de finos (Fi), límite líquido (LL), límite plástico (LP), índice de plasticidad, humedad natural (W), densidad húmeda (γ_f), densidad seca (γ_d), porcentaje de saturación (S), peso específico y prueba estándar de penetración. Las obras se realizaron a partir de la base cartográfica 1:25 000.

2.1. Análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio

En la cuenca de Santiago de Cuba aparecen diferentes litotipos, lo que permitió la determinación del nivel freático con más facilidad, partiendo de la observación del mismo, cuando se realizaron las perforaciones en el área

de estudio. Se ejecutaron cuatro calas para estudios hidrogeológicos, para un total de 20,70 m de perforados. Las mismas fueron ejecutadas con una máquina perforadora MARK V de fabricación británica por los métodos a percusión y rotario. Las demás se obtuvieron a partir de los antecedentes de investigación de las obras emplazadas en el área (Tabla 1).

Tabla 1. Comportamiento promedio del nivel freático por tipo de suelos.

Clasificación tipo de suelo SUCS	Nivel freático promedio (m)
CH	1,86
SC	1,28
OL-OH	1,17

2.2. Confección del esquema ingeniero-geológico

Para la confección del esquema ingeniero-geológico se utilizaron las propiedades físico-mecánicas de los suelos y su distribución en el área de estudio. En el mismo se ubicaron las obras de referencia, utilizando de ellas datos de calas como profundidad, espesor de las capas encontradas, entre otros.

El esquema se realizó a partir de la distribución de los tipos de suelo (según SUCS) documentados en las calas para cada obra y del comportamiento de las propiedades físico-mecánicas (Figura 6).

2.3. Clasificación ingeniero-geológica del suelo del área de estudio.

Para establecer las propiedades físico-mecánicas fundamentales de cada uno de los materiales presentes en la zona de estudio se utilizaron los datos contenidos en informes geotécnicos. Los resultados de la toma de muestras *in situ* y su posterior análisis en el laboratorio, los que se han organizados en una base de datos. De esta clasificación se puede concluir que los suelos existentes en el área son sedimentos recientes del cuaternario, clasificados por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como: arena arcillosa con gravas **SC**, arcilla muy plástica **CH**, limo orgánico **OH**, arcilla orgánica **OL**. Estos suelos presentan un alto grado de saturación, humedad natural elevada, alto porcentaje de finos y límites de Atterberg; algunos de ellos favorables para que ocurra licuefacción. Los niveles freáticos oscilan entre 1 m y 1,90 m, sin tomar en cuenta las fluctuaciones de las mareas.

Para la confección del esquema de susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en el área de estudio se utilizaron los resultados del factor de seguridad corregido, el cual lleva implícito el análisis de las propiedades físico-mecánicas del suelo y el análisis del nivel freático.

2.4. Metodologías usadas para la determinación del potencial de licuefacción

En la actualidad se presentan en las publicaciones científicas diversas metodologías (Seed & Lee 1966; Seed & Idriss 1971; Seed, Idriss & Arango 1983; Tokimatsu & Yoshimi 1983; Alcocer *et al.* 1994; Youd *et al.* 2001; González-Labbe 2011) para cuantificar la licuación de los suelos resultantes de acciones dinámicas (sísmicas). En los últimos 20 años algunas de estas metodologías han sido empleadas en Cuba de forma integral, parcial o combinadas; algunos ejemplos lo constituyen los trabajos de Zapata (1996), González y Pérez (2000), Vázquez (2005) y Ordaz-Hernández y demás investigadores (2013).

Hay que destacar dos enfoques importantes para evaluar el potencial de licuefacción de suelos granulares sujeto a movimientos sísmicos:

Métodos empíricos: Basado en observaciones *in situ* del comportamiento de depósitos tipo arena durante movimientos sísmicos anteriores y correlaciones entre predios que no se han licuado y densidad relativa del número de golpes de ensayos SPT.

Métodos analíticos: Basados en la determinación en laboratorio de las características de resistencia a la licuefacción de muestras no alteradas y el uso de análisis de respuestas dinámica del predio para determinar la magnitud de las tensiones de corte inducidas por los movimientos sísmicos.

El análisis del potencial de licuefacción en este estudio sigue procedimientos basados en la determinación de la razón de esfuerzos cíclicos (CSR). Esta razón CSR depende directamente de la máxima aceleración horizontal en el sitio; lo cual motivó a un análisis de microzonificación sísmica del área, a fin de obtener un mejor estimado de este parámetro. Como resultado de este análisis se espera definir los estratos que son potencialmente licuables.

Enfoque de resistencia cíclica (CRR)

Para ello, Seed y Idriss (1971), Tokimatsu y Yoshimi (1983), Liao y Whitman (1989), entre otros investigadores, han elaborado, a partir de datos obtenidos en campo mediante ensayos de penetración estándar (SPT, por sus siglas en inglés), gráficas sobre la relación entre dos parámetros físicos que participan en la licuefacción de los suelos; estos son el coeficiente resistencia cíclica (CRR, siglas en inglés) y $(N_1)_{60}$, es decir el número de golpes suministrado al terreno, representado también por la letra N en las fórmulas.

$(N_1)_{60} = (N1)60 =$ El número de golpes de la prueba SPT normalizada a un esfuerzo geostático de 100 KPa y a la energía del martillo de 60 %.

CRR = La relación de resistencia cíclica para un sismo de diseño (magnitud 7,5)

$$CRR = \frac{1}{34 - N} + \frac{N}{13.5} + \frac{50}{[10N + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

Esta ecuación es válida para los (N1) $60 < 30$. Para (N1) $60 \geq 30$ los suelos granulares limpios tienen el grado de compacidad demasiado alto para sufrir la licuefacción.

Enfoque de esfuerzo cíclico (CSR)

Es un principio generalmente aceptado que el potencial de licuefacción de estratos arenosos puede evaluarse utilizando correlaciones entre datos de resistencia a la penetración, tales como ensayos de penetración estándar (SPT) y ensayos de penetración con cono (CPT) y la resistencia cíclica del material movilizado durante una fuerte de excitación vibratoria.

En este enfoque, la resistencia cíclica es caracterizada por la relación de esfuerzo cíclico (CSR). Básicamente, la CSR se define como el esfuerzo cortante promedio (ζ_{avg}) actuante en un estrato, normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga (σ'_{vo}).

El estudio de licuefacción aplicado en el área de investigación se basa en la correlación de esfuerzos desarrollada originalmente por Seed y Idriss (1971, 1982), modificada por Robertson y Wride (1998). De acuerdo con estos autores, la CSR es una función de la duración del terremoto (representada por la magnitud del momento M_w), la aceleración horizontal máxima (representada por la aceleración pico del suelo normalizada por la aceleración de la gravedad, a_{max}/g), la profundidad del depósito granular (representada por el coeficiente de reducción del esfuerzo, rd) y el esfuerzo vertical total normalizado (la relación entre el esfuerzo efectivo total actuando sobre el estrato, σ_{vo}/σ'_{vo}). El CSR se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CSR = 0.65 (a_{max}/g) (\sigma_{vo}/\sigma'_{vo}) rd$$

Donde:

CSR: esfuerzos cíclicos y depende directamente de la máxima aceleración horizontal en el sitio;

a_{max} : aceleraciones máximas generadas por un sismo de diseño;

σ_{vo} : esfuerzo normal vertical total, referido a la superficie del suelo;

σ'_{vo} : esfuerzo normal vertical efectivo, referido a la superficie del suelo;

rd: coeficiente de reducción del suelo, que toma en cuenta la deformabilidad del perfil de subsuelo. Liao y Witman (1986) sugieren, para la práctica de ingeniería rutinaria, en proyectos no críticos, utilizar las siguientes ecuaciones para estimar el rd:

z: profundidad por debajo de la superficie del suelo en m.

Para $z \leq 9,15$ m $rd = 1,0 - 0,00765 z$

Para $9,15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m}$ $rd = 1,174 - 0,0267 z$

El cálculo del factor de seguridad en el área se realizará utilizando las propiedades físico-mecánicas del suelo (densidades húmedas, pesos específicos, etc.) y las aceleraciones máximas de las diferentes magnitudes para los sismos de diseño.

El factor de seguridad corregido se calcula por la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} MSF$$

Donde:

MSF: Factor de escala de acuerdo con la magnitud de sismo y se calcula por la siguiente ecuación:

$$MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56}$$

Mw: Magnitud del sismo de diseño.

La mayoría de los datos (casos conocidos donde se sabe si hubo o no licuefacción) utilizados en el desarrollo de las correlaciones están asociados a sismos de magnitudes cercanas a 7,5; de manera que las curvas que se obtuvieron representan sismos de esa magnitud; pero también existen datos con otras magnitudes, los cuales pueden ser utilizados en estas correlaciones si se divide la razón de tensiones inducida por el sismo de magnitud M, por el factor de corrección propuesto por Idriss (2000), tomado de Henríquez-Pantaleón (2007), el cual se presenta en la Figura 5, de manera de obtener la razón de tensiones correspondiente a un sismo de magnitud 7,5.

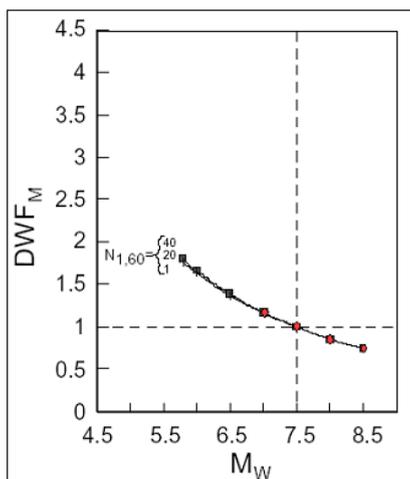


Figura 5. Factores de escala por magnitud del sismo en función de $N_{1,60}$. M_w : magnitud del sismo de diseño. DWF_M : factor por magnitud de sismo. Fuente: Henríquez-Pantaleón (2007).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 6 se presenta el esquema ingeniero-geológico de los suelos del área de estudio. Los suelos blandos presentan un comportamiento común en cuanto al contenido de humedad $>$ al 30 %, densidades secas $<$ 13,50 kN/m³, con pesos específicos que oscilan en el rango de 26,60 kN/m³ a 27,00 kN/m³ y resistencia a la penetración dinámica de 4 a 6 golpes por cada 30 cm de penetración (SPT).

Desde el punto de vista de clasificación de suelos la diferencia radica en que varían espacialmente de forma aleatoria entre una arcilla muy plástica con arena (CH) a una arena arcillosa con gravas (SC), predominando los suelos tipo arcilla muy plástica (CH) en dirección norte, hacia el centro-este los suelos tipo arena arcillosa con grava (SC) y en el sur los suelos tipo limo orgánico a arcilla orgánica (OL-OH). Dada las características descritas anteriormente la capacidad resistente de los suelos SC es baja ante determinadas cargas impuestas, por lo que se puede decir que son suelos proclives a la licuefacción.

El Consejo Popular presenta alto riesgo sísmico, con probabilidad de que ocurran daños en las edificaciones ante eventos de media a alta magnitud. Se debe destacar que las obras se emplazan sobre una zona de falla, las aguas subterráneas afectan los niveles de cimentación con niveles freáticos poco profundos, lo cual favorece el incremento del grado sísmico.

El fenómeno físico-geológico más importante está representado por la pérdida de la capacidad soportante del relleno de piso a causa de la yacencia somera de las aguas subterráneas las que, durante periodos

lluviosos o de intensas lluvias, pueden alcanzar por capilaridad el relleno de material de piso, afectando sus propiedades por humedecimiento.

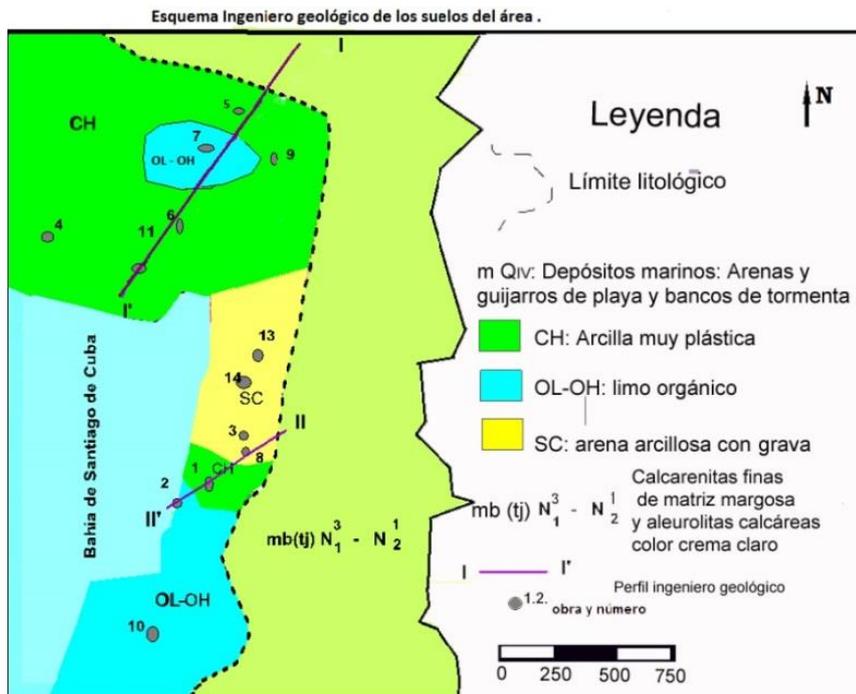


Figura 6. Esquema ingeniero-geológico por tipo de suelo del área de estudio.

En los suelos tipo arcilla muy plástica el nivel freático se incrementa en dirección noroeste sureste (respecto a las rasantes actuales), alcanzando en las localidades del sector noroeste desde 1,40 m hasta 1,90 m. Hacia el centro, los suelos son de tipo arena arcillosa y puede establecerse una franja de dirección noreste suroeste en la que se presentan profundidades entre 1,10 m y 1,30 m; desde esa zona hacia el este, el nivel freático asciende gradualmente hasta localizarse a profundidades menores de un metro, como por ejemplo en el sector sureste del área de estudio. Tomando en cuenta el comportamiento del nivel freático se puede presumir que toda el área es licuable.

El factor de seguridad calculado para los diferentes tipos de suelos del área de estudio, utilizando magnitudes $M=7,5$; $7,75$ y $8,0$ y las propiedades físico-mecánicas, arrojaron los resultados que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 2. Resultado del cálculo del factor de seguridad corregido para cada tipo de suelo existente en el área de estudio

Tipo de suelo	Magnitud 7,5	Magnitud 7,75	Magnitud 8
Arena arcillosa (SC)	1,77	1,2	0,86
Arcilla muy plástica (CH)	1,95	1,85	1,35
Limo orgánico Arcilla orgánica (OL-OH)	3,44	2,66	1,62

De la tabla podemos concluir que los suelos tipo (SC) son muy susceptibles a licuar ante sismos de magnitud 8,0 y poco susceptibles ante sismos de menos magnitud, no siendo el caso del suelo tipo OL-OH, el cual no es licuable bajo ninguna condición.

En el esquema de susceptibilidad a la licuefacción del Consejo Popular Guillermón Moncada las áreas se han clasificado en función de las condiciones ingeniero-geológicas del suelo, el análisis del nivel freático y los resultados del cálculo del factor de seguridad. Los resultados muestran que se clasifican como: muy susceptible a la licuefacción las arenas con arcilla y grava, localizadas en el sector noreste del área. El resto del área de estudio, con los datos disponibles, puede considerarse como no licuable.

4. CONCLUSIONES

En el Consejo Popular Guillermón Moncada los suelos varían entre una arcilla muy plástica con arena (CH) a una arena arcillosa con gravas (SC), predominando los suelos tipo (CH) en dirección norte, hacia el centro los suelos tipo (SC) y hacia el sur los de tipo arcilla orgánica (OL-OH). El cálculo del factor de seguridad ante la licuefacción dio como resultado valores mayores que uno para las arcillas muy plásticas, distribuidas en el sector norte y en el sector sur, representado por arcilla orgánica, lo que indica que no son susceptibles a licuar, en tanto el sector del centro, con predominio de arenas arcillosas con grava de valores menores que uno, sí son susceptibles a licuar ante sismos de gran magnitud.

5. REFERENCIAS

ALCOCER, S. M.; MELI, R.; SÁNCHEZ, T. & FLORES, L. 1994: Comportamiento ante cargas laterales de sistemas de muros de mampostería confinada con diferentes grados de acoplamiento a flexión. *Cuaderno de investigación* (17): 53-76.

- ÁLVAREZ, L.; CHUY, T. & COTILLA, M. 1991: Peligrosidad sísmica de Cuba. Una aproximación a la regionalización sísmica del territorio nacional. *Revista Geofísica* 35: 125-150.
- CHUY, T. 2010: Modelo del peligro sísmico de la provincia de Santiago de Cuba. Archivos CENAIIS.
- GONZÁLEZ, B. & PÉREZ, L. D. 2000: Escenarios de peligro sísmico y de fenómenos geotécnicos. En: 2do Taller de Prevención de Desastres. UNAICC, La Habana, p. 1-14.
- GONZÁLEZ-LABBÉ, C. 2011: *Comparación entre la metodología para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en concepción*. Tesis de diploma. Universidad del Bio Bio. Argentina.
- GUASCH, F. & OLIVA, R. A. 2014: Análisis de la vulnerabilidad habitacional y los riesgos inducidos en los edificios altos de la ciudad de Santiago de Cuba. Archivos CENAIIS.
- HENRÍQUEZ-PANTALEÓN, C. 2007: *Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación*. Carlos Otero Mazo y Gustavo Armijo Palacio (Tutores). Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 691 p.
- HERRERA, I. 2015: *Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el Consejo Popular Guiller món Moncada del municipio de Santiago de Cuba*. Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 83 p.
- LIAO, S. & WHITMAN, R. V. 1986: Overburden Correction Factors for SPT in Sand. *Journal of geotechnical engineering* 112(3): 373-377.
- ORDAZ-HERNÁNDEZ, A.; HERNÁNDEZ-SANTANA, J. R.; CHUY, T. J. & GARCÍA, J. A. 2013: La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental. *Minería y Geología* 29(2): 1-15.
- PERUCCA, L.; PÉREZ, A. & NAVARRO, C. 2006: Fenómenos de licuefacción asociados a terremotos históricos. Su análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61(4): 567-578.
- ROBERTSON, P. K. & WRIDE, C. E. 1998: Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal* 35(3): 442-459.
- SEED, H. B. & IDRISS, I. M. 1971: A Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of soil Mechanics and Foundation Engineering Division* 97(9): 1 249- 1 273.

- SEED, H. B. & IDRIS, I. M. 1982: Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Technical report (Vol. 5). Earthquake Engineering Research Institute.
- SEED, H. B. & LEE, K. L. 1966: Liquefaction on saturated sands during cyclic loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 92(6): 105-134.
- SEED, H. B.; IDRIS, I. M. & ARANGO, I. 1983: Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data. *Journal of Geotechnical Engineering* 109(3): 481-485.
- TOKIMATSU, K. & YOSHIMI, Y. 1983: Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content. *Soils and Foundations* 23(4): 56-74.
- VALLEJO, L. 2002: *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, Madrid, 744 p.
- VÁZQUEZ, J. C. 2005: Utilización de parámetros ingeniero-geológicos en la precisión de la licuación. Caso Santiago de Cuba. En: 1ra Convención de las Geociencias y la Química aplicadas a la construcción, p. 1-8.
- YOUNG, T. L.; IDRIS, I. M.; ANDRUS, R. D.; ARANGO, I.; CASTRO, G.; CHRISTIAN, J. T., ... & ISHIHARA, K. 2001: Liquefaction resistance of soils: Summary Report from the 1996 and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 127(10): 817-833.
- ZAPATA, J. A. 1996: *Utilización de variantes metodológicas de microzonación sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba*. Tesis doctoral. CENAI, Santiago de Cuba, 111 p.

Liuska Fernández-Diéguez, lfernandez@ismm.edu.cu
Ingeniera Geóloga. Departamento de Geología.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa,
Holguín, Cuba

Rafael Guardado-Lacaba, rguardado@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Geología.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa,
Holguín, Cuba

Isabel Herrera-Delfín
Ingeniera Geóloga. Empresa Geocuba,
Holguín, Cuba

Ricardo Oliva-Álvarez, oliva@cenais.cu
Centro Nacional de Investigaciones Aplicadas.
Santiago de Cuba, Cuba

Pedro Díaz-Santo, pedro@eniasc.co.cu
Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA)
Santiago de Cuba, Cuba

Simulación aplicada al cálculo de capacidades de almacenamiento y stock piles

Andrea Alejandra Giubergia
Verónica Gil Costa
Yanina Mansilla
David Narváez
María Eugenia Bertello
Marcelo Besso

Resumen

Este trabajo se enfoca en la simulación basada en procesos. Se realizó la simulación, mediante el software FlexSim 7.3.0, de un proceso minero compuesto por tolvas de almacenamiento y equipos de transporte, con el fin de determinar el número óptimo y la capacidad de los camiones y de las tolvas. Se concluye que el sistema de carga está sobredimensionado respecto al transporte, por lo que para mejorar la productividad de la mina es necesario aumentar la flota de camiones o incrementar la capacidad de transporte de estos.

Palabras clave: simulación de procesos; software FlexSim; minería subterránea; productividad minera; transporte minero.

Simulation applied to the storage capacity and stockpiles

Abstract

This investigation is focused on process based simulations. The simulation is carried out (using the FlexSim 7.3.0 software) to a mining process including storage hoppers and haulage equipment in order to estimate the desirable truck fleet size and the capacity of the trucks and the hoppers as well as assessing whether the design of the access roads is acceptable for the success of the operations. It is concluded that the dimensions of the loading system has been overestimated compared to the existing equipment fleet size. Therefore, it is required to increase the number of trucks or the truck haulage capacity to improve the mine productivity.

Keywords: process simulation; FlexSim software; underground mining; mining productivity; mining trucks.

1. INTRODUCCIÓN

Un proceso productivo puede ser evaluado antes de su ejecución simulándolo en un modelo que permita introducir cambios para analizar alternativas, optimizando eficacia y eficiencia. Actualmente existen diversas herramientas que permiten realizar simulaciones y análisis de sistemas complejos. Este tipo de herramientas es de gran utilidad para los procesos de producción minera, donde intervienen una gran cantidad de variables de incertidumbre.

La gran complejidad y diversidad de proyectos mineros generan una vasta necesidad de nuevas soluciones tecnológicas que permitan facilitar el trabajo en todos los eslabones de la cadena de producción (Van Niekerk, Kleingeld & Booyesen 2013). Aquí es donde las herramientas tecnológicas, en particular los softwares diseñados para el desarrollo de proyectos mineros, y en especial los softwares de simulación, tienen la oportunidad de acercarse a esos requerimientos y buscar métodos innovadores para satisfacerlos, ofreciendo productos y servicios que aporten a los procesos mineros y permitan agregarles valor y mejorar la eficiencia productiva.

La simulación ha sido ampliamente utilizada para examinar problemas de minería a cielo abierto y subterráneo (Newman *et al.* 2010; Vásquez-Coronado & Tenorio 2015), analizar activos mineros (Hodkiewicz, Richardson & Durham 2010), estudiar el impacto ambiental producido por el transporte de carbono (Tarshizi *et al.* 2015) y analizar posibles fallas en equipos (Sharma *et al.* 2009). También ha sido utilizada en otras industrias, como la agropecuaria (Iannoni & Morabito 2006), para resolver problemas de transporte (Gómez & Correa 2011; Jong & Ben-Akiva 2007) y desastres naturales (Li *et al.* 2015).

Encontrar el funcionamiento óptimo de un proceso constituye una tarea de gran complejidad. Esto se debe a la gran cantidad de variables que se presentan en todos los ámbitos de la actividad minera (Hudson 2003), como por ejemplo en el proceso de optimizar el cálculo de la capacidad de almacenamiento de una tolva o de un *stock pile* para obtener la productividad deseada.

Cuando se trabaja con este tipo de problema (con muchas variables) una buena práctica es efectuar cálculos iterativos que permiten encontrar una "solución provisoria". Posteriormente, al poner en funcionamiento el sistema y realizar las mejoras necesarias en base a los resultados obtenidos, se puede alcanzar la "solución óptima".

Actualmente una importante herramienta para optimizar los sistemas, con una mínima inversión de tiempo y dinero, son los simuladores de procesos

que permiten detectar, controlar, analizar y corregir las falencias en un sistema. La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con el mismo, con la finalidad de asimilar el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias (dentro de los límites impuestos por un criterio o un conjunto de ellos) para entender el funcionamiento del sistema (Sokolowsky 2009).

La simulación logra aislar el problema que se quiere estudiar para poder observarlo y solucionarlo objetivamente. Al resultado de la observación del problema se le llama modelo. Un modelo es efectivo cuando las soluciones que se proponen en él funcionan en la realidad (Banks 1998).

Actualmente, en la mayoría de los proyectos mineros, los ingenieros seleccionan los equipos y las maquinarias a utilizar; no cuentan con una herramienta automática confiable y apropiada para evaluar y decidir cuál de ellos es mejor para su proyecto, por lo que esta tarea se realiza en función de la experiencia (Baudino *et al.* 2012).

La selección se basa en dos aspectos: 1) la experiencia o información obtenida de un equipo al operar en algún yacimiento y 2) por el temor a fracasar al cambiar un equipo por otro de tecnología poco conocida (Ortiz *et al.* 2007). El objetivo es que el equipo sea suficiente para obtener la producción deseada, pero sin sobredimensionarlo, pues resulta contraproducente. Mediante simulación se pueden analizar diferentes escenarios y brindar múltiples opciones para mejorar el proceso productivo. La simulación puede proveer ventajas en términos financieros para operaciones mineras existentes y nuevas fases de desarrollo.

En este trabajo se presenta el estudio de capacidades de una mina subterránea en expansión utilizando el software de simulación FlexSim. En particular, se desea determinar si la flota de transporte es adecuada para obtener una cierta producción diaria.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se presenta un enfoque metodológico que permite estudiar y evaluar los puntos críticos de un sistema de transporte de una mina subterránea, con el objetivo de determinar la producción diaria de la misma. Para ello, se utiliza una metodología basada en el modelado y posterior simulación del sistema bajo estudio. La importancia de la metodología utilizada se basa principalmente en la etapa de "retroalimentación" que permite detectar falencias en el modelo obtenido, ajustar parámetros y rediseñar escenarios de prueba.

En particular, este trabajo se enfoca en la simulación basada en procesos. En este caso, las actividades más importantes del sistema son modeladas y mediante parámetros de tiempos, obtenidos luego de hacer pruebas reales en la mina subterránea, se ejecuta la correspondiente simulación.

La técnica de simulación implica replicar artificialmente las características de un sistema a través de un modelo e imitar su operación a medida que transcurre el tiempo. En la Figura 1 puede observarse un esquema del proceso de simulación. En este esquema se puede apreciar que los resultados obtenidos pueden utilizarse para mejorar el modelo inicial y ajustar parámetros de la simulación, de forma tal que la simulación resultante sea lo más parecido al sistema real.

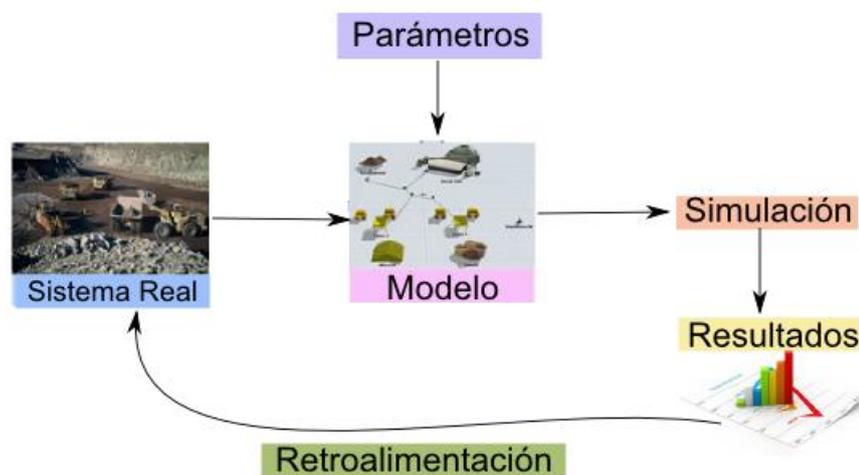


Figura 1. Esquema del proceso de simulación.

Con base en el análisis del comportamiento del modelo, luego es posible inferir las características operacionales del sistema real. Simular requiere construir un programa que posibilite seguir la secuencia de los eventos y observar cómo cambian los descriptores del sistema en orden cronológico. Es por ello que una simulación debe contener una variable que represente el tiempo de simulación llamado *clock* o reloj (Kelton, Sadowski & Sturrock 2008). Una de las etapas más importantes es el modelado. Medina-Pasaje (2005) plantea que:

“El modelado, como herramienta de abstracción y simplificación de la realidad, es pues una técnica extremadamente útil para enfrentarse a la complejidad, al facilitar tanto la comprensión como la resolución de los problemas. No existe un modelo único, ni correcto, de una determinada situación, solo modelos adecuados o no a un cierto fin, pues toda abstracción es por definición incompleta”.

En la primera etapa se define el objetivo del estudio de la simulación, es decir, qué métricas son de interés para evaluar el caso de estudio particular. En la segunda, se caracterizan las operaciones más importantes y sus distribuciones, incluyendo políticas, operaciones y recursos. Por último, en la tercera etapa se definen las entidades, servidores y recursos.

La definición de parámetros incluye las variables de entrada, parámetros y variables de respuesta del modelo. Para obtener las variables de entrada es necesario realizar una recolección de datos y determinar su distribución estadística. Generalmente, la obtención de estas variables se realiza mediante mediciones en el sistema real.

La etapa de simulación incluye la codificación del modelo conceptual al software seleccionado. Esta codificación debe ser validada y verificada con el fin de garantizar un resultado certero.

Los resultados obtenidos se analizan para determinar si el modelo satisface las condiciones requeridas por el sistema real y se investigan las métricas de interés para determinar si es necesario realizar modificaciones sobre el diseño del modelo original.

La etapa de retroalimentación incluye evaluar alternativas de oportunidad de mejorar y analizar nuevas alternativas de diseño.

2.1. Software de simulación

Los simuladores son herramientas computacionales que permiten experimentar y analizar el comportamiento obtenido de procesos de producción en diferentes escenarios (Maxera-Bedón 2005). Actualmente, existen en el mercado algunos simuladores bastante compactos y fáciles de entender por los usuarios (Sánchez 2005; Dyer & Jacobsen 2006; Cortés *et al.* 2004).

Estos softwares se pueden clasificar como software de simulación de propósito general, como Arena (ARENA Simulation Software 2016), FlexSim (FlexSim 2016), AweSim (Zúñiga-Arriaza & Araya 2010) y GPSS/H (Software Products 2016); y softwares diseñados específicamente para resolver problemas que pueden surgir durante un proyecto minero, como HAULSIM (Haulage Simulation 2016), SIMULART (SIMULART 2016) y SimMine (Mining-technology.com 2016).

También existen herramientas de modelado de propósito general que pueden ser aplicados a proyectos mineros, como UML (Giubergia *et al.* 2012) y Redes de Petri (Giubergia *et al.* 2014).

2.2. Caso de estudio

En este trabajo, el modelo de simulación se realizó con base en una operación minera subterránea. El transporte del material se llevó a cabo mediante cuatro camiones de capacidad conocida. El material se transportó desde dos tolvas de almacenamiento en el subsuelo, hasta dos puntos de descarga en superficie (planta de procesamiento y escombrera). La mina consta de dos niveles:

- Nivel 1: la tolva es utilizada para la extracción del mineral.
- Nivel 2: se encuentra en desarrollo, por lo que la tolva es utilizada para la extracción de material estéril.

Los camiones volquete de 40 t de capacidad son cargados por los propios conductores del equipo para lo cual cada tolva posee un sistema hidráulico de descarga. Los camiones cargados inician el viaje a la superficie a través de una rampa, con una pendiente de 25° de inclinación, y posteriormente un tramo horizontal hasta su destino final, que es la planta de procesamiento para el mineral y la escombrera para el material estéril. La Figura 2 muestra las distancias entre cada punto del sistema a evaluar.

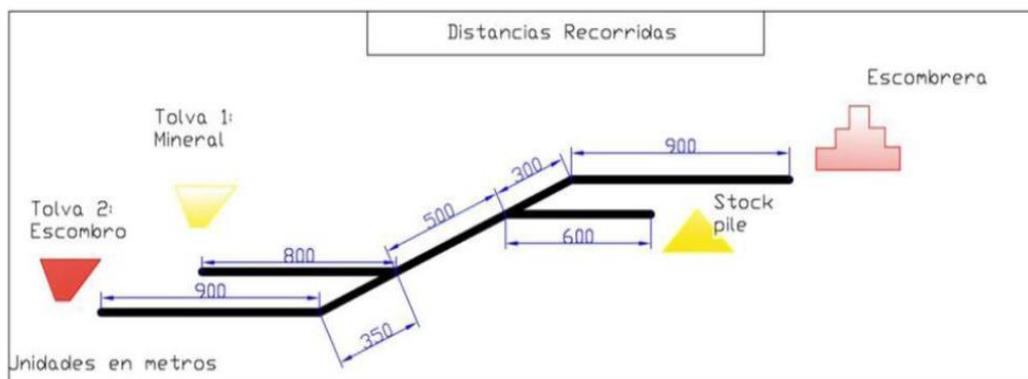


Figura 2. Esquema del sistema real.

La Figura 3 muestra la vista en perspectiva de la planta, los puntos de extracción, la escombrera y los trayectos que conectan cada punto estudiado en la simulación, utilizando el software FlexSim.

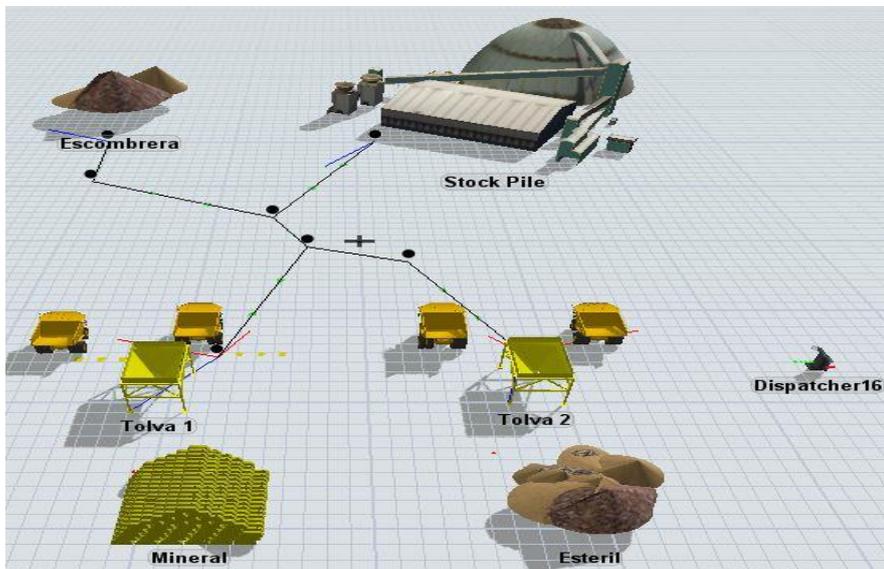


Figura 3. Vista en perspectiva del modelo de mina subterránea.

De los datos obtenidos mediante la toma de muestra de tiempos en la mina se tiene que, cuando los camiones circulan cargados su velocidad promedio es: 15,5 km/h en caminos horizontales y 7,5 km/h en caminos con pendientes. Cuando los camiones circulan descargados su velocidad es 25 km/h en caminos horizontales y 30 km/h en pendientes.

Adicionalmente se obtuvieron las siguientes medidas del tiempo de carga y descarga: (1) El mineral es cargado en las tolvas con una distribución exponencial con media 3,8 horas. (2) La tolva de mineral carga los camiones con una distribución exponencial con media 6,3 horas. (3) La tolva de estéril carga los camiones con una distribución exponencial de 6,2 horas.

La simulación del proceso de carga y transporte se realizó para un periodo de 24 h en el cual el funcionamiento de los camiones y las tolvas es continuo.

En la siguiente sección se utilizan las herramientas estadísticas provistas por el software FlexSim para analizar el desempeño de los distintos componentes del sistema bajo estudio; mediante los datos estadísticos se pretende estudiar su comportamiento buscando posibles fallas, cuellos de botella y puntos en los que se pueda efectuar alguna mejora.

3. RESULTADOS

3.1. Comportamiento de las tolvas

En la Figura 4 se observa el comportamiento correspondiente a las tolvas de mineral y estéril, donde se indica el porcentaje de tiempo que se encuentran en espera.

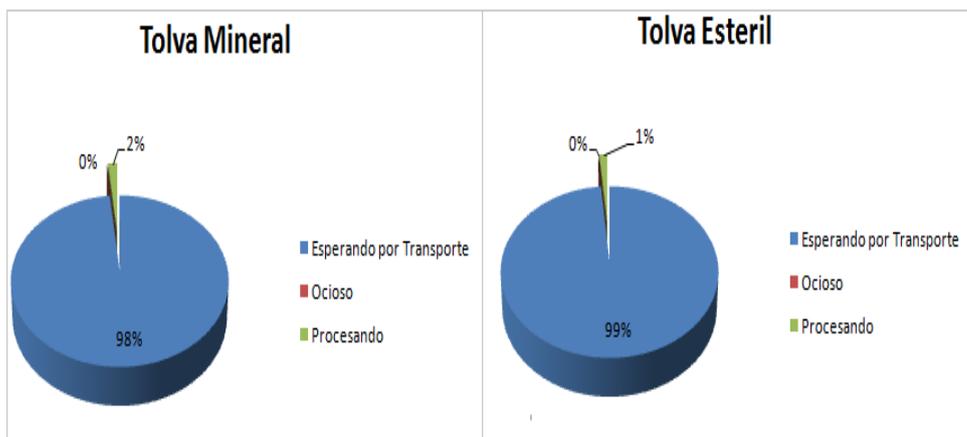


Figura 4. Tiempo de espera de las tolvas.

Esta figura muestra que el tiempo de espera es de 98 % para la tolva de mineral y 99 % para la tolva de estéril. Solo un máximo de 2 % del tiempo se encuentran operando. Por lo tanto, se puede deducir que las tolvas están sobredimensionadas con respecto al número de camiones. En la próxima sección se reafirma lo mencionado al analizar el comportamiento del transporte.

3.2. Comportamiento del transporte

A continuación se estudia el comportamiento de cada una de las unidades correspondiente al sistema de transporte. En la Figura 5 se puede observar que los tiempos de viaje cargado, descargado y tiempo ocioso son similares en los cuatro camiones, debido a que tienen idénticas características.

Dada la similitud de los datos se ha decidido trabajar con valores promedios, obteniendo el gráfico mostrado en Figura 6, representativo de los cuatro anteriores.

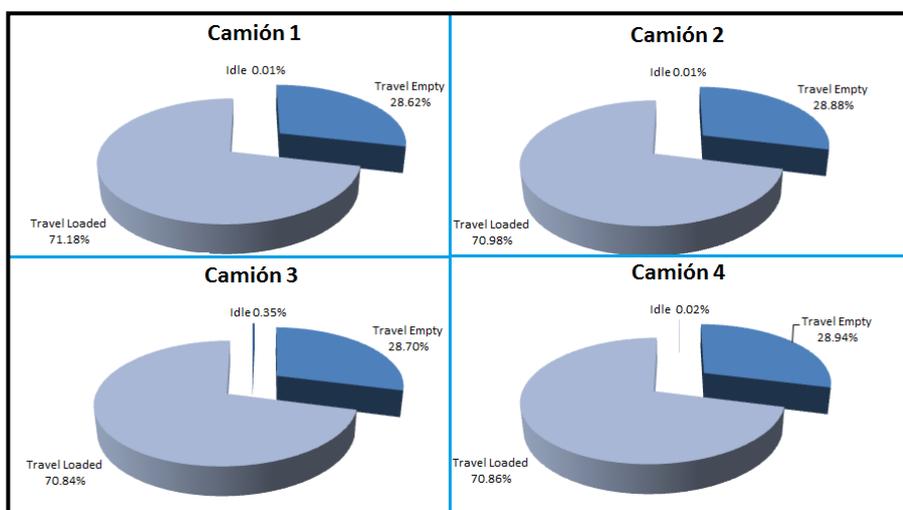


Figura 5. Tiempos del ciclo de los camiones.

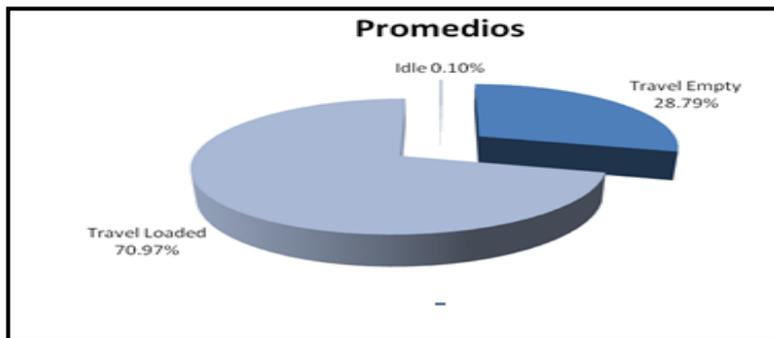


Figura 6. Tiempos promedios.

En la Figura 6 se puede observar que prácticamente el 100 % del tiempo los camiones están viajando, ya sea a buscar material (*Travel Empty*) o llevando material (*Travel Loaded*). Como es de esperarse, la mayoría del tiempo el camión viaja cargado debido a que su velocidad disminuye al 50 % de la velocidad del camión vacío.

Se puede observar un cuello de botella en el sistema de transporte ya que el tiempo ocioso (Idle) de los camiones es de 0,1 %, lo que indica que una vez que el camión descarga, ya hay material disponible para ser transportado.

Haciendo el análisis del comportamiento de las tolvas y del transporte, es claro que existe una falencia en el sistema, ya que la cantidad de camiones no es la suficiente para transportar la cantidad de material que despachan las tolvas.

3.3. Cálculo de producción

En la Tabla 1 se muestra un resumen de la cantidad de material transportado hasta la escombrera y stock pile para la simulación de 24 h, tanto del peso como del volumen movido. Se encuentra también la cantidad de camiones que ingresaron (Input), cada uno de 40 t.

Tabla 1. Cantidad de material transportado

	Input	Densidad Aparente t/m ³	Peso t	Volumen m ³
Escombrera	220,00	1,70	8 800,00	5 176,47
Stock Pile	221,00	1,90	8 840,00	4 652,63
Total	441,00		17 640,00	9 829,10

3.3.1. Cálculo del área afectada por la escombrera y stock pile en un día

En cuanto a la densidad del material se toma un mineral de hierro, considerando que las densidades eran de 2,85 t/m³ para el mineral

y $2,55 \text{ t/m}^3$ para el estéril (Manual de Rendimiento de Caterpillar 2010). Luego de ser volado el material, al ocupar más volumen (debido al esponjamiento del 50 %), su densidad va a ser menor: $1,9 \text{ t/m}^3$ y $1,7 \text{ t/m}^3$, respectivamente. El ángulo de reposo de ambos materiales es de 35° .

Conociendo el volumen y el ángulo de reposo del material se calcula la superficie afectada para la construcción de las pilas para un día. Por lo general, las escombreras tienen la forma de cono, dado a que el material adopta esta forma naturalmente. Para el cálculo de la pila con forma de cono truncado se toma un ángulo de reposo de material de 35° , que es un valor promedio del rango típico (30° - 40°), según el Manual General de Minería y Metalurgia (2006).

Por otra parte, se ha buscado un equipo que tenga una capacidad de 40 t que pueda ser utilizado en la mina subterránea, que cumpla algunas especificaciones como radio de giro y longitud del camión para establecer un radio mínimo (r) para que el camión realice maniobras. La Figura 7 muestra el equipo seleccionado, cuya longitud es de 11,263 m y tiene un radio de giro entre pared de 8,967 m.

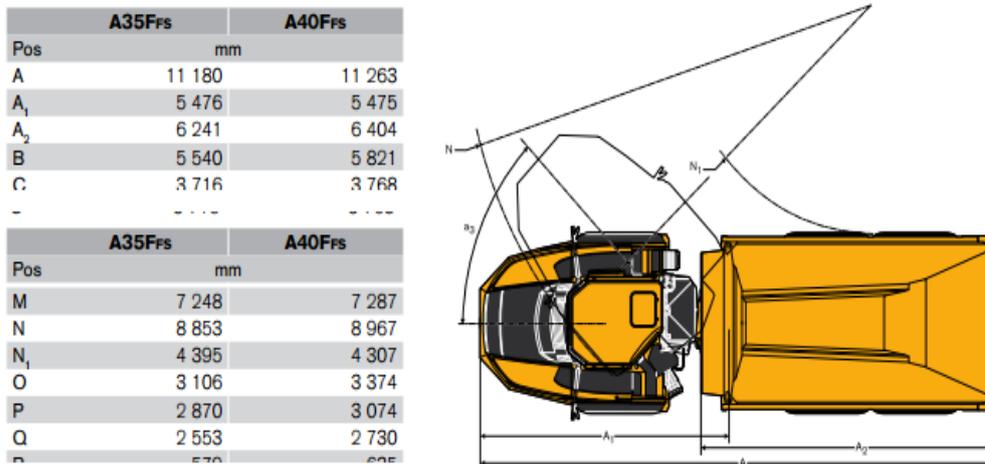


Figura 7: Equipo seleccionado: Dumper Articulado Volvo A40F.

Conociendo el volumen y el ángulo de reposo del material se calcula la superficie afectada para la construcción de las pilas para un día, las cuales tendrán la forma de cono truncado. Se fija un radio menor de 20 m, para que los camiones puedan realizar maniobras en la parte superior de la pila. La fórmula para calcular el volumen es:

$$\frac{1}{3}\pi h(R^2 + r^2 + Rr)$$

Donde:

R: Radio mayor;

r = Radio menor;

h: Altura.

En la Figura 8 se muestran gráficamente los parámetros que participan en la ecuación.

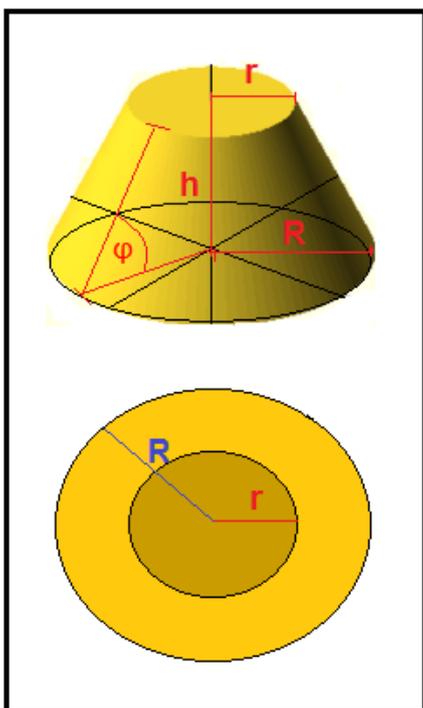


Figura 8. Perfil y vista en planta de una pila de material (stock pile).

3.3.2. Cálculo de superficie para la escombrera

Se realizaron los cálculos correspondientes para determinar la superficie de la escombrera, los cuales arrojaron, para un radio menor ($r=20$ m) y una altura ($h=4,3$ m), una superficie de $2147,1$ m². A continuación se presentan en la Tabla 2 y la Figura 9 los cálculos realizados.

Tabla 2. Cálculos de las dimensiones de la escombrera

Dimensiones de la escombrera al final del día			
Ang. de Reposo (φ , °)	Altura (h, m)	Radio menor (r, m)	Radio mayor (R, m)
35	4,3	20	26,1
Vol. Material, m ³	Vol. Teórico, m ³	Área de la base, m ²	Área de la base, ha
5 176,5	5 086,3	2 147,1	0,215

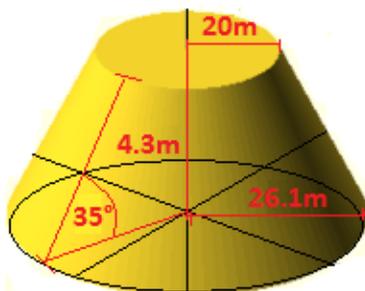


Figura 9. Cálculos realizados para calcular la superficie de la escombrera.

3.3.3. Cálculo de superficie para el stock pile

Se determinó una superficie de 2 077,2 m² para el stock pile radio menor (r=20 m) y una altura (h=4 m). En la Tabla 3 se observan los cálculos efectuados.

Tabla 3. Cálculos de las dimensiones del stock pile

Dimensiones del stock pile al final del día			
Ang. de Reposo (φ , °)	Altura (h, m)	Radio menor (r, m)	Radio mayor (R, m)
35	4,0	20	25,7
Vol. Material, m ³	Vol. Teórico, m ³	Área de la base, m ²	Área de la base, ha
4 652,6	4 636,6	2 077,2	0,208

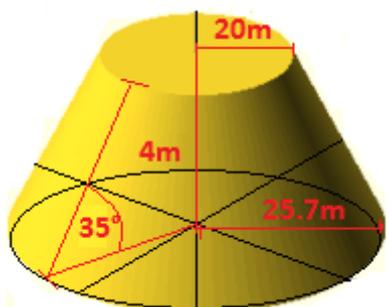


Figura 10. Cálculos realizados para calcular la superficie del stock pile.

4. CONCLUSIONES

- La metodología de trabajo empleada se basa en el modelado y simulación de procesos para el análisis del sistema y apoyo a la toma de decisiones. Cuenta con una etapa de retroalimentación que permite detectar falencias en el modelo originalmente diseñado, plantear nuevos escenarios y modificar los parámetros.
- Teniendo en cuenta los datos estadísticos entregados por el software FlexSim se puede concluir que el sistema de carga se encuentra enormemente sobredimensionado respecto al transporte. Por lo

tanto, para mejorar la productividad de la mina es necesario incrementar la flota de camiones o aumentar la capacidad de transporte de los camiones.

5. REFERENCIAS

ARENA Simulation Software. Disponible en:

<https://www.arenasimulation.com/>. Acceso 2016.

BANKS, J. 1998: *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. John Wiley & Sons.

BAUDINO, M.; GIL-COSTA, V.; GIUBERGIA, A.; GUERRERO, R. & PRINTISTA, M. 2012: Modelos de simulación: selección y reemplazo de equipos para proyectos mineros. En: XIV Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación. Argentina, p. 713-717.

CORTÉS, P.; MUÑUZURI, J.; GUADIX, J.; LARRAÑETA, J. & ONIEVA, L. 2004: Análisis de la capacidad del Puerto de Sevilla mediante la simulación con Arena. En: VIII Congreso de Ingeniería de Organización. Leganés, p. 21-30.

DYER, T. L. & JACOBSEN, W. L. 2006: Use of simulation to validate load and haul requirements at Cortez Gold Mines. SME Annual Meeting.

JONG, G. & BEN-AKIVA, M. 2007: A micro-simulation model of shipment size and transport chain choice. *Transportation Research Part B: Methodological* 41(9): 950-965.

FlexSim. www.flexim.com. Acceso 2016.

GIUBERGIA, A.; RIESCO, D.; PRINTISTA, M. & GIL-COSTA, V. 2012: Estereotipos UML para aplicar en un ambiente de simulación de procesos mineros. En: XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación. Argentina, p. 764-773.

GIUBERGIA, A.; GIL-COSTA, V.; LOBOS, J.; OCHOA, C.; PRINTISTA, A. & TISERA, C. 2014: Modelado y diseño de sistemas complejos mediante técnicas de simulación. En: XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, WICC 2014. Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina, 7-8 mayo, p. 464-468.

GÓMEZ, R. A. & CORREA, A. A. 2011: Análisis del transporte y distribución de materiales de construcción utilizando simulación discreta en 3D. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 30: 39-52.

GPSS/H Software Products. Disponible en:

<http://www.wolverinesoftware.com/GPSSHProducts.htm>. Acceso 2016.

Haulage Simulation. Disponible en:

<http://www.rpmglobal.com/software/haulsim>. Acceso 2016.

HODKIEWICZ, M.; RICHARDSON, S. & DURHAM, D. 2010: Challenges and Opportunities for Simulation Modelling Integrating Mine Haulage and Truck Shop Operations. In: Australian Mining Technology conference, p. 163-172.

HUDSON, J. P. 2003: Factores que afectan productividad y costo en el carguío y transporte. Informe técnico. Runge Latin America Ltda. Disponible en: <http://www.editec.cl/mchilena/dic2003/Articulo/informe.htm>.

IANNONI, A. P. & MORABITO, R. 2006: A discrete simulation analysis of a logistics supply system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 42(3): 191-201.

KELTON, W. D.; SADOWSKI R. P. & STURROCK D. T. 2008: *Simulación con Software Arena*. Cuarta Edición. McGraw-Hill, México.

LI, C.; LI, J.; HU, H. & HOU, D. 2015: Visualization and simulation model of underground mine fire disaster based on Cellular Automata *Applied Mathematical Modelling* 39(15): 4 351-4 364.

MANUAL DE RENDIMIENTO DE CATERPILLAR. 2010: Caterpillar Inc., Peoria, Illinois, U.S.A.

MAXERA-BEDÓN, C. O. 2005: *Aplicación de la simulación para la optimización del acarreo de mineral*. Tesis de grado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 80 p.

MEDINA-PASAJE, J. M. 2005: *Metodología y herramientas UML para el modelado y análisis de sistemas de tiempo real orientados a objetos*. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria. 408 p.

Mining-technology.com. Disponible en:

<http://www.mining-technology.com/>. Acceso 2016.

NEWMAN, A. M.; RUBIO, E.; CARO, R.; WEINTRAUB, A. & EUREK, K. 2010: A Review of Operations Research in Mine Planning. *Journal Interfaces* 40(3): 222-245.

ORTIZ, O. S.; CANCHARI, G. S.; IGLESIAS, S. L. & GONZALES, M. T. 2007: Simulación determinística y estocástica para dimensionar y seleccionar equipo y elegir alternativas de minado en la explotación minera superficial. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica* 10(19): 38-50.

- PORTAL MINERO S.A. 2006: *Manual General de Minería y Metalurgia*. Portal Minero Ediciones. Edición Digital.
- SÁNCHEZ, O. O. 2005: Aplicación del lenguaje GPSS/H a un problema de acarreo minero. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica* 8(15): 60-68.
- SHARMA, G.; HAUKAAS, T.; HALL, R. A. & PRIYADARSHINI, S. 2009: Bayesian statistics and production reliability assessment for mining operations. *Mining, Reclamation and Environment* 23(3): 180-205.
- SIMULART. www.simulart.cl. Acceso 2016.
- SOKOLOWSKY, J. 2009: *Principle of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach*. John Wiley & Sons.
- TARSHIZI, E.; STURGUL, J.; IBARRA, V. & TAYLOR, D. 2015: Simulation and animation model to boost mining efficiency and enviro-friendly in multi-pit operations. *Mining Science and Technology* 25(4): 671-674.
- VAN NIEKERK, W. F.; KLEINGELD, M. & BOOYSEN, W. 2013: The value of simulation models when implementing mine DSM projects. In: Industrial and Commercial Use of Energy Conference (ICUE). Proceedings of the 10th IEEE, p. 1-4.
- VÁSQUEZ-CORONADO, P. P. & TENORIO, V. 2015: Modelos de optimización del ciclo de carguío-transporte-acarreo. *Revista Tecnología Minera* 58 (marzo-abril). Disponible en: <http://www.tecnologiaminera.com/tm/d/novedad.php?id=251>
- ZÚÑIGA-ARRIAZA, R. & ARAYA, O. 2010: Optimización de la logística de operaciones de una Planta de molienda de sal. *Ingeniería Industrial* 22(3).

Andrea Alejandra Giubergia, aagiuber@unsl.edu.ar

Departamento de Minería
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales
Universidad Nacional de San Luis (UNSL), Argentina

Veronica Gil Costa, gvcosta@unsl.edu.ar

Departamento de Minería
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales
Universidad Nacional de San Luis (UNSL), Argentina

Yanina Mansilla, yani_m20@hotmail.com

Departamento de Minería
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales
Universidad Nacional de San Luis (UNSL), Argentina

David Narvaez, narvaez_41@hotmail.com

Departamento de Minería
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales.

Evaluación geológica ambiental para ubicar un relleno sanitario manual en la parroquia Mene de Mauroa, Venezuela

Simón Enrique Morales-Soto
Alina Rodríguez-Infante

Resumen

La inadecuada disposición de los residuos urbanos es hoy uno de los problemas ambientales que impactan a muchas comunidades. El objetivo de esta investigación fue seleccionar, mediante criterios técnicos geológicos, el sitio más adecuado para ubicar un relleno sanitario manual para disponer los desechos sólidos generados en la parroquia Mene de Mauroa (Venezuela). Se establecieron 19 variables que fueron sometidas a un sistema de valorización por el método de peso y escala, que consiste en la confrontación de variables, dando prioridad según orden de importancia. Mediante una escala de ponderación de cinco valores para el puntaje de cada variable se elige como el terreno más adecuado para el relleno sanitario el área con mayor puntaje..

Palabras clave: relleno sanitario; disposición de residuos; parroquia Mene de Mauroa; evaluación ambiental.

Environmental and geologic assessment to locate a manual sanitary refill in the Mene de Mauroa church, Venezuela

Abstract

The inadequate disposal of urban wastes is nowadays an environmental issue having a negative impact on several communities. The objective of this investigation is to select the most adequate place to locate a manual sanitary landfill to dump the solid wastes from the Mene de Mauroa (Venezuela) church. A total of 19 variables were subjected to a series of evaluations applying the scale and weight method. This method consists of comparing the variables according to their level of priority. The area with the highest score is to be selected as the most adequate area for the sanitary landfill according to a weighting scale of 5 values for the scoring of each variable.

Keywords: sanitary refill; waste disposal; Mene de Mauroa church; environmental assessment.

1. INTRODUCCIÓN

Entre los problemas ambientales que impactan las ciudades en la actualidad se encuentra la escasez de áreas para la disposición final de los residuos sólidos, conflictos en el uso del terreno con la población establecida alrededor de las instalaciones para el tratamiento y destino final, así como la exportación de los desechos y residuos sólidos a municipios vecinos. La organización no gubernamental venezolana VITALIS (2013) identificó 65 problemas ambientales entre los cuales destaca el inapropiado manejo de los residuos y desechos sólidos.

La situación actual de los desechos sólidos en el municipio Mauroa, en el estado Falcón, República Bolivariana de Venezuela, constituye uno de los mayores problemas de saneamiento ambiental para sus pobladores y sobre todo para su municipalidad. Por un lado, porque constituye un aspecto de la vida diaria que repercute en los índices de contaminación en el suelo, aire y agua del municipio, que va desmejorando en gran medida las condiciones de la calidad de vida de su población, principalmente de las comunidades de escasos recursos económicos y sobre todo de las que se encuentran localizadas en terrenos marginales. Por otro lado, por la incidencia en el aspecto económico en su municipalidad, pues un alto porcentaje de su presupuesto es destinado al aseo, recolección, transporte y disposición final de los desechos sólidos generados.

Considerando que el suelo es el soporte físico de las actividades constructivas, como el caso del relleno sanitario, la geología permite el conocimiento de las características y propiedades del suelo ya que considera la información de las condiciones climáticas, aspectos litológicos, geomorfológicos, geodinámicos y geohidrológicos (Allende 2005).

En la parroquia Mene de Mauroa es posible disminuir el impacto a la salud humana y al medio ambiente que provoca la inadecuada disposición de los residuos sólidos, identificando áreas alternativas por medio de la evaluación geológica ambiental, a fin de diseñar un relleno sanitario manual.

La evaluación geológica significa valorar su ubicación, accesibilidad, topografía, condiciones geológicas, climáticas, hidrológicas superficiales y subterráneas (Guadalupe *et al.* 2002; Allende 2005) y los aspectos condicionantes como seguridad aérea, integridad de los recursos naturales y bienes culturales, infraestructura existente, proyectos de desarrollo urbano, regional y nacional, entre otros, como establece la Ley Orgánica para la Planificación y Gestión de la Ordenación del Territorio (2005).

Ante la problemática de conocer cuál es la alternativa de ubicación geológicamente más adecuada para el relleno sanitario manual de la

parroquia Mene de Mauroa, de acuerdo con el análisis comparativo y la confiabilidad de los métodos aplicados, el objetivo principal entonces de esta investigación fue seleccionar, mediante criterios técnicos geológicos, el mejor sitio para ubicar un relleno sanitario manual para la disposición final de los desechos sólidos generados en la parroquia Mene de Mauroa.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en tres etapas, cada una con tareas específicas que se relacionan a continuación.

En la etapa inicial se realizó la búsqueda de los documentos, leyes y reglamentos que estipulan la construcción de rellenos sanitarios, pues la selección del sitio deberá efectuarse acorde a la jurisdicción del área para disposición de residuos sólidos y leyes vigentes. Se destaca en este aspecto el estudio de la Ley Orgánica del Ambiente de la República Bolivariana de Venezuela (2006), que regula toda la actividad socioproductiva a favor de la protección ambiental. Al mismo tiempo, se realizó la búsqueda de informes e investigaciones que han tenido como objeto la valoración de terrenos para este tipo de construcción, tanto en Venezuela como en otras regiones.

En esta etapa se definió la zona de búsqueda del terreno óptimo para la construcción, teniendo en cuenta que la extensión del mismo está en función de la cantidad de residuo del que se va a disponer. La identificación de las posibles áreas se realizó teniendo en cuenta aquellos sitios que han sido indicados como de interés para el municipio, alguno de los cuales cuenta con estudios previos, partiendo de las recomendaciones de Villarosa *et al.* (2011).

En la segunda etapa, experimental, se identificaron los criterios de selección que permiten la eliminación de áreas no favorables y un ranking de las áreas favorables que serían evaluadas. Con esta metodología, propuesta por Bautista, Rosales y Contreras (2010), a medida que se avanza en las etapas disminuye el número de sitios a considerar.

Si se parte de que un relleno sanitario involucra los tres medios: suelo, aire y agua, es indispensable evaluar las características específicas de cada una de las zonas, además de factores técnicos, económicos, sociales y políticos.

Se establecieron 19 variables de campo (Tabla 1), siguiendo los parámetros nacionales e internacionales usados para la selección de sitios, entre los que destacan los criterios presentados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (2012); los sugeridos por la Organización Panamericana de la Salud y los criterios ambientales recomendados por las normas sanitarias para proyecto y operación de un relleno sanitario de la

República Bolivariana de Venezuela (Decreto N° 230) sobre residuos sólidos de índole atóxico.

Tabla 1. Variables elegidas como criterio de selección para variantes de sitio

ITEM	CRITERIOS DE SELECCIÓN
1	Distancia a la población más cercana (m)
2	Distancia a granjas crianza de animales (m)
3	Distancia a aeropuertos (m)
4	Área del terreno (m ²)
5	Vida útil
6	Uso actual del suelo y del área de influencia
7	Propiedad del terreno
8	Distancia a vía de acceso principal (km)
9	Pendiente del terreno
10	Posibilidad del material de cobertura
11	Profundidad de la napa freática (m)
12	Distancia a fuentes de agua superficiales (m)
13	Geología del suelo (permeabilidad)
14	Opinión pública
15	Área natural protegida por el estado
16	Área arqueológica
17	Vulnerabilidad a desastres naturales
18	Dirección predominante del viento
19	Cuenta con barrera sanitaria natural

Estos criterios fueron sometidos a un sistema de valorización por el método de peso y escala (Tabla 2), que consiste en la confrontación de variables, dando prioridad de acuerdo al orden de importancia; se obtiene una escala de valores sobre la base de 100, que es útil para pesar la variable, que luego es dividida en cinco ponderaciones que van desde la condición más desfavorable del factor de campo hasta el ideal, correspondiendo a cada uno la quinta parte del valor obtenido ($n/5$, en donde n adopta el valor de 1 a 5) por su importancia en la matriz de peso y escala, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Escala de ponderación para el puntaje de las variables

Calificación	Puntaje
Muy malo	1
Malo	2
Regular	3
Bueno	4
Muy bueno	5

Las áreas se evaluaron atendiendo a características como calidad del suelo, accesibilidad, forma y relieve topográfico, riesgos geodinámicos y esencialmente su disponibilidad de uso, de manera que no se afecten los planes de expansión urbana. Para la argumentación de esas variables se desarrolló un trabajo de campo que permitió la confección de los mapas temáticos, que junto a la información compilada en la etapa inicial, permitieron la selección del sitio.

En el proceso de identificación se seleccionaron tres áreas (1, 2 y 3), con condiciones para la ubicación del relleno sanitario para la disposición final de los residuos sólidos (Figuras 1 y 2). Estas áreas fueron sometidas a un proceso de evaluación ambiental a partir de criterios integrales y multidisciplinarios.

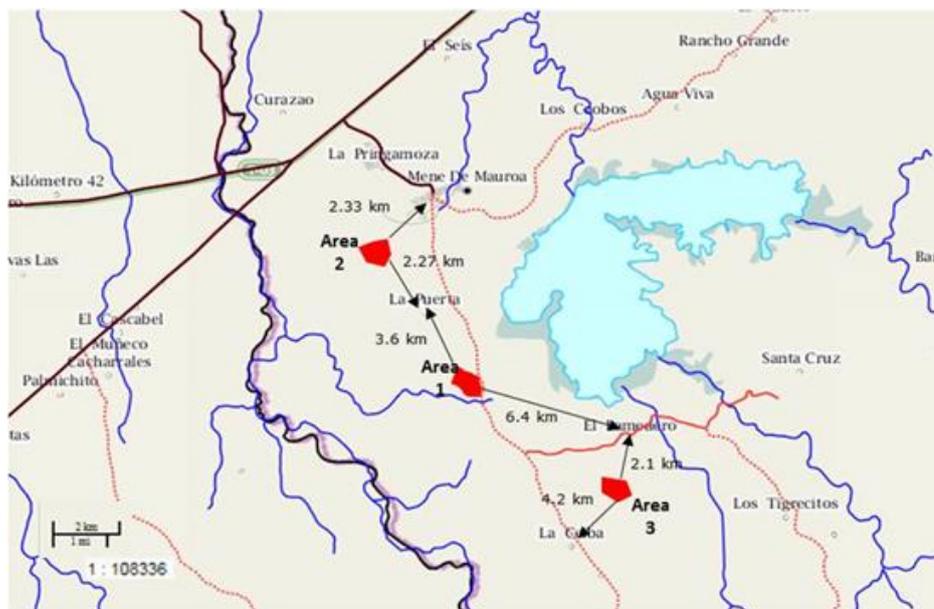


Figura 1. Distancia a la población más cercana

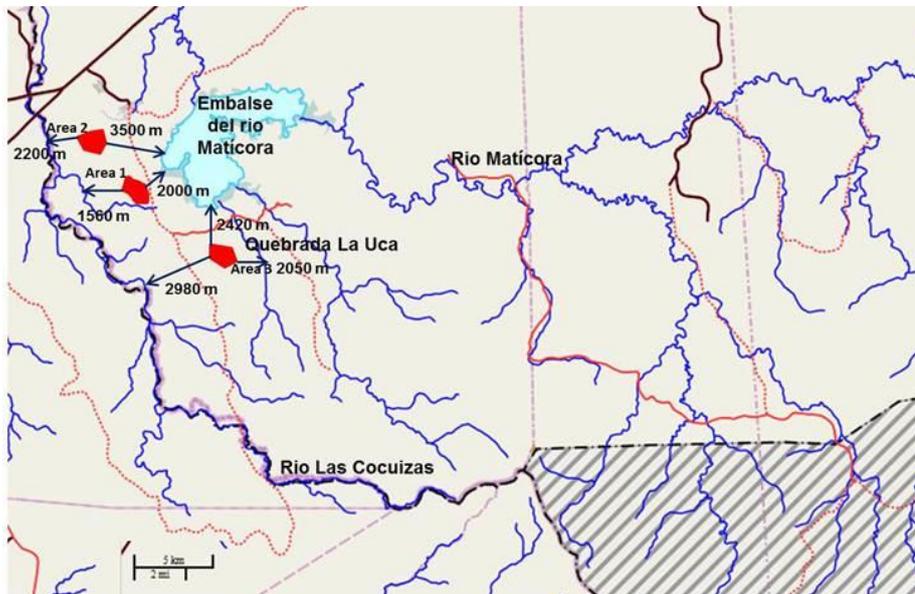


Figura 2. Condiciones hidrológicas de las zonas preseleccionadas

2.1. Factores ambientales que condicionan el área bajo régimen de administración especial

Toda área considerada bajo régimen especial debe preservar, lo menos alterado posible, sus condiciones físicas naturales. En dependencia del tipo de régimen especial se siguió el procedimiento establecido por la Ley Orgánica del Ambiente (2006). Se constató que ninguna de las tres áreas fuera de interés arqueológico pero todas se encuentran dentro del área natural protegida de la cuenca de los ríos Maticora y Cocuizas (ZP3) y dentro del área boscosa de protección de ambos ríos (ABBP).

2.2. Vulnerabilidad del área a desastres naturales

Para determinar la vulnerabilidad a desastres naturales de las tres áreas preseleccionadas se tomó como base el mapa de Geología, Geomorfología y Amenazas Naturales realizado en el proyecto Plan de Ordenación del Territorio del estado Falcón, siendo consideradas geomorfológicamente como áreas de pie de monte o llanuras costeras, medianamente estables y con un riesgo sísmico de medio a bajo (Figura 4).

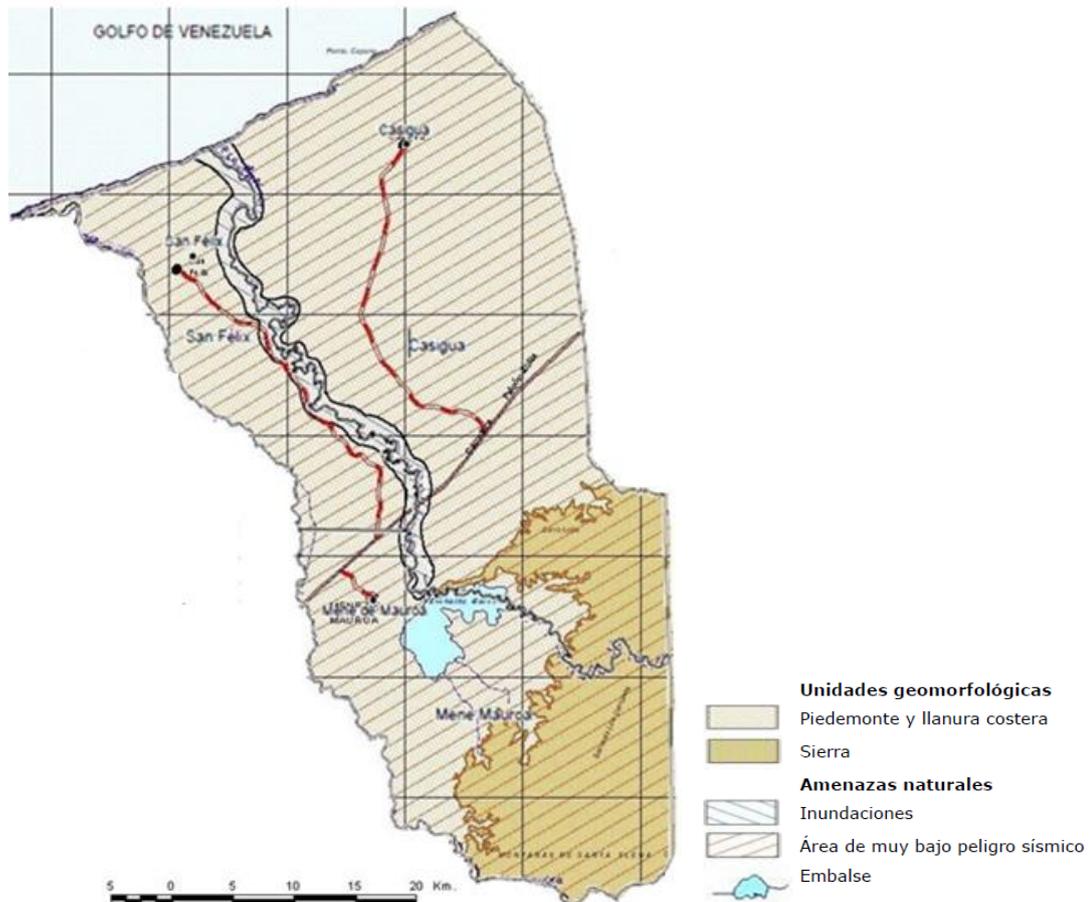


Figura 4. Vulnerabilidad del área a desastres naturales.

2.3. Análisis de las infraestructuras

En el diagnóstico realizado en la parroquia Mene de Mauroa se observó la influencia de las tres áreas propuestas para el relleno sanitario en el embalse de Matícora y la presa que lleva el mismo nombre, como se muestra en la Figura 5.

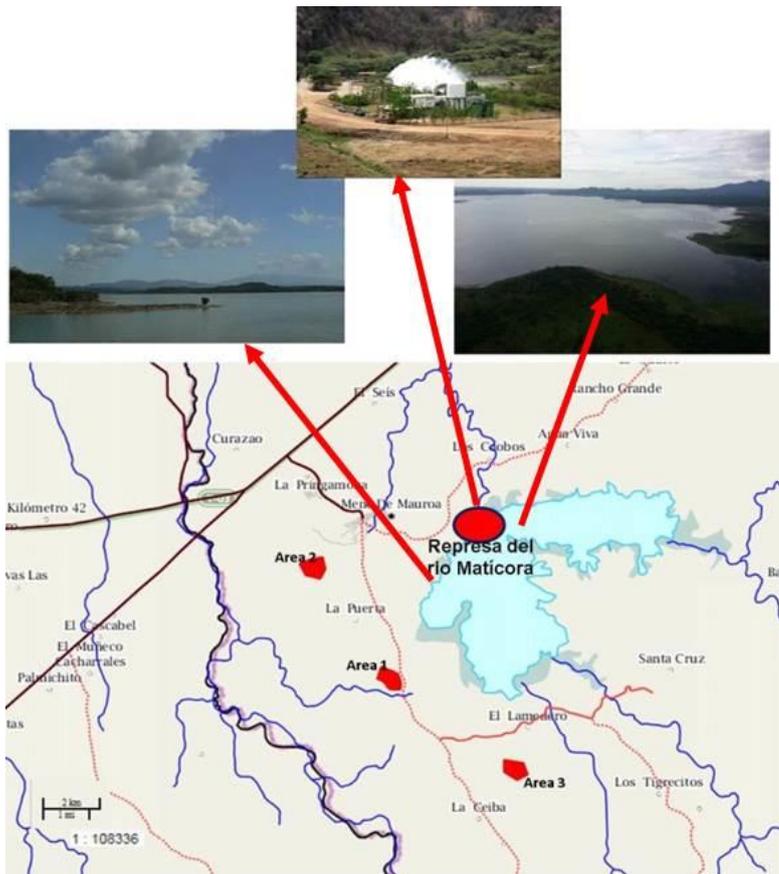


Figura 5. Infraestructura existente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Tablas (3-5) muestran los resultados de la evaluación de las tres áreas candidatas según los 19 criterios de selección. La Tabla 6 organiza las áreas por orden de mérito de manera descendente.

Tabla 3. Criterios de selección

No	Criterios de selección	Áreas alternativas (calificación)		
		ÁREA 1	ÁREA 2	ÁREA 3
1	Distancia a la población más cercana (m)	1 728	1 467	1 572
2	Distancia a granjas crianza de animales (m)	1 766	1 465	1 232
3	Distancia a aeropuertos (m)	>3 000	>3 000	>3 000
4	Área del terreno (m ²)	25,000	15,000	17,500

5	Vida útil	> 5 años	> 5 años	> 5 años
6	Uso actual del suelo y del área de influencia	Ganadería extensiva de caprinos y cultivos en zonas áridas	Ganadería extensiva de caprinos y cultivos en zonas áridas	Ganadería extensiva de caprinos y cultivos en zonas áridas
7	Propiedad del terreno	Pública	Privada	Privada
8	Distancia a vía de acceso principal, km	0	1,5	1,6
9	Pendiente del terreno	5 % a 15 %	5 % a 10 %	15 % a 25 %
10	Posibilidad del material de cobertura	Buena	Buena	Buena
11	Profundidad de la napa freática (m)	70 m - 120 m	90 m - 150 m	50 m - 110 m
12	Distancia a fuentes de agua superficiales (m)	1 560	3 500	2 420
13	Geología del suelo (permeabilidad)	8,250 x 10 ⁻⁵ m/seg	3,854 x 10 ⁻⁵ m/seg	6,027 x 10 ⁻⁵ m/seg
14	Opinión pública	Favorable	Favorable	Favorable
15	Área natural protegida por el estado	Se encuentra dentro del área natural protegida de la cuenca de los ríos Matícora y Cocuizas y dentro del área boscosa de protección de ambos ríos	Se encuentra dentro del área natural protegida de la cuenca de los ríos Matícora y Cocuizas y dentro del área boscosa de protección de ambos ríos	Se encuentra dentro del área natural protegida de la cuenca de los ríos Matícora y Cocuizas y dentro del área boscosa de protección de ambos ríos
16	Interés arqueológico	No incluyen áreas de interés arqueológico	No incluyen áreas de interés arqueológico	No incluyen áreas de interés arqueológico

17	Vulnerabilidad a desastres naturales	Amenaza de media a baja con un riesgo sísmico de medio a bajo	Amenaza de media a baja con un riesgo sísmico de medio a bajo	Amenaza de media a baja con un riesgo sísmico de medio a bajo
18	Dirección predominante del viento	NE	NE	NE
19	Existencia de barrera sanitaria natural	No	No	No

Cada variable fue calificada según el sistema de puntaje establecido, quedando resumida en la Tabla 4 la calificación de las variables para cada sitio alternativo.

Tabla 4. Calificación de alternativas

Item	Criterios de selección	Puntaje		
		ÁREA 1	ÁREA 2	ÁREA 3
1	Distancia a la población más cercana (m)	5	3	4
2	Distancia a granjas crianza de animales (m)	5	4	3
3	Distancia a aeropuertos (m)	5	5	5
4	Área del terreno (m ²)	5	5	5
5	Vida útil	5	5	5
6	Uso actual del suelo y del área de influencia	3	3	3
7	Propiedad del terreno	5	3	3
8	distancia a vía de acceso principal km	5	3	4
9	Pendiente del terreno	4	4	4
10	Posibilidad del material de cobertura	5	4	3
11	Profundidad de la napa freática (m)	5	4	3
12	Distancia a fuentes de agua superficiales (m)	5	4	4
13	Geología del suelo (permeabilidad)	5	4	4
14	Opinión pública	5	5	5
15	Área natural protegida por el estado	5	5	5
16	Área arqueológica	4	4	4
17	Vulnerabilidad a desastres naturales	1	1	3
18	Dirección predominante del viento	2	2	2
19	Cuenta con barrera sanitaria natural	1	1	1

Los valores ponderados para cada variable, producto de la ponderación y el peso por área, se muestran en la Tabla 5; en la Tabla 6 se muestra el orden de mérito de las alternativas analizadas.

Tabla 5. Ponderación de alternativas

Item	Criterios de selección	Peso Asignado %	Resultado obtenido (Calif. x Peso)		
			ÁREA 1	ÁREA 2	ÁREA 3
1	Distancia a la población más cercana (m)	7	35	21	28
2	Distancia a granjas crianza de animales (m)	4,5	22,5	18	13,5
3	Distancia a aeropuertos (m)	4,5	55,5	22,5	22,5
4	Área del terreno (m ²)	5	25	25	25
5	Vida útil	5	25	25	25
6	Uso actual del suelo y del área de influencia	6	18	18	18
7	Propiedad del terreno	4,5	22,5	13,5	13,5
8	Distancia a vía de acceso principal km	4	20	12	16
9	Pendiente del terreno	6,5	26	26	26
10	Posibilidad del material de cobertura	6	30	24	18
11	Profundidad de la napa freática (m)	7	35	28	21
12	Distancia a fuentes de agua superficiales (m)	7	35	28	28
13	Geología del suelo (permeabilidad)	8	40	32	32
14	Opinión pública	5	25	25	25
15	Área natural protegida por el estado	5	25	25	25
16	Área arqueológica	5	20	20	20
17	Vulnerabilidad a desastres naturales	5	5	1	1
18	Dirección predominante del viento	3	6	6	6
19	Cuenta con barrera sanitaria natural	2	2	2	2
Total		100	440	376	366

Tabla 6. Orden de mérito por cada alternativa

ORDEN DE MÉRITO	NOMBRE DEL ÁREA	PUNTAJE TOTAL
1	Area 1	440
2	Area 2	376
3	Area 3	366

4. DISCUSIÓN

El área 1, con un total de 440 puntos, satisface la mayoría de los requisitos analizados para ubicar el relleno sanitario, seguida del área 2, con un puntaje total de 376. Ambas cumplen con los parámetros de impermeabilidad de suelos, distancia de áreas urbanas, distancia de perímetro y suficiente material de cobertura. El área 3, con una calificación de 366 puntos, es considerada no adecuada para la ubicación del relleno sanitario, ya que el porcentaje de pendiente es mayor o igual al 20 %.

A partir de estos resultados se concluye que el área 1 es la que cumple los parámetros para la ubicación de relleno sanitario y presenta mejores facilidades por las siguientes consideraciones:

- La vida útil del sitio tiene la capacidad de recibir residuos sólidos por un período no menor de 10 años. El material para cobertura se encuentra en la cantidad adecuada y en el sitio de relleno, es decir, se tiene asegurada su procedencia, por lo que no se incrementarán los costos de manejo. En las tres áreas se cumple con este parámetro a cabalidad.
- La topografía cumple con el parámetro de pendiente (5 % y 15 %), no mayor al 18 %, con lo que se logra un mayor volumen aprovechable por hectárea.
- Presenta buenas vías de acceso, encontrándose en buenas condiciones en cualquier época del año.
- Los vientos dominantes soplan en sentido contrario (vienen del noreste) al urbanismo y los poblados, por lo que evitan posibles malos olores.
- La factibilidad de compra y costo de terreno en el área 1 no es un problema ya que pertenece a la municipalidad.
- La geología indica que el terreno está conformado por arcillitas, generalmente masivas, con contenido de material ferruginoso compacta de mediana plasticidad. El grado de meteorización de las litologías encontradas facilita el desarrollo de suelos arcillosos, apropiados como sello y cobertura.

- La evaluación hidrogeología de los pozos cercanos al sitio (área 1) indicó que la profundidad del nivel freático está entre 70 m y 120 m y los cursos de aguas superficiales están lo suficientemente retirados del área.
- El área 1 se encuentra dentro del área natural protegida de la cuenca de los ríos Matícora y Cocuizas y del área boscosa de protección de ambos ríos, por lo que corresponde a un área natural protegida por el estado. Esta condición le confiere mayor peso al área seleccionada pues en la actualidad la disposición final de los desechos sólidos se realiza a través de un botadero a cielo abierto, que se encuentra ubicado en la parroquia Mene de Mauroa y al obtener el mayor valor, analizando los criterios, se puede recuperar parte del deterioro ambiental causado en el entorno.
- La vulnerabilidad a desastres naturales en la zona indica que la misma está dentro de un área de amenaza de media a baja, con un riesgo sísmico de medio a bajo.

5. CONCLUSIONES

Aunque dos de las áreas analizadas (1 y 2) cumplen satisfactoriamente con los parámetros de impermeabilidad de suelos, distancia de áreas urbanas, distancia de perímetro y suficiente material de cobertura para ubicar el relleno sanitario, se sugiere el área 1 como la mejor alternativa para la disposición de los residuos, atendiendo a una mayor factibilidad técnica y ambiental.

6. AGRADECIMIENTOS

Al convenio Cuba-Venezuela, Maestría Geología Ambiental, por el financiamiento de este proyecto. A todas aquellas personas e instituciones que de una u otra manera aportaron a la realización de esta investigación.

7. REFERENCIAS

- ALLENDE, T. 2005: Estudio geológico-geotécnico en los proyectos de relleno sanitario. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- BAUTISTA, M.; ROSALES, C. & CONTRERAS, E. 2010: Guía para la selección de sitios potenciales para la ubicación de rellenos sanitarios por el método de peso y escala con el uso de álgebra de mapas. Trabajo de maestría. Consulta: 24 sept 2013. Disponible en: [http://app.jalisco.gob.mx/PortalTransparencia.Nsf/odosWeb/23B3AC7836E9D09B06257357000FF307/\\$FILE/Metodolog%C3%ADa%20de%20Relenos%20Sanitarios.pdf](http://app.jalisco.gob.mx/PortalTransparencia.Nsf/odosWeb/23B3AC7836E9D09B06257357000FF307/$FILE/Metodolog%C3%ADa%20de%20Relenos%20Sanitarios.pdf).

- DECRETO N° 230. 2010: **Normas Sanitarias para Proyecto y Operación de un Relleno Sanitario, República Bolivariana de Venezuela.** Disponible en: www.slideshare.net/harangu/legislacin-ambiental
- GUADALUPE, E.; ZEA, M.; VILLAFUERTE, I.; & FLORES, D. 2002: Estudio geológico-geotécnico para el relleno sanitario de Machu Picchu y pueblos aledaños. Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas 5(10): 25-33.
- LEY ORGÁNICA DEL AMBIENTE NO. 5 833. 2006: Gaceta Oficial Extraordinaria, República Bolivariana de Venezuela, 22 de diciembre.
- LEY ORGÁNICA PARA LA PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE LA ORDENACIÓN DEL TERRITORIO. 2005: Gaceta Oficial N° 38,263, 1 de septiembre.
- ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Disponible en: www.bvsde.paho.org/cursos/rsm/e/unidades/unidad3.pdf
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Washington, D. C. 2012: Criteria for municipal solid waste landfills. Disponible en: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2012-title40-vol26/xml/CFR-2012-title40-vol26-part258.xml#seqnum258.1>
- VILLAROSA, G.; OUTES, V.; DZENDOLETAS, M.; GROSFELD, J.; & PASTORE, H. 2011: Evaluación de sitios para la localización de un relleno sanitario. En: XVIII Congreso Geológico Argentino.
- VITALIS. 2013: Gente, Comunicación y Ambiente. Los residuos sólidos en Venezuela. Organización Ambiental No Gubernamental. Consulta: 11 nov 2014. Disponible en: <http://www.vitalis.net/>

Simón Enrique Morales-Soto, morales_simon@hotmail.com

Ingeniero en Sistemas. Profesor Asistente.
Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo.
Maracaibo, Venezuela

Alina Rodríguez-Infante, rinfante@ismm.edu.cu

Doctora en Ciencias Técnicas. Ingeniera Geóloga.
Profesora Auxiliar, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa,
Holguín, Cuba

Evaluación de la calidad físico-química de las aguas y sedimentos en la costa oriental del lago de Maracaibo

Jorge Luis Moronta-Riera
Amalia Beatriz Riverón-Zaldivar

Resumen

Esta investigación tuvo como propósito determinar la composición físico-química de las aguas y sedimentos del lago de Maracaibo en tres puntos de muestreo ubicados en Tía Juana, Lagunillas y Ceuta, para conocer el grado de contaminación y valorar la calidad del agua según los límites permisibles por el decreto 883. Se obtuvo concentraciones de hidrocarburos totales en el agua y los sedimentos mayores a las permisibles y se concluye que la principal causa de contaminación del lago es la actividad petrolera.

Palabras clave: lago de Maracaibo; calidad del agua; sedimentos; contaminantes.

Assessment of water and sediment physico-chemical composition in the west coast of Maracaibo lake

Abstract

The objective of this investigation was to determine the physical and chemical composition of the water streams and sediments of the Maracaibo Lake in three sampling areas located in Tía Juana, Lagunillas and Ceuta in order to know the level of contamination and assess water quality based on permissible values established by the 883 Decree. The results indicate that the overall hydrocarbon concentrations in the water and sediments are above permissible levels. It is concluded that petroleum prospection is the root cause of the lake contamination.

Keywords: Maracaibo Lake; water quality; sediments; pollutants.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema del lago de Maracaibo está conformado por el golfo de Venezuela, bahía El Tablazo, estrecho de Maracaibo, lago propiamente dicho y ríos tributarios. Las aguas del lago de Maracaibo han sufrido un cambio en su composición química desde 1938, cuando comienza una mayor intervención del hombre al sistema debido a las actividades de explotación petrolera. A partir del año 1956 se produce un incremento continuo en la concentración salina, a causa de la penetración de agua salina desde el golfo de Venezuela, convirtiendo las aguas del lago en no aptas para el consumo humano, riego o usos industriales.

Los principales problemas ambientales en el lago de Maracaibo están relacionados con la explotación económica de los recursos naturales (Morillo *et al.* 2010; Corona-Lisboa 2013). Los procesos de refinación y extracción del petróleo y gas natural (Carvajal & Oletta 2012) liberan desechos tóxicos altamente contaminantes, a lo que se suma el vertido de grandes cantidades de sustancias químicas y orgánicas que perturban las funciones ecológicas del estuario, reducen la biota, dañan el ecosistema acuático y contaminan los ríos tributarios (Benítez-Díaz & Miranda-Contreras 2013).

Estudios realizados en el sistema lago de Maracaibo indican que la presencia y concentraciones de metales pesados en los sedimentos provienen de fuentes que descargan directa o indirectamente en el sistema (Hermoso-Márquez & Márquez-Urdaneta 2005; López-Samper 2010). Las industrias petroleras contribuyen a la contaminación por metales pesados, pero también intervienen desechos de los grandes asentamientos humanos (González-Rojas 2009) de las ciudades de Maracaibo, San Francisco, Cabimas y Lagunillas.

El objetivo fue determinar la composición físico-química de las aguas y sedimentos de la costa oriental del lago de Maracaibo para evaluar el grado de contaminación. El estudio se realizó en la zona costera del lago, a partir de tres estaciones de muestreo, distribuidas en Tía Juana (1), Lagunillas (2) y Ceuta (3), las cuales coinciden espacialmente con las áreas de intensa actividad petrolera, agroindustrial, agropecuaria, comercial y humana, que se desarrollan en la zona.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación se utilizó la información de la campaña de muestreo de aguas y sedimentos en tres estaciones objeto de estudio: Tía Juana (1), Lagunillas (2) y Ceuta (3), realizada durante el mes de febrero 2011, en el período seco; llevada a cabo por la Gerencia de Operaciones Acuáticas y Dirección Ejecutiva de Ambiente, que incluye los

análisis físicos y químicos de las muestras, tanto de agua como de sedimentos.

Los datos aportados (Medina y Barboza 2006) fueron procesados en correspondencia con las relaciones y comportamiento de los parámetros físicos y químicos obtenidos, que permite determinar elementos contaminantes al comparar los valores obtenidos de cada elemento con los máximos permisibles, según el decreto 883 "Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos".

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados de las determinaciones físicas y químicas de las muestras de agua y sedimentos han permitido establecer la existencia de contaminantes en estos medios físicos.

3.1 Agua

Los parámetros físicos de las muestras de agua captadas a diferentes profundidades en las tres estaciones de muestreo establecen las siguientes relaciones:

3.1.1 Salinidad vs. conductividad

El comportamiento de la salinidad (Tabla 1) en las tres estaciones de muestreo evidencian uniformidad en las concentraciones salinas de las muestras superficiales y de fondo de las estaciones de Tía Juana (1) y Lagunillas (2), con mayor salinidad de la primera respecto a la segunda, pues la estación está más próxima a la entrada de agua salada en el lago a través del canal de navegación. Sin embargo, la salinidad más alta se encuentra en la zona de Ceuta (3). La conductividad mostró un comportamiento similar a la salinidad.

3.1.2 pH vs. Oxígeno disuelto

El pH es mayor a 7; en las estaciones de muestreo Tía Juana y Lagunillas aumentó el oxígeno disuelto y hubo una pequeña disminución del pH tanto en las muestras de fondo como de superficie, debido a la poca actividad fotosintética y al oleaje en las zonas. En la estación Ceuta existe una notable disminución del oxígeno disuelto respecto al pH, por el aumento considerable de materia orgánica y de la actividad fotosintética.

Tabla 1. Valores del muestreo en la costa oriental del lago de Maracaibo

Estación	Profundidad, m	Temperatura, °C	pH	Conductividad, mS/V	O ₂ disuelto	Salinidad, %
Tía Juana	0	30,8	8,03	4,47	8,3	2,36
	8	31,2	8,03	4,39	5,3	2,31
Lagunillas	0	30,4	7,64	4,344	8,3	2,29
	7	31,1	7,41	4,336	7,8	2,28
Ceuta	0	29,9	7,77	5,199	7,3	2,77
	30	32,5	7,2	10,34	0,7	5,8

3.1.3 Fósforo total vs. oxígeno disuelto

En la zona de Ceuta la mayor concentración de fósforo coincide con la menor concentración de oxígeno disuelto en el agua (Tabla 2), lo que evidencia una acumulación de materia orgánica producto de la falta de microorganismos que puedan eliminar el nutriente. En consecuencia esto hace que disminuya el oxígeno disuelto.

3.1.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO)

La Tabla 2 muestra valores constantes en las estaciones Tía Juana y Lagunilla. En Ceuta los valores de DBO y DQO son de 103 mg/L y 361 mg/L, respectivamente; indicando presencia de materia orgánica biodegradable, que no se elimina porque no existen suficientes microorganismos que oxiden metabólicamente la misma, por la influencia de las instalaciones petroleras. El elevado valor de la DQO en el fondo de Ceuta se debe a la presencia de materia orgánica con sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas.

3.1.5 Hidrocarburos totales vs. demanda bioquímica de oxígeno

Los valores de hidrocarburos totales en las estaciones de muestreo 1, 2 y 3 (Tabla 2) se encuentran por encima de los rangos permitidos en la norma de calidad de los cuerpos de agua. Se nota mayor presencia de hidrocarburos en la estación 3, que coteja con el aumento de la demanda biológica de oxígeno de esa zona, producto de la existencia de materia orgánica y de escasez de microorganismos capaces de llevar a cabo el proceso de oxidación metabólica de los hidrocarburos presentes en el medio.

Tabla 2. Resultados de los análisis de las muestras de agua

Límite o rango máximo admisible para cada elemento según el decreto 883					
	0,3 mg/L	---	---	< 1 mg/L	---
Estación	TPH (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	DET (mg/L)	P Total (mg/L)
1	3,09	2	11	<0,05	0,12
	2,65	<2,00	11	<0,05	0,11
2	2,92	2	12	<0,05	0,11
	3,54	2	11	<0,05	0,11
3	3,8	2	16	<0,05	0,11
	3,3	103	361	<0,05	1,58
Límite o rango máximo admisible para cada elemento según el decreto 883					
	3 000 mg/L	---	---	< 0,002 mg/L	10 mg/L
Estación	SDT (mg/l)	ST (mg/l)	SS (mg/L)	Fenoles (mg/L)	NO ₃ + NO ₂ (mg/L)
1	2 230	2 280	4	< 0,05	10,48
	2 224	2 350	4	< 0,05	3,09
2	2 254	2 274	6	< 0,05	24,05
	2 258	2 316	8	< 0,05	3,52
3	2 676	2 696	4	< 0,05	2,87
	5 748	6 500	32	< 0,05	2,63

3.1.6 Nitritos y nitratos

Al analizar el comportamiento de estos parámetros (Figura 1) en las diferentes estaciones de muestreo se observan dos valores medidos en superficie fuera del límite y rango establecido en el decreto 883, correspondiente a las estaciones de muestreo de Tía Juana y Lagunillas, lo cual evidencia aporte de materia orgánica en ambas zonas (Restrepo-Bermúdez y Contreras-Barajas 2005). Estos valores se atribuyen a la contaminación ocasionada por las descargas de aguas residuales generadas por los poblados de Cabimas, Tía Juana(1), Ciudad Ojeda(2) y Lagunillas(3), acotando la falta capacidad de manejo desde las plantas de tratamiento de Cabimas y Ciudad Ojeda, con capacidades de manejo de 1 100 L/s y 800 L/s, respectivamente.

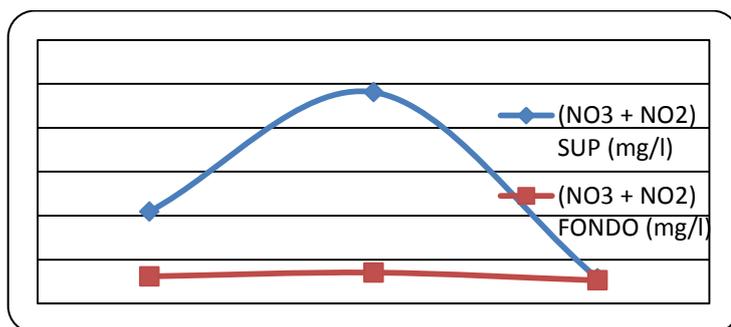


Figura 1. Comportamiento de nitritos+nitratos en superficie y fondo.

Entre los contaminantes que llegan a los cuerpos de agua se puede mencionar los metales pesados (cobre, mercurio, vanadio, plomo, cromo, entre otros), petróleo y sus derivados (fenoles, kerosene, diesel, gasolina, entre otros) y detergentes (Tabla 3).

Al revisar las concentraciones de metales pesados en agua y comparar con el decreto 883 se pudo evidenciar que la mayoría de elementos presenta valores dentro de los rangos permisibles, con excepción de las concentraciones de hierro y plomo encontradas en las medidas de fondo de las estaciones de muestreo Ceuta y Tía Juana, cuyos valores exceden los límites.

Tabla 3. Determinación de metales pesados en agua

		Límite o rango máximo admisible para cada elemento según el decreto 883						
		1,0 mg/L	0,75 mg/L	0,05 mg/L	1,0 mg/L	0,01 mg/L	0,05 mg/L	5,0 mg/L
Estación	Profundidad, m	Ba	B	Cr	Fe	Hg	Pb	Zn
1	0	0,027	<0,30	<0,001	0,027	<0,001	0,007	<0,001
	8	0,03	<0,30	0,003	0,067	<0,001	0,208	0,057
2	0	0,03	<0,30	<0,001	0,046	<0,001	0,004	<0,001
	7	0,03	<0,30	<0,001	0,047	<0,001	0,007	<0,001
3	0	0,027	<0,30	<0,001	0,011	<0,001	0,004	<0,001
	30	0,1	0,729	0,005	1,64	<0,001	0,02	0,016

3.2 Sedimentos

3.2.1 Concentraciones de metales pesados

A continuación se presentan los porcentajes en peso de hidrocarburos totales obtenidos en cada estación de muestreo (Tabla 4), así como también la cantidad de miligramos por kilogramo de sedimento de cada metal pesado analizado.

Tabla 4. Resultados de la determinación de metales pesados en sedimento

	% en peso	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Estación	TPH	As	Ba	Cr	Pb	Zn	V
1	0,69	1,8	29	23	7	86	41
2	0,23	<1,0	126	2,8	3,46	103	2,75
3	0,31	4,55	269	16	26	149	32

Al revisar las concentraciones de metales presentes en el sedimento se pueden establecer las siguientes relaciones:

Estación 1 Tía Juana: En lo relativo a los sedimentos vale destacar los niveles más bajos de bario en sedimentos, que contrastan con los más altos reportados para el cromo y vanadio.

Estación 2 Lagunillas: En cuanto a los sedimentos existen diferencias notables en relación a la estación de Tía Juana, ya que los niveles de cromo y vanadio resultaron más bajos, a diferencia del zinc y el bario que reportaron niveles relativamente altos en comparación con las demás estaciones.

Estación 3 Ceuta: En cuanto a los metales en sedimentos también se presentaron los registros más altos de zinc (149 mg/kg) y plomo (25 mg/kg) en la fracción sólida.

Los resultados de los análisis de las muestras de agua tomadas en cada punto de muestreo determinaron que las concentraciones mayores de demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, fósforo total y sólidos totales se presentan en el fondo de la estación Ceuta. Así mismo, se detectaron concentraciones de nitritos+nitratos por encima de los límites permisibles en las zonas de Tía Juana y Lagunillas.

En lo que respecta a la presencia de metales en agua se detectaron concentraciones de hierro y plomo en fondo, las cuales exceden los límites establecidos para la calidad del agua. Por otro lado, las mayores concentraciones de los metales: arsénico, bario, plomo y zinc se encontraron en las muestras de sedimento del área de Ceuta. De igual manera, las máximas concentraciones de cromo y vanadio se detectaron en la estación ubicada en Tía Juana.

Los resultados de TPH obtenidos en las tres estaciones de muestreo exceden las concentraciones máximas permitidas en las normas de calidad del agua así como la presencia de metales pesados en el agua, lo cual se atribuye a la explotación y extracción de hidrocarburos en la zona de la costa oriental del lago.

También la investigación permitió definir las causas de estos contaminantes pues, en el caso de la zona de Tía Juana, representa un área de gran actividad para la extracción y procesamiento de petróleo en la costa oriental del lago; existe un alto desarrollo urbano e industrial que genera altos niveles de polución en las descargas litorales, las cuales en su mayoría carecen de sistemas de tratamiento adecuado.

Por otro lado, Lagunillas se encuentra en el centro del eje de la costa oriental del lago y, al igual que Tía Juana, posee una alta actividad petrolera e industria; existe una gran cantidad de instalaciones, muchas de ellas abandonadas por las empresas transnacionales que operaron largo tiempo en la zona, lo que las ha convertido en pasivos ambientales.

La región de Ceuta es considerada como el sumidero del lago, debido a que allí se depositan la mayoría de los productos de desecho que arrastran las corrientes lacustres y es donde se presentan las mayores profundidades (alrededor de 34 m). En esta área existe una masa de agua, denominada como hipolimnético, que se caracteriza por condiciones de anoxia y altas salinidades debido a que el agua de mayor densidad limita la circulación vertical y, por tanto, el intercambio de oxígeno.

4. CONCLUSIONES

- En las tres estaciones de muestreo las concentraciones de TPH son mayores a las permisibles y los niveles de nitritos y nitratos superan los 10 mg/L, evidenciándose contaminación por vertido de aguas residuales al lago.
- Los resultados físico-químicos demuestran que la principal causa de contaminación del lago de Maracaibo es la actividad petrolera en su costa oriental y el alto desarrollo urbano e industrial de sus áreas aledañas, que genera altos niveles de polución en las descargas litorales que, en su mayoría, carecen de sistemas de tratamiento adecuado.

5. REFERENCIAS

BENÍTEZ-DÍAZ, P. & MIRANDA-CONTRERAS, L. 2013: Contaminación de aguas superficiales por residuos de plaguicidas en Venezuela y otros países de

- Latinoamérica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 29: 7-23
- CARVAJAL, A. C. & OLETTA, L. J. F. 2012: Derrames petroleros y sus efectos sobre la ecología y la salud humana. *Noticia Epidemiológica* Nº 35: 40 p. Red de Sociedades Científicas Médicas Venezolanas.
- CORONA-LISBOA, J. L. 2013: Contaminación antropogénica en el lago de Maracaibo, Venezuela. *Biocenosis* 27(1-2).
- GONZÁLEZ-ROJAS, G. J. 2009: *El ecodiseño en el marco de un modelo de gestión ambiental para el manejo de efluentes industriales y domésticos en el lago de Maracaibo, estado Zulia-Venezuela*. Tesis doctoral. Tecana American University. 123 p.
- HERMOSO-MÁRQUEZ, D. & MÁRQUEZ-URDANETA, M. G. 2005: *Evaluación de las concentraciones de metales pesados en tejidos de peces del Río Catatumbo y sus afluentes*. José Ferrer y Miriam Sánquiz (Tutores). Tesis de grado. Universidad Rafael Urdaneta. 116 p.
- LÓPEZ-SAMPER, A. M. 2010: *Relación bacterias hidrocarbonoclasticas/bacterias heterótrofas totales como índice del impacto ambiental por hidrocarburos en el estrecho del lago de Maracaibo*. Luz Marina Soto (Tutora). Tesis de maestría. Universidad del Zulia. 51 p.
- MEDINA, E. & BARBOZA, F. 2006: Lagunas costeras del lago de Maracaibo: distribución, estatus y perspectivas de conservación. *Ecotrópicos* 19(2): 128-139.
- MORILLO, G.; JONTE, L.; ARAUJO, I.; ANGULO, N.; HERRERA, L. & MORALES, E. 2010: Efectos del nitrógeno y cloruros en la dinámica del fitoplancton del lago de Maracaibo, Venezuela. *Interciencia* 35(8): 575-580.
- RAMÍREZ-YANES, A. M. 2004: La Lenteja de Agua-Lemna en el lago de Maracaibo. PlaniGestión, C.A.: 18 p.
- RESTREPO-BERMÚDEZ, A. & CONTRERAS-BARAJAS, J. A. 2005: *Determinación de los aportes de nitrógeno y fósforo de los efluentes líquidos de las empresas del sector alimenticio, vertidos al lago de Maracaibo*. José Ferrer (Tutor). Tesis de grado. Universidad Rafael Urdaneta. 109 p.

Jorge Luis Moronta-Riera, jmoronta@hotmail.com

Profesor. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo, Venezuela.

Amalia Beatriz Riverón-Zaldivar, briveron@ismm.edu.cu

Máster en Ciencias. Ingeniera Geóloga. Profesora Auxiliar.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

Microestructura de una unión disímil AISI 321 y una aleación A 351 grado HK-40 obtenida mediante soldadura manual por arco eléctrico

Reilis Fuentes-Guilarte
Tomás Fernández-Columbié,
Orlando Gámez-Córdova
Neury Durán-Batista

Resumen

El objetivo fue establecer el comportamiento microestructural de una unión disímil de acero inoxidable austenítico AISI 321 y de la aleación A 351 grado HK 40 obtenida por fundición mediante soldadura manual por arco eléctrico y electrodos revestidos del tipo E 309 L-16. La estructura ferrita-austenita que se forma en la unión del acero con la aleación es resultado del elevado contenido de carbono de la segunda. La baja velocidad de enfriamiento del cordón de soldadura revela ausencia de discontinuidades en el retículo cristalino de la zona afectada térmicamente y atenúa la formación de carburos de cromo del tipo $Cr_{23}C_6$, que puede formar la aleación A 351 grado HK 40 durante la difusión del volumen de fracción en masa del cromo.

Palabras clave: acero austenítico; aleaciones; soldadura; análisis microestructural; ciclo térmico.

Microstructure of a dissimilar AISI 321 joint and an A 351 grade HK-40 alloy resulting from manual electric arc welding

Abstract

The objective of this investigation was to establish the microstructural behavior of a dissimilar AISI 321 austenitic stainless steel alloy and an A 351 grade HK 40 alloy by conducting an electric arc welding manually and lined electrodes E 309 L – 16 type. The ferrite-austenite structure resulting from welding steel with the alloy is attributable to a high content of carbon in the alloy. Low cooling velocities of the welding beam reveals the absence of discontinuities in the crystalline reticule of the thermal affected zone and reduces the formation of chrome carbides of $Cr_{23}C_6$ types that can be formed in the A 351 grade HK 40 alloy during the massive diffusion of the chrome fraction volume.

Keywords: austenitic steel; alloys; welding; thermal cycle, microstructure.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidable se diferencian de los demás aceros durante el proceso de soldadura por los cambios morfológicos que sufren cuando se le aplica el ciclo térmico de soldadura. Estos cambios son notables por la predicción de la microestructura, por las características de la zona afectada por el calor y por la evolución de la microestructura en la zona de fusión (Alpizar 2003; Ricaurte, Aguirre & Parra 2007).

Generalmente, las bajas temperaturas de transformación promueven una fina precipitación de la fase ferrita, debido a que se incrementa la nucleación de esta y la velocidad de crecimiento de grano disminuye en función del decremento de la temperatura de transformación, por lo tanto, la ferrita de grano fino es producida a bajas temperaturas de transformación.

Cuando la nucleación de la fase ferrita toma lugar en los bordes de grano de la fase austenita, la transformación de austenita a ferrita es facilitada al incrementarse las áreas de los bordes de grano de la fase austenita (Babakr *et al.* 2008).

Los cambios microestructurales en el metal de soldadura suceden durante el enfriamiento; en condiciones de movimiento restringido, las zonas que se vieron durante la deformación plástica en caliente resultan cortas para ocupar los nuevos espacios alcanzados y aparecen entonces tensiones térmicas de tracción. Al alcanzarse la temperatura ambiente habrán quedado tensiones térmicas permanentes de tracción cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material. Sin embargo, las microestructuras resultantes difieren de las transformaciones antes mencionadas debido al comportamiento no isotérmico de los procesos de soldadura (Fernández-Columbié *et al.* 2014).

Los aceros inoxidable fundidos suelen ser divididos en dos grupos: los termorresistentes, pertenecientes a la serie H, y los resistentes a la corrosión, pertenecientes a la serie C. El 52 % del total de la producción mundial de aceros inoxidable son aceros austeníticos inoxidable al cromo-níquel (Mendoza-Bravo 2011). La selección de estos materiales para aplicaciones que requieran resistencia a la corrosión a altas temperaturas demanda de un conocimiento profundo sobre los mecanismos y la cinética de la formación de capas superficiales, su composición química, estructura y mecanismos de difusión. Estos factores, y otros que están estrechamente relacionados con las propiedades mecánicas y estructurales a altas temperaturas, permiten la adecuación del acero para usos específicos.

Importantes contribuciones al conocimiento de algunas de las regularidades manifestadas en roturas de componentes fabricados con aceros fundidos de la serie H realizó Ebert (1976). El autor se refiere a problemas de agrietamiento en tubos de hornos de pirólisis fabricados de la aleación A 351 grado HK 40 durante procesos de recuperación por soldadura a la intemperie y los efectos de las fases de carburos en la reducción de la ductilidad de la aleación a temperatura ambiente como consecuencia de la exposición de la aleación a elevadas temperaturas durante tiempos prolongados.

Velázquez y otros investigadores (2001) analizan la microestructura y propiedades de las aleaciones HH y HK-40 ante los procesos de carburación y nitruración en los rangos de temperaturas desde 750 °C hasta 1 000 °C. Sus estudios de la cinética y la termodinámica de las posibles reacciones en estas aleaciones precisan sobre la formación de carburos de cromo después de la carburación, mientras que la nitruración da lugar a la formación de nitruros de cromo. Aunque no se abordan problemas asociados al proceso de soldadura, los autores concluyen que una de las características fundamentales de la aleación AISI HK-40 es su elevada resistencia a las altas temperaturas.

La evolución microestructural de la zona afectada térmicamente (ZAT) en los aceros inoxidables depende de factores como la microestructura del metal base, la temperatura pico que se alcanza y las velocidades de calentamiento y enfriamiento. La Figura 1 esquematiza las diferentes regiones en la ZAT; en la zona supercrítica es donde ocurre el crecimiento de grano, por lo que es considerada como la región más frágil de la ZAT.

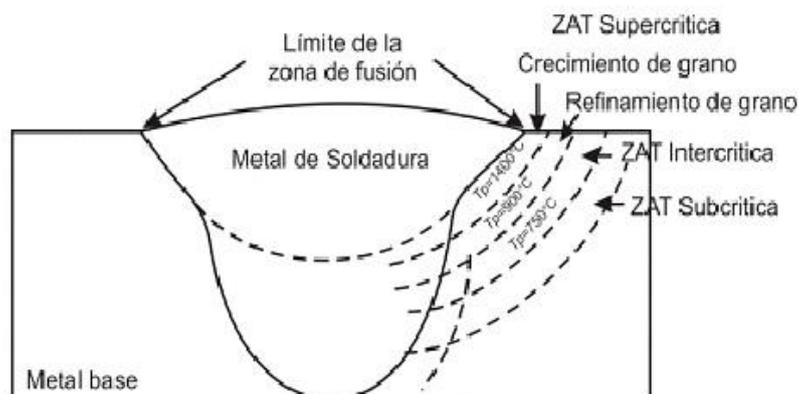


Figura 1. Regiones de la ZAT en los aceros.

Generalmente, la microestructura resultante en la ZAT es diferente a la que presenta el metal base, pero muy parecidas a la del metal de soldadura en los aceros inoxidables. La ZAT se presenta en una región estrecha difícil de

distinguir. La formación de la ZAT puede ser explicada en función de los ciclos térmicos y sobre la base de estos y de las temperaturas a las que estén expuestos puede dividirse en tres regiones (Kotecki y Lippold 2013).

Los parámetros estructurales relacionados con la tenacidad son el tamaño de grano de la ZAT y la fracción volumétrica de las islas de martensita-austenita, lo que se conoce como constituyente M-A (Martínez-Conesa *et al.* 2010).

El objetivo de este trabajo fue establecer el comportamiento microestructural de una unión disímil de acero inoxidable austenítico AISI 321 y de la aleación A 351 grado HK 40 obtenida por fundición mediante soldadura manual por arco eléctrico y electrodos revestidos del tipo E 309 L-16.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1. Preparación de las muestras

Se prepararon dos cupones de AISI 321 y dos de la aleación A351 grado HK- 40 con bordes a 60° y dimensiones de 12 mm de espesor, 150 mm de ancho y 440 mm de longitud; el depósito de los cordones para la junta disímil se realizó en posición plana.

Seguidamente se puntearon las dos parejas de planchas y se le colocaron placas de los mismos materiales en los extremos; finalmente se procedió a la soldadura con electrodo revestido E 309 L-16, mediante soldadura manual por arco eléctrico (SMAW). La máquina de soldar empleada fue un transformador del tipo Miller, con una alimentación primaria (tensión) monofásica de 230 V y un consumo primario de intensidad máxima de 19-29 A. El diámetro del electrodo empleado fue de 3,2 mm.

2.2. Análisis microestructural

Consistió en la observación de una muestra patrón de los materiales empleados en el proceso de unión. El procedimiento para el análisis consistió en un conjunto de operaciones de corte, desbaste, pulido y ataque químico de las muestras. Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL, modelo NIM-100, dotado de una cámara fotográfica instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador.

Las microestructuras obtenidas se emplearon para establecer el comportamiento del material de las muestras después de efectuado el proceso de soldadura y determinar el comportamiento microestructural, tanto en la zona fundida (ZF) como en la zona de influencia térmica (ZIT), según fue establecido por Correa-Suárez y demás investigadores (2014).

La microestructura de la Figura 2 se corresponde con la estructura del acero AISI 321, la cual está compuesta por una estructura completamente austenítica. La microestructura de la Figura 3 corresponde a la aleación A 351 grado HK 40 luego del proceso de austenizado, a una temperatura de 1 150 °C. Está compuesta por una estructura esquelética de carburos y segregaciones que se forman durante el proceso de solidificación, típico del acero austenítico A 351 grado HK 40.

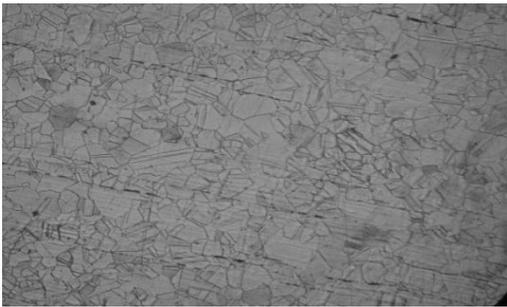


Figura 2. Microestructura del acero AISI 321

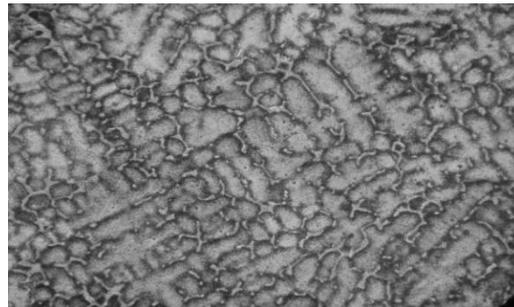


Figura 3. Microestructura de la aleación A 351 grado HK 40

2.3. Cálculo del ciclo térmico

El conocimiento del ciclo térmico permite determinar, en función de la energía aportada (*heat input*), los cambios microestructurales así como las tensiones residuales; condiciones necesarias para predecir la variación de la tenacidad.

- Intensidad de corriente

La intensidad de la corriente de soldadura depende del diámetro del electrodo, el espesor del material base, el tipo de revestimiento y la posición del cordón en el espacio. Factores que influyen en la magnitud de la intensidad I_s , según Alpizar (2003), se determina como:

$$I_s = (20 + 6d_e)d_e \quad (1)$$

Donde:

I_s - intensidad de corriente de soldadura, A;

d_e - diámetro del electrodo, mm.

- Voltaje del arco eléctrico

La tensión de arco no influye significativamente en el ancho del cordón, pero determina notablemente en el refuerzo (forma cóncava o convexa del mismo), teniéndose soldaduras planas (con tensiones altas) y abultadas (con tensiones bajas), siempre en el rango de tener un arco estable. Este

valor se estableció a través del registrado en el voltímetro de la máquina de soldadura Miller 250 durante el proceso.

- Velocidad de soldadura

La velocidad de desplazamiento durante el soldeo debe ajustarse de tal forma que el arco adelante ligeramente el baño de fusión. Cuanto mayor es la velocidad de desplazamiento menor es la anchura del cordón, menor es el aporte térmico y más rápidamente se enfriará la soldadura. Si la velocidad es excesiva se producen mordeduras, se dificulta la retirada de la escoria y se favorece el atrapamiento de gases (produciéndose poros).

$$v_s = \frac{\alpha_d \cdot I_s}{F \cdot \rho} \quad (2)$$

Donde:

v_s - velocidad de soldadura, cm/min;

α_d - coeficiente de aporte, g/A. h ($\approx 10\% I_s$);

F - área de la sección del cordón, cm²;

ρ - densidad del material fundido, g/cm³;

- Energía lineal del proceso de soldadura

Haciendo particular referencia a la soldadura por arco, se aprecia que en este proceso se emplea un arco voltaico para aplicar calor en una zona altamente localizada y producir la fusión de una pequeña zona de las piezas coincidentes con el arco y el extremo del electrodo. La energía, aporte térmico o calor aportado por una soldadura de arco eléctrico, queda determinada por la expresión:

$$H_{net} = \eta \frac{U_a \cdot I_s}{v_s} \quad (3)$$

H_{net} - energía lineal, aporte térmico o calor aportado, J/m;

η - rendimiento de la transferencia de calor de la fuente de energía, %.

La eficiencia (η) del proceso de soldadura SMAW oscila entre 0,7 a 0,85 (Muñoz 2009). A los efectos de los cálculos realizados se asumió una eficiencia de 0,65.

2.4. Cálculos numéricos para la soldadura por arco eléctrico

El cálculo de la longitud del charco de soldadura mostrará el radio efectivo de la distribución del calor y de su influencia en la zona afectada por el calor (Suárez 2013); se determina como:

$$L_l = \frac{Q}{2\pi\lambda(T_c - T_0)} \quad (4)$$

Donde:

L_l - longitud del charco de soldadura, m;

Q - energía específica entrante, W;

λ - conductividad térmica, W/m K;

T_c - temperatura crítica, K;

T_0 - temperatura inicial, K.

Para el cálculo de la energía específica entrante se emplea la siguiente ecuación:

$$Q = H_{net} \cdot l \quad (5)$$

Donde:

H_{net} - energía de calórica en julio por metro lineal de soldadura, J/m;

l - longitud a soldar, m.

- Velocidad de enfriamiento del cordón

Yu (2007) propone determinar la velocidad de enfriamiento del cordón a partir del parámetro adimensional espesor relativo de la placa, el cual permite determinar cuándo considerar un flujo en dos o tres dimensiones y del tipo de placa; su expresión matemática es:

$$\tau = d \sqrt{\frac{\rho C_e (T_c - T_0)}{H_{net}}} \quad (6)$$

Donde:

τ - parámetro adimensional de espesor relativo de la placa;

d - espesor de la placa, m;

C_e - calor específico, J/kg K.

La velocidad de enfriamiento para una placa gruesa está dada por:

$$R = \frac{2\pi\lambda(T_c - T_0)^2}{H_{net}} \quad (7)$$

El tiempo de enfriamiento del cordón se determina por la ecuación 8.

$$t = \eta \frac{I_s^{(1,24+0,0005T_c-0,005v_s)} \cdot U_a^{0,59}}{108 \cdot v_s^{(0,78-0,0005T_c)}} \quad (8)$$

3. RESULTADOS

3.1. Regímenes de soldadura

La tensión del arco necesaria para realizar el proceso de soldadura fue de 28 V, siendo esta magnitud permisible dentro de los parámetros SMAW, que es de 25 V a 35 V. La velocidad de soldadura determinada fue de 22,65 mm/s. El valor obtenido para la energía lineal es de 89,28 J/mm.

3.2. Análisis de los cálculos numéricos

Para una temperatura de fusión de 1 450 °C y una temperatura ambiente de 34 °C se tiene que la longitud de unión es de 0,44 m, por lo que el resultado de la energía entrante es de 39 283,2 W y la longitud del charco es de 270 mm.

El parámetro espesor relativo de la placa τ es de 2,316. Se considera como espesor de placa gruesa. La velocidad de enfriamiento del cordón, a la cual solidifica la aleación AISI 321 con la aleación A 351 grado HK 40, es de 0,95 k/s, por lo que el tiempo de enfriamiento del cordón será de 39,25 min.

3.3. Análisis de las microestructuras de la soldadura disímil

Las microestructuras de las uniones soldadas disímiles con preparación de bordes 60° en la región de la ZAT, de la aleación del tipo AISI 321 y de la aleación A 351 grado HK-40, son mostradas en la Figura 4.

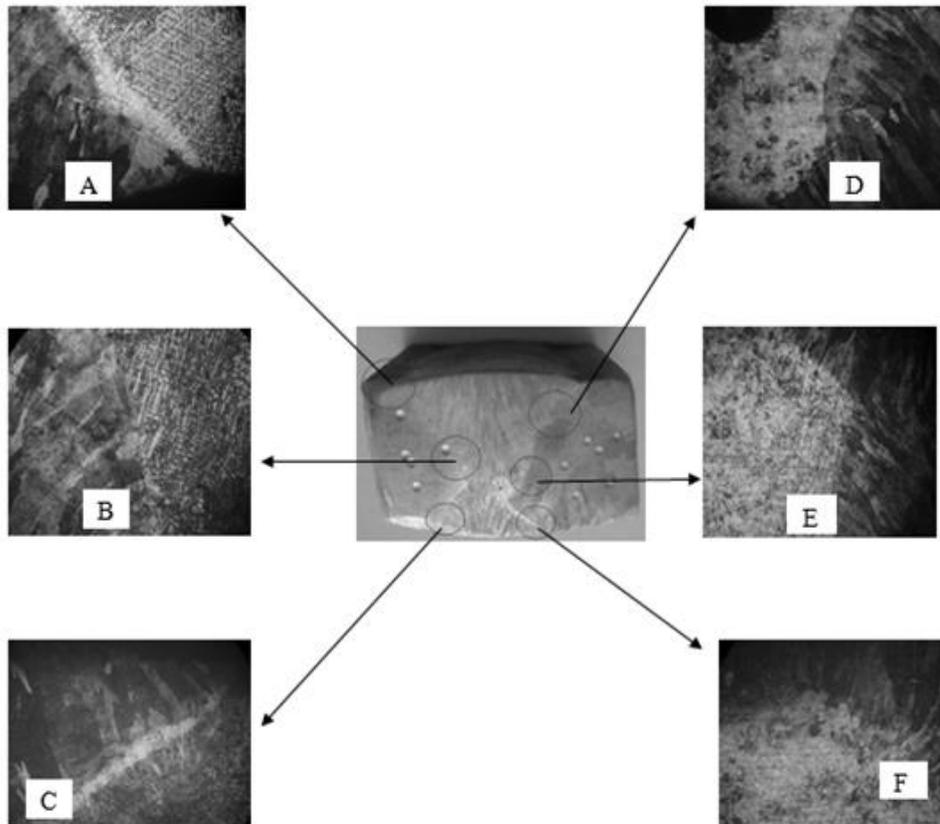


Figura 4. Microestructuras de la unión disímil A 351 grado HK 40-AISI 321.

En las microestructuras analizadas se puede apreciar en la zona de interfase del depósito superior (microestructuras A; B; D y E) la formación de una estructura del tipo de ferrita en el límite de grano.

Esta ferrita, que se ha formado en el límite de grano entre la unión del acero HK 40 ($C=0,45$) y el acero AISI 321 ($C=0,05$), es relativamente estable y resiste la transformación de la austenita durante el enfriamiento de la soldadura, puesto que se enriquecen de los elementos formadores de ferrita.

La microestructura en la Figura 4 (A y B) exhibe ferrita a lo largo de los límites de subgranos de solidificación con la formación de una morfología de ferrita *lathy* y una solidificación austenita-ferrita (AF) se muestra en la Figura 4 (D y E). Se aprecia que debido a esta existe solidificación de austenita primaria, aunque la subestructura de solidificación es realmente aparente.

Las microestructuras obtenidas en el depósito inferior (C y F) representan la formación de microestructuras de una matriz de ferrita con austenita en los límites de grano y placas de austenita Widmanstätten que nuclean en los límites de grano de la austenita o dentro de los granos de la ferrita.

La formación de las microestructuras obtenidas es debido a las velocidades de enfriamiento que fueron altas, producto del segundo depósito de soldadura en el lado opuesto de la preparación de la junta soldada con preparación de bordes a 60°; además por la relación C_{req}/Ni_{eq} que aumenta dentro del intervalo ferrita-austenita (FA), provoca la formación de una morfología de ferrita conocida como listón (*lathy*). La morfología listón se forma en lugar de la morfología esqueleto, debido a la difusión durante la transformación de ferrita a austenita; este fenómeno fue analizado también por García (2012).

Cuando se reducen las distancias la difusión es más eficiente y la transformación resulta en listones firmemente espaciados, con ferrita residual que corta a través de la dendrita original o en dirección del crecimiento celular. En la región de grano grueso la ferrita proeutectoide nuclea en las juntas del grano austenítico y forma también agujas dirigidas hacia el interior de los granos grandes existentes. Por lo tanto, las propiedades mecánicas de la ZAT deben variar con respecto al acero base y se notará un cambio en la dureza y resistencia a la tensión, lo que fue reportado además por autores como Kotecki y Lippold (2013).

4. CONCLUSIONES

- La zona afectada térmicamente se caracteriza por una estructura del tipo ferrita en el límite del grano. La estructura ferrita-austenita, que se forma en la unión de un acero laminado AISI 321 y un acero A 351 grado HK 40, es resultado del elevado contenido de carbono que presenta esta última aleación.
- La baja velocidad de enfriamiento del cordón de soldadura revela que no hay discontinuidades en el retículo cristalino de la ZAT, así como que se atenúa la formación de carburos de cromo del tipo $Cr_{23}C_6$ que pueden formar la aleación A 351 grado HK 40 durante la difusión del volumen de fracción en masa del cromo.

5. REFERENCIAS

- ALPÍZAR, E. 2003: Determinación de tecnologías de soldadura por arco eléctrico. Ed. Unversitaria. Universidad de Matanzas. Cuba.
- BABAKR, A. M.; AL-AHMARI, A.; AL-JUMAYIAH, K. & HABIBY, F. 2008: Sigma Phase Formation and Embrittlement of Cast Iron-Chromium-Nickel (Fe-Cr-Ni) Alloys. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering* 7(2): 127-145.

- CORREA-SUÁREZ, R.; FERNÁNDEZ, T.; RODRÍGUEZ, I. & ALCÁNTARA, D. 2014: Comportamiento microestructural de una aleación TI-6 AL-4 V empleada en pulpa lixiviada. *Ingeniería Mecánica* 17(1): 22-31.
- EBERT, H. 1976: Fabrication of HK 40 in the Field. *Welding Journal* 55(11).
- GARCÍA, A. 2012: *Crecimiento de grietas en uniones soldadas a tope de aceros disímiles ante cargas cíclicas*. Alberto Velázquez del Rosario (Tutor). Tesis doctoral. Caracas, Venezuela.
- KOTECKI, D. J. & LIPPOLD, J. 2013: Welding metallurgy and weldability of stainless steels. *Journal of Materials Processing and Technology*. Versión 1: 474-483.
- MARTÍNEZ-CONESA, E. J.; ESTREMS, M. MIGUEL, V. 2010: Desarrollo de un modelo matemático de diferencias finitas para el análisis del campo de temperaturas en la soldadura por arco de chapas finas de acero inoxidable. *Revista Metalurgia* 46(2): 511-519.
- MENDOZA-BRAVO, I. 2011: *Estudio de la unión soldada disímil de un acero inoxidable superduplex SAF 2507 con un acero HSLA API X-52*. Tesis doctoral. Coahuatemoc Maldonado (Tutor). Morelia, México.
- FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, I.; CORREA-SUÁREZ, R. & ALCÁNTARA-BORGES, D. 2014: Junta de soldadura disímil de la aleación HK- 40 y del hierro fundido 24. *Ingeniería Mecánica* 17(2): 98-107.
- RICOURTE, O.; AGUIRRE, H. & PARRA, H. 2007: Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disímiles. *Scientia et Technica* 13(34): 273-278.
- VELÁZQUEZ, A.; MARIÑO, M.; ALFONSO, E. & FELIÚ, M. 2001: Comportamiento de las aleaciones termorresistentes AISI HH y HK-40 ante los procesos de carburización y nitruración. *Minería & Geología* 18(1): 83-87.
- YU, C. 2007: Corrosion behaviour of thermo hydrogen processed Ti-6 Al-4 V, *Scripta Materialia* 56(43).

Reilis Fuentes-Guilarte, Rfuentes@emni.moa.minem.cu
Empresa Comandante "Gustavo Machin Hoed De Beche"
Carretera Sagua de Tánamo km 11/2 Moa, Cuba

Tomás Fernández-Columbié, tfernandez@ismm.edu.cu
Dr. Ciencias e Ingeniería de Materiales y Procesos de Manufactura.
Profesor Titular. Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

Orlando Gámez-Córdova, ogamez@emni.moa.minem.cu
Empresa Comandante "Gustavo Machin Hoed De Beche"
Carretera Sagua de Tánamo km 11/2 Moa, Cuba

Neury Durán-Batista, nduran@emni.moa.minem.cu
Empresa Comandante "Gustavo Machin Hoed De Beche"
Carretera Sagua de Tánamo km 11/2 Moa, Cuba

Procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor

Amauris Gilbert-Hernández
Yoalbys Retirado-Mediateja
Héctor L. Laurencio-Alfonso
Amaury Palacios-Rodríguez
Ever Góngora-Leyva

Resumen

Se desarrolló un procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor. Una revisión bibliográfica permitió determinar, en las investigaciones precedentes, limitaciones relacionadas con la selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías al ser aplicadas a los sistemas de transporte con trazas de vapor; ello condujo a la obtención del modelo para el cálculo de la pérdida total de calor. El procedimiento toma en cuenta criterios económicos en la selección del espesor y fija como el espesor óptimo aquel que garantiza el costo total mínimo al establecer un balance entre los costos de las pérdidas energéticas y los costos de inversión.

Palabras clave: tuberías; espesor óptimo económico; aislamiento térmico; trazas de vapor.

Procedure for the selection of maximum pipe thickness for efficient thermal insulation in piping with steam trace

Abstract

A procedure for the selection of maximum pipe thickness to achieve efficient thermal insulation in piping with steam tracing was developed. The bibliographical review allowed identifying the limitations of previous investigations with regard to the selection of pipe thickness in transfer systems with steam tracing. The model for calculating the overall lost heat was prepared. The procedure considers economic criteria for the selection of pipe thickness and established an optimal thickness value which guarantees a total minimum cost by establishing a balance between the expenditures resulting from heat loss and the project costs.

Keywords: pipelines; maximum thickness; thermal insulation; steam trace.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de un espesor de aislamiento térmico obedece, en algunos casos, a condiciones exclusivamente técnicas, pero las inversiones en aislamiento poseen un carácter económico. Por ello es necesario introducir criterios económicos en la elección adecuada del aislamiento, generalmente en la determinación del espesor (Figura 1), ya que el costo total será mínimo precisamente para el espesor óptimo económico (Isover 2004a; Isover 2004b; Idae 2007; Conuee 2008; Cener 2012).

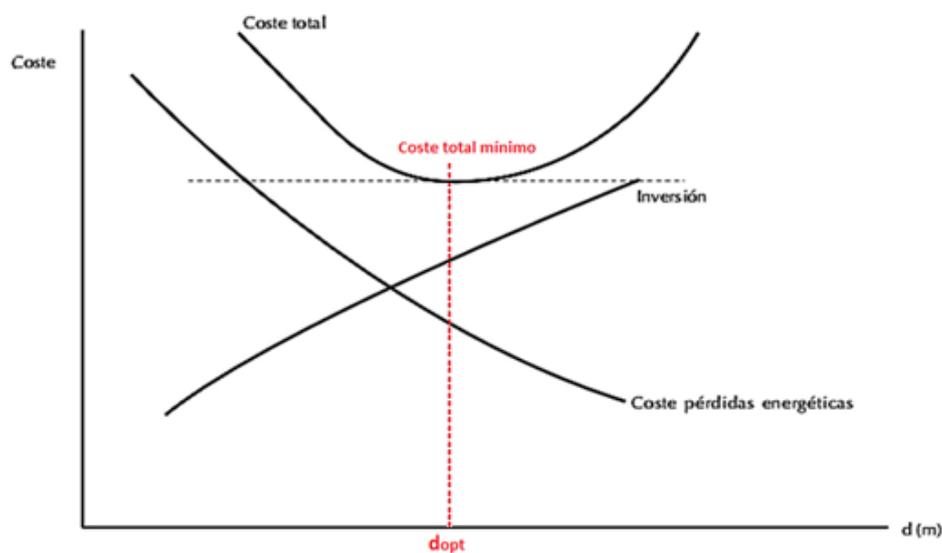


Figura 1. Método de selección del espesor óptimo económico de aislamiento.
Fuente: Isover, 2004a.

La existencia de un espesor óptimo de aislamiento para los sistemas radiales (tuberías sin trazas) es explicada por la presencia de efectos inversos asociados a un incremento del espesor; por tanto, el espesor óptimo de aislamiento es aquel que hace mínima la pérdida de calor maximizando la resistencia térmica total (Incropera y Dewitt 2007; Bergman *et al.* 2011). Estos autores recomiendan emplear la expresión 1 para calcular la pérdida de calor que se produce desde el interior al exterior de una tubería.

$$q_r = \frac{t_{\infty 1} - t_{\infty 2}}{R_T} \quad (1)$$

Donde:

q_r : Calor transferido en la tubería, [W/m];

$t_{\infty 1}$: Temperatura del fluido caliente, [K];

$t_{\infty 2}$: Temperatura del fluido frío, [K];

R_T : Resistencia térmica total, [K/W].

Aunque los cálculos realizados por la ecuación 1 poseen validez para los sistemas radiales presentan errores de estimación al ser aplicados a instalaciones con trazas de vapor debido, fundamentalmente, a las características geométricas de estos sistemas, lo cual no es considerado en el modelo.

Monteagudo, Pérez y Guerra (1998) proponen una metodología que permite determinar el espesor del aislamiento térmico de tuberías con acompañamiento de vapor, cuya finalidad es mantener un nivel estable de temperatura; sin embargo, no se toma en consideración la marcada influencia del costo del aislamiento en la selección de su espesor.

El proceso de selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor ha sido escasamente estudiado, debido fundamentalmente a la complejidad de estos sistemas. De ahí que la selección se realice, generalmente, por procedimientos desarrollados para sistemas radiales que poseen otra geometría y, por ende, un análisis diferente (Gilbert 2015).

El objetivo del presente trabajo es exponer un procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor.

2. PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DEL ESPESOR DE AISLAMIENTO

2.1. Espesores de aislamiento

De acuerdo con las expresiones conocidas, Isover (2004a) plantea que las pérdidas de energía disminuyen con el aumento del espesor de aislamiento, lo cual coincide con lo expresado por diferentes autores (Huang & Zhang 2014; Zavattoni *et al.* 2014; Haiqian *et al.* 2012; Luamkanchanaphan, Chotikaprakhan & Jarusombati 2012; Bomberg 2013; Lulic *et al.* 2014). De ahí que se proceda a determinar para cada inversión en aislamiento el valor actualizado neto de los ahorros energéticos aportados y compararlo con los incrementos que supone la inversión.

2.2. Pérdidas energéticas para cada espesor de aislamiento

Según Monteagudo, Pérez y Guerra (1998) la pérdida de calor de la tubería principal hacia el medio exterior y la cantidad de calor disipada por la parte restante de la superficie del aislamiento pueden determinarse por las expresiones 2 y 10, respectivamente.

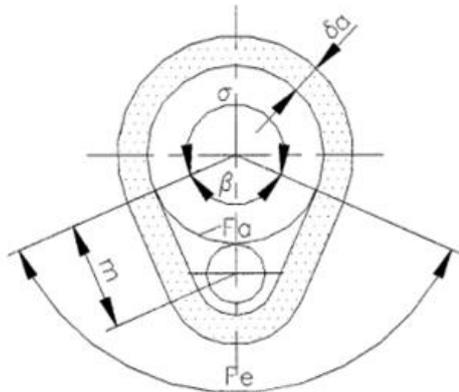


Figura 2. Tuberías de vapor acompañante con ángulo selectivo de calentamiento. Fuente: Monteagudo, Pérez y Guerra (1998).

Sin embargo, las consideraciones realizadas por este excluye la resistencia térmica por convección desde el fluido a la pared interior de la tubería principal (expresión 6) y la resistencia térmica por conducción que presupone el espesor de la tubería (expresión 7), lo que limita la precisión de los modelos.

$$q^P = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_o}{R_p} \quad (2)$$

Siendo:

$$\theta = 360 - \beta \quad (3)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{2r_2 - 2r_A - 0,02}{2r_2 + 2r_A} \right) \quad (4)$$

$$R_p = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (5)$$

$$R_1 = \frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1} \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_p} \quad (7)$$

$$R_3 = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_A} \quad (8)$$

$$R_4 = \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3} \quad (9)$$

Donde:

q^P : Pérdida de calor desde la tubería principal hacia el medio exterior por unidad de longitud, [W/m];

θ : Ángulo formado por la parte de la tubería principal sobre la cual se dispone el aislamiento, [grados sexagesimales];

t_p : Temperatura a la cual se transporta el petróleo en la tubería principal, [K];

t_o : Temperatura ambiente a la que se realiza el cálculo, [K];

R_p : Resistencia térmica desde el combustible hasta el aire ambiente por unidad de longitud, [m·K/W];

β : Ángulo de incidencia del calor de la tubería principal desde el aire en la cavidad termoaislada, [grados sexagesimales];

r_2 : Radio exterior de la tubería principal, [m];

r_A : Radio exterior de la traza de vapor, [m];

R_1 : Resistencia térmica por convección desde el combustible hasta la pared interior de la tubería principal por unidad de longitud, [m·K/W];

R_2 : Resistencia térmica por conducción que presupone el espesor de la tubería principal por unidad de longitud, [m·K/W];

R_3 : Resistencia térmica por conducción que presupone el espesor de aislamiento por unidad de longitud, [m·K/W];

R_4 : Resistencia térmica por convección desde la superficie exterior del aislamiento al aire ambiente por unidad de longitud, [m·K/W];

h_1 : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde el combustible hasta la pared interior de la tubería principal, [W/m²·K];

r_1 : Radio interior de la tubería principal, [m];

k_p : Conductividad térmica del material de la tubería principal, [W/m·K];

r_3 : Radio exterior del aislamiento colocado en la tubería principal, [m];

k_A : Conductividad térmica del material aislante, [W/m·K];

h_2 : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde la superficie exterior del aislamiento al aire ambiente, [W/m²·K].

$$q^E = 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E} \cdot (t_c - t_o) \quad (10)$$

Siendo:

$$F_E = \frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m \quad (11)$$

$$m = \sqrt{(2r_2 - 0,01) \cdot (2r_A + 0,01)} \quad (12)$$

$$R_E = \frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2} \quad (13)$$

Donde:

q^E : Calor que se pierde al medio desde la cavidad por unidad de longitud, [W/m];

F_E : Área superficial del aislamiento que no incluye la porción que se dispone sobre la tubería principal, por unidad de longitud, [m²/m];

R_E : Resistencia térmica desde el aire en la cavidad termoaislada al exterior, [m²·K/W];

t_C : Temperatura del aire en el interior de la cavidad termoaislada, [K];

m : Distancia entre los centros de la traza y la tubería principal, [m];

δ : Espesor de aislamiento térmico, [m];

h_5 : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde el aire en la cavidad a la superficie interior del aislamiento, [W/m²·K].

En una instalación con traza de vapor (Figura 3), la pérdida total de calor (q^T) está fraccionada entre las pérdidas a través de la sección aislada de la tubería principal (q^P) y la cavidad termoaislada (q^E). (Gilbert *et al.* 2014).

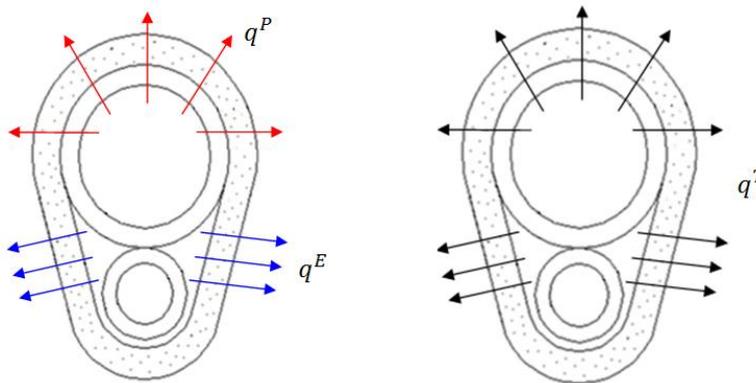


Figura 3. Pérdidas de calor en una instalación con traza de vapor.

De ahí que, al introducir un coeficiente para considerar las pérdidas por apoyo igual a 1,25 (Monteagudo, Pérez & Guerra 1998), se infiere que es posible emplear un modelo único que integre las expresiones anteriores y permita determinar la pérdida total de calor en una instalación con trazas de vapor (expresión 14), lo cual constituye un modesto aporte en la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico, en instalaciones con este tipo de configuración.

$$q^T = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_o}{\left(\frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_p} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_A} + \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3} \right)} + 1,25 \cdot \left[\frac{\frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m}{\frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2}} \right] \cdot (t_c - t_o) \quad (14)$$

Donde:

q^T : Pérdida total de calor por unidad de longitud, [W/m].

2.3. Valor de las pérdidas energéticas

Si se consideran dos espesores consecutivos de aislamiento, la diferencia de pérdidas energéticas entre ellos tendrá un valor económico que puede ser considerable (Isover, 2004a). Para determinar dicha diferencia es necesario calcular el valor de las pérdidas para cada uno de los espesores de aislamiento evaluados, lo cual es posible auxiliándose de la expresión 15:

$$V = q^T \cdot E \cdot Z \cdot 10^{-3} \quad (15)$$

Donde:

V : Valor de las pérdidas energéticas, [CUP/m·año];

E : Costo de la energía, [CUP/kW·h];

Z : Tiempo de funcionamiento de la instalación al año, [h/año].

2.4. Valor actualizado de las pérdidas

Para cada inversión en aislamiento se determina el valor actualizado neto de los ahorros energéticos aportados en el periodo analizado (ecuación 16) y se comparan con los incrementos que supone la inversión (Isover 2004a).

$$V_A = V \cdot C_{VAN} \quad (16)$$

Siendo:

$$C_{VAN} = \frac{\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} \cdot \left[\left(\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} \right)^n - 1 \right]}{\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} - 1} \quad (17)$$

$$r = c - d \quad (18)$$

Donde:

V_A : Valor actualizado de las pérdidas, [CUP/m];

C_{VAN} : Coeficiente de actualización, [adimensional];

b: Aumento previsible del costo de la energía, [%];

r: Tasa de actualización neta; equivalente al interés bancario deducido los impuestos y la tasa de inflación, [%];

n: Número de años para los que se efectúa el estudio;

c: Interés anual del dinero deducidos impuestos, [%];

d: Tasa de inflación anual prevista, [%].

2.5. Incremento del ahorro

El conocido comportamiento que genera una disminución de las pérdidas energéticas al aumentar el espesor del material aislante (Patsis, Petropoulos & Kaltsas 2012; Zach *et al.* 2013; De Elsafty *et al.* 2013; De Angelis & Serra 2014) favorece que se produzca un incremento del ahorro energético (IDAE 2007), lo que se traduce en una disminución de los gastos por concepto de pérdidas al exterior. Este incremento del ahorro puede estimarse mediante la expresión 19:

$$A = V_{A(\delta)} + V_{A(\delta+1)} \quad (19)$$

Donde:

A: Incremento de ahorro entre dos espesores consecutivos, [CUP/m];

$V_{A(\delta)}$: Valor actualizado de las pérdidas correspondiente al aislamiento de menor espesor, [CUP/m];

$V_{A(\delta+1)}$: Valor actualizado de las pérdidas correspondientes al aislamiento de mayor espesor, [CUP/m].

2.6. Incremento de la inversión del aislamiento

El aumento del espesor de aislamiento térmico genera incremento de la inversión para su compra e instalación, aunque esto no posee leyes determinadas de crecimiento; se puede emplear la expresión 20 para determinar el incremento de la inversión en espesores consecutivos.

$$I_A = I_{(\delta+1)} - I_{(\delta)} \quad (20)$$

Donde:

I_A : Incremento de la inversión del aislamiento entre dos espesores consecutivos, [CUC/m];

$I_{(\delta+1)}$: Inversión del aislamiento de mayor espesor, [CUC/m];

$I_{(\delta)}$: Inversión del aislamiento de menor espesor, [CUC/m].

Para: 0,04 m de espesor 11,05 CUC/m
0,05 m de espesor 13,65 CUC/m

0,06 m de espesor 15,35 CUC/m
 0,07 m de espesor 17,55 CUC/m
 0,08 m de espesor 19,70 CUC/m
 0,10 m de espesor 23,05 CUC/m
 0,12 m de espesor 25,45 CUC/m

Fuente: Isover 2015.

2.7. Espesor óptimo económico

El espesor óptimo económico se corresponde con aquel que tiende a cero al establecer la diferencia entre el incremento del ahorro (A) y el incremento de la inversión (I_A), condición que debe ser comprobada según la expresión 21:

$$A - I_A \approx 0 \quad (21)$$

Este modo de selección permite equilibrar ambos costos, empleando el aislamiento cuyo espesor minimice el costo total (Ct), lo cual puede ser comprobado mediante la ecuación 22:

$$Ct = V_A + I \quad (22)$$

2.8. Caracterización de la instalación donde se aplicó el procedimiento

La instalación analizada se utiliza para el transporte del crudo mejorado 650 (CM-650) hacia una termoeléctrica, de esta manera se garantiza el suministro de combustible para su combustión y permite el trabajo continuo de dos unidades generadoras, con una potencia instalada de 250 MW cada una. Con la energía generada se abastecen a las principales empresas del oriente cubano, entre las que resaltan las industrias metalúrgicas del nordeste de Holguín y la zona turística de Guardalavaca, las cuales constituyen uno de los principales renglones económicos de la economía nacional.

Tabla 1. Principales características de la instalación

Parámetro	Valor	UM
Diámetro interior de la tubería principal	0,42	m
Espesor de la tubería principal	0,013	m
Diámetro interior de la traza de vapor	0,025	m
Espesor de la traza de vapor	0,003	m
Longitud total de la instalación	3 200	m
Conductividad térmica de las tuberías	60,5	W/m·K
Flujo de combustible trasegado	0,044	m ³ /s
Tiempo de funcionamiento promedio	767	h/año

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Estimación del espesor óptimo económico de aislamiento

La obtención de la pérdida total de calor se calculó mediante la ecuación 14, la cual es el resultado de la integración de las expresiones 2 y 10. Para las condiciones estimadas resulta evidente que la pérdida de calor que se produce desde la parte aislada de la tubería principal al medio exterior (q^P) sea mayor que la pérdida generada desde la cavidad termoaislada (q^E), lo cual está asociado fundamentalmente a una mayor área de disipación de calor, debido a la diferencia de los diámetros de la tubería principal y la traza de vapor. La Figura 4 muestra el valor de la pérdida total de calor disgregado en sus dos componentes y exhibe los porcentajes que representan del total.

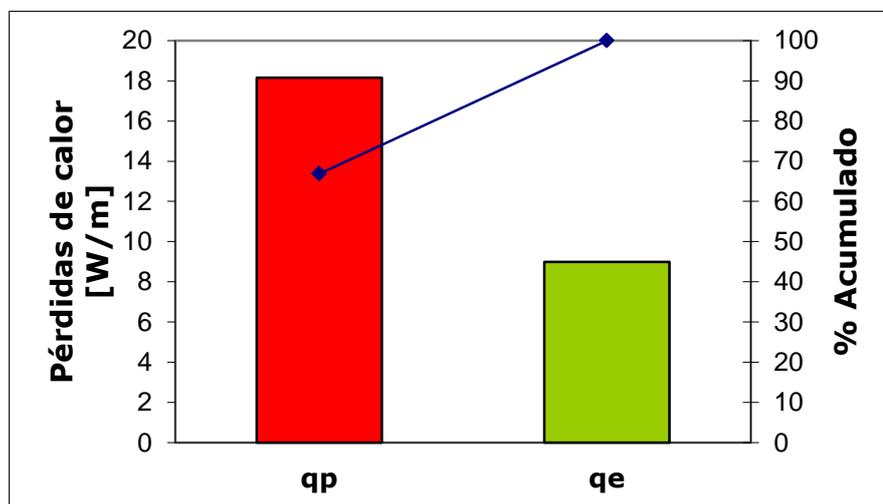


Figura 4. Distribución de la pérdida total de calor por componentes.

El cálculo de los parámetros característicos del espesor óptimo económico de aislamiento se obtuvo en correspondencia con el procedimiento descrito anteriormente; el valor de las pérdidas energéticas, el valor actualizado de dichas pérdidas, el aumento del ahorro, el incremento de la inversión y la diferencia entre estos dos últimos parámetros han sido determinadas por las expresiones 15, 16, 19, 20 y 21, respectivamente. El espesor óptimo económico de aislamiento se determinó considerando, entre otros parámetros, el tiempo de funcionamiento de la instalación (767 h/año), el costo energético (0,09 CUP/kW·h), la duración estimada del aislamiento (10 años), el incremento del costo de la energía (3 %), la tasa de interés (5 %) y la tasa de inflación prevista (1 %). Los precios de los aislamientos se fijaron dependientes de los espesores empleados, en relación a lo establecido por Isover (2015), y no se ha tenido en cuenta un costo adicional del aislamiento por mano de obra.

Tabla 2. Parámetros característicos del espesor óptimo económico de aislamiento

δ [m]	q^T [W/m]	V [CUP/m-año]	V_A [CUP/m]	A [CUP/m]	I_A [CUC/m]	$A - I_A$ [CUP+CUC/m]
0,04	55,284	3,813	36,178			
0,05	46,558	3,211	30,467	5,710	2,6	3,110
0,06	40,401	2,787	26,438	4,028	1,7	2,328
0,07	35,820	2,471	23,441	2,997	2,2	0,797
0,08	32,277	2,226	21,122	2,318	2,15	0,168
0,10	27,147	1,872	17,765	3,356	3,35	0,006
0,12	23,609	1,628	15,450	2,315	2,4	-0,084

La estimación del espesor óptimo económico se realizó considerando siete espesores de aislamiento (0,04 m; 0,05 m; 0,06 m; 0,07 m; 0,08 m; 0,1 m y 0,12 m) de lana de roca (*TECH Wired Mat MT 6.1*), según valores normalizados por la compañía española Isover para este material aislante. Para cada espesor evaluado se calcularon los parámetros característicos mostrados en la Tabla 2, resultando evidente que la pérdida total de calor, el valor de las pérdidas energéticas y el valor actualizado de dichas pérdidas disminuyen al aumentarse el espesor de aislamiento (lo cual resulta lógico considerando la dependencia matemática entre estos parámetros, en el mismo orden expuesto), mientras que el incremento del ahorro no muestra tendencia a ascender o disminuir con el incremento del espesor, comportamiento análogo al mostrado por el aumento de la inversión del aislamiento, influenciado por los precios establecidos para los diferentes espesores. La diferencia entre el incremento del ahorro y el aumento de la inversión manifiesta cierta disminución, obteniéndose su valor mínimo positivo justamente para el espesor óptimo económico, siendo para este caso de 0,1 m.

El análisis de los costos en la selección del espesor óptimo económico de aislamiento garantizó el escenario de forma tal que quedaron desestimados aquellos espesores para los cuales el gasto de energía resultó elevado, o los costos de inversión no amortizaban en el período evaluado.

La selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías con traza de vapor está relacionada a factores de naturaleza opuesta, como son los costos asociados a la pérdida de calor y la inversión en aislamiento.

La Figura 5 muestra cómo al evaluar para un mismo espesor de aislamiento existe una disminución del valor actualizado de la pérdida total de calor (V_A), asociado al incremento de la resistencia térmica por conducción, mientras el costo de inversión de aislamiento (I) crece a

causa del aumento de material aislante, comportamientos análogos a los obtenidos por Cener (2012), Galdámez y Guzmán (2011), e Izquierdo y colaboradores (2005).

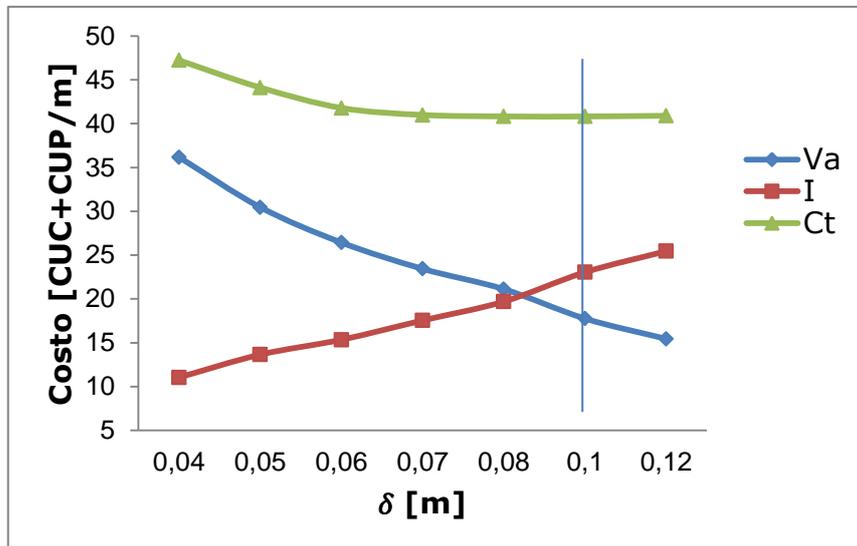


Figura 5. Espesor óptimo económico de aislamiento.

La suma del valor actualizado de las pérdidas energéticas con el costo de inversión posibilitó la búsqueda del valor mínimo de costo total (40,816 CUC+CUP), demostrándose que para las condiciones analizadas el espesor óptimo económico de aislamiento es de 0,1 m.

Si se eligiera un espesor de aislamiento menor que el óptimo económico la pérdida total de calor sería mayor y el costo también aumentaría. Si por el contrario se seleccionara un espesor mayor, el ahorro de la energía (asociado a este espesor) no compensaría el costo efectuado por su compra.

3.2. Impacto económico

En la Tabla 3 se muestran los gastos monetarios producto de la pérdida total de calor para cada espesor de aislamiento; aunque para el espesor de 0,12 m se obtiene una pérdida de calor inferior al espesor óptimo económico, este no se toma en consideración pues su costo de inversión resulta superior al ahorro generado y no logra amortizar el dinero desembolsado por su compra e instalación, para el periodo evaluado.

Tabla 3. Gastos monetarios por espesor de aislamiento

δ [m]	q^T [W/m]	V_A [CUP/m]	Gastos [CUP]
0,04	55,284	36,178	115 769,6
0,05	46,558	30,467	97 494,4
0,06	40,401	26,438	84 601,6
0,07	35,820	23,441	75 011,2
0,08	32,277	21,122	67 590,4
0,1	27,147	17,765	56 848

Para el espesor óptimo económico (0,1 m) la pérdida total de calor ascendió a los 27,147 W/m. Si se analiza que el valor actualizado de las pérdidas es de 17,765 CUP/m y que la instalación posee una longitud de 3 200 m resulta fácil percibir que se incurren en gastos de 56 848 CUP para el periodo evaluado; sin embargo, al comparar estos valores con los aportados por el espesor de 0,04 m resulta evidente que la pérdida total de calor asociada a este espesor es de 55,284 W/m, incurriendo en gastos de 115 769,6 CUP. De ahí que, al emplear el espesor adecuado de aislamiento, se produzca un ahorro de energía respecto al espesor con 0,04 m de 28,137 W/m, que equivale en términos monetarios a 58 921,6 CUP, lo que representa un ahorro del 104 %.

4. CONCLUSIONES

- Quedó establecido el procedimiento que permite seleccionar el espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor, el cual incorpora como elemento novedoso la expresión (14) para el cálculo de la pérdida total de calor, para las instalaciones con este tipo de configuración.
- Para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en instalaciones que no empleen trazas de vapor el procedimiento desarrollado es aplicable empleando la expresión 1 para el cálculo de la pérdida de calor.

5. AGRADECIMIENTO

Los autores de este trabajo consideramos ineludible mostrar nuestra gratitud al Dr. C. José Pedro Monteagudo Yanes, profesor de la Universidad de Cienfuegos; quien, despegado de cualquier interés, cedió su tiempo y brindó su conocimiento para mostrar un mejor resultado y ponerlo al servicio de la ciencia.

6. REFERENCIAS

- BERGMAN, T.; LAVINE, A.; INCROPERA, F. & DEWITT, D. 2011: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, New Jersey, 1 039 p.
- BOMBERG, M. 2013: Glows and shadows of thermal insulation. *Frontiers of architectural research* 2(2): 263-266.
- CENER. 2012: El potencial de ahorro de energía y reducción de emisiones de CO₂ en viviendas mediante incremento del aislamiento. Consultado: 16 marzo 2015. Disponible en: www.cener.com.
- CONUEE, PYME, SENER. 2008: *Beneficios del aislamiento en la industria*. 52 p. Consultado: 20 febrero 2015. Disponible en: www.conuee.gob.mx.
- DE ANGELIS, E. & SERRA, E. 2014: Light steel-frame walls: thermal insulation performances and thermal bridges. *Energy Procedia* 45: 362-371.
- DE ELSAFTY, A.; JOUMAA, C.; ABO-ELAZM, M. & ELHARIDI, A. 2013: Case study analysis for building envelop and its effect on environment. *Energy Procedia* 36: 958-966.
- GALDÁMEZ, V. & GUZMÁN, H. 2011. *Evaluación térmica, energética y económica del uso de aislantes térmicos*. Tesis de grado. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas. 61 p.
- GILBERT, A.; LAURENCIO, H.; RODRÍGUEZ, I.; RETIRADO, Y. & TORRES, E. 2014: Selección del espesor de aislamiento térmico para tuberías de petróleo con traza de vapor. *Minería y Geología* 30(1): 62-79.
- GILBERT, A. 2015: *Selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. 91 p.
- HAIQIAN, Z.; XIAOYAN, L.; LIJUN, L.; YONGNING, W.; XIAOHUI, L. & YING, Z. 2012: Study on new thermal insulation construction of thermal recovery boiler. *Energy Procedia* 16: 1 466-1 471.
- HUANG, C. & ZHANG, Y. 2014: Calculation of high-temperature insulation parameters and heat transfer behaviors of multilayer insulation by inverse problems method. *Chinese Journal of Aeronautics* 27(4): 1-6.
- IDAE. 2007: *Guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos*. Madrid, 59 p.
- INCROPERA, F. & DEWITT, D. 2007: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 3 t. Pueblo y Educación, La Habana.
- ISOVER. 2004A: *Manual de aislamiento en la industria*. Saint-Gobain Isover España, Madrid, 148 p.
- ISOVER. 2004B: *Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios y sus instrucciones técnicas complementarias*. Saint-Gobain Isover España, Madrid, 52 p.

- ISOVER. 2015: *Lista de precios*. Saint-Gobain Isover España, Madrid, 53 p.
- IZQUIERDO, M.; GAVIRA, M.; ALFARO, J. & LECUONA, A. 2005: Espesor óptimo del aislante térmico para las viviendas de Madrid. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/5865>
- LUAMKANCHANAPHAN, T.; CHOTIKAPRAKHAN, S. & JARUSOMBATI, S. 2012: A study of physical, mechanical and thermal properties for thermal insulation from narrow-leaved cattail fibers. *APCBEE Procedia* 1: 46-52.
- LULIC, H.; CIVIC, A.; PASIC, M.; OMERSPAHIC, A. & DZAFEROVIC, E. 2014: Optimization of thermal insulation and regression analysis of fuel consumption. *Procedia Engineering* 69: 902-910.
- MONTEAGUDO, J.; PÉREZ, J. & GUERRA, E. 1998: Aislamiento térmico de tuberías con acompañamiento de vapor. *Energía: Ingeniería Química* 24(3): 161-167.
- PATSIS, G.; PETROPOULOS, A. & KALTSAS, G. 2012: Modelling and evaluation of a thermal microfluidic sensor fabricated on plastic substrate. *Microsystem technologies* 18(3): 359-364.
- ZACH, J.; HROUDOVÁ, J.; BROŽOVSKÝ, J.; KREJZA, Z. & GAILIUS, A. 2013: Development of thermal insulating materials on natural base for thermal insulation systems. *Procedia Engineering* 57: 1 288-1 294.
- ZAVATTONI, S.; GAETANO, A.; MONTORFANO, D.; BARBATO, M.; AMBROSETTI, G. & PEDRETTI, A. 2014: A novel CSP receiver based on airlight energy technology - optimization of the thermal insulation system by means of CFD analysis. *Energy Procedia* 49: 589-598.

Amauris Gilbert-Hernández, aghernandez@ismm.edu.cu
Máster en Metalurgia. Profesor Asistente.
Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

Yoalbys Retirado-Mediaceja, yretirado@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

Héctor L. Laurencio-Alfonso, hlaurencio@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

Amaury Palacios-Rodríguez, apalacios@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Departamento de Metalurgia y Materiales.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba

Ever Góngora-Leyva, egongora@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

Modelación matemática del proceso de activación de carbón vegetal en horno cilíndrico rotatorio

Carlos Zalazar-Oliva
Ever Góngora-Leyva
Yoalbys Retirado-Mediaceja
Manuel Arturo Falconí- Borja
Luis Fernando Mata-Jácome

Resumen

La activación del carbón vegetal por el método físico o térmico regularmente se realiza bajo una atmósfera en presencia de aire, dióxido de carbono (CO_2) o vapor de agua, a temperaturas entre 800 °C y 900 °C. En el presente trabajo se realizó la modelación matemática del proceso de activación de carbón con el objetivo de predecir el comportamiento de la distribución de la temperatura de gas y del carbón en el interior de un horno cilíndrico rotatorio. El mismo quedó constituido en un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales y las ecuaciones para determinar la temperatura de la pared interior del cilindro y los coeficientes de transferencia de calor. Para su solución se utilizó el método numérico Runge-Kutta 4to orden. La comparación de los resultados obtenidos de la modelación de la temperatura del gas en el interior del cilindro con los datos experimentales demostró que la variación es insignificante, con un error menor de 5 %.

Palabras clave: modelo matemático; activación; carbón vegetal; horno cilíndrico rotatorio.

Mathematical modeling for charcoal activation in a rotating cylindrical furnace

Abstract

The activation of charcoal by applying physical or thermal methods is carried out under an atmosphere containing air, carbon dioxide or water vapor at temperatures ranging from 800 °C and 900 °C. This investigation was completed based on the mathematical modeling for the coal activation process in order to estimate the gas distribution and coal temperatures inside a rotating cylindrical kiln. The model consists of a system of non-linear differential equations and equations to calculate the temperature of the cylinder internal wall and heat transfer coefficients. The 4th order Runge–Kutta method was used for the calculations. The comparison of the results obtained from modeling gas temperatures in the interior of the cylinder and the experimental data indicated that the variation is insignificant with an error margin below 5 %.

Keywords: mathematical modeling; activation; vegetal coal; rotating cylindrical furnace.

1. INTRODUCCIÓN

El carbón activado es un producto de estructura cristalina reticular similar a la del grafito. Es extremadamente poroso y puede desarrollar áreas superficiales del orden de 1 500 m²/g de carbón que, por medio de la adsorción, atrapan en su superficie una alta gama de moléculas (Gómez *et al.* 2004; Corredor 2014); por ello se utilizan en la extracción de metales, la purificación y tratamiento de agua, la medicina, la clarificación y eliminación de olores, la purificación de glicerina, el control de emisiones de gases en automóviles, en filtros de purificación y de máscaras antigás. Estas aplicaciones condujeron al desarrollo de numerosas investigaciones, en su mayoría, relacionadas con su preparación y caracterización (Bah 2012).

Debido a las especificaciones de cada material y a las dificultades de asociarlas a la cinética de las reacciones de activación, los modelos matemáticos para predecir el comportamiento estacionario y dinámico en hornos rotatorios para la activación de carbón se obtienen de manera empírica y a escala piloto (Laine, Simoni & Calles 1991). Aunque estos equipos tienen amplia aplicación en la industria aún su estudio se hace difícil (Watkinson & Brimacombe 1978). No obstante, Ortiz y otros investigadores (2003) han presentado un modelo relacionado con la activación del carbón de leña con vapor de agua en hornos cilíndricos rotatorios a escala piloto, el cual es empleado por Kim (2012) para estudiar el proceso de pirólisis en un horno cilíndrico rotatorio, para la recuperación de los compuestos orgánicos volátiles contenidos en los gases que se producen en el proceso.

La activación del carbón, en el objeto de estudio analizado, se realiza por el método térmico o físico, que consiste en la activación del carbón mediante la acción de gases oxidantes como vapor de agua, dióxido de carbono, aire o mezcla de los mismos, siendo el oxígeno el responsable de quemar las partes más reactivas del esqueleto carbonoso y el alquitrán retenido dentro de la estructura porosa, aportándole al carbón la propiedades adsorptivas (Bah 2012). En este método los parámetros cinéticos de las reacciones del oxígeno con las moléculas del carbón son muy sensibles a las limitaciones impuestas por la energía. Cuando la reacción es exotérmica, el carbono reacciona a los 700 K, aproximadamente, y más precipitadamente a los 1 600 K . Es decir, la magnitud de la reacción tiene que ser limitada con la temperatura, por tal motivo, su control debe ser riguroso (Marsh & Reinoso 2006).

En los trabajos precedentes se presentan modelos fenomenológicos que describen el comportamiento de las variables del proceso en toda la

longitud del cilindro. Sin embargo, estas instalaciones cilíndricas horizontales rotatorias aún se diseñan empíricamente debido a la falta de un modelo apropiado de transferencia de calor que lo caracterice, razón importante para su estudio (Wang *et al.* 2010).

En tal sentido, el objetivo de esta investigación fue establecer un modelo matemático que permita predecir el comportamiento de las temperaturas de los gases de combustión y el carbón vegetal durante el proceso de activación del carbón en un horno cilíndrico rotatorio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Método de modelación matemática

Para el modelado del proceso de activación del carbón vegetal, en un horno cilíndrico rotatorio, se parte del balance de energía y masa, a través del cual se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales que incluye las reacciones químicas entre el carbón y el vapor de agua. Además, se plantean las ecuaciones que caracterizan a los coeficientes de transferencia de calor y de masa en el interior y el exterior del horno. Este método de modelación ha sido empleado con éxito por diversos investigadores para el análisis de equipos similares como hornos y secadores cilíndricos rotatorios (Kim & Srivastava 1990; Ortiz *et al.* 2003; Han & Chang 2012). Para la elaboración del modelo se realizan las consideraciones siguientes:

- Los cambios de velocidades para el carbón y el gas, así como las partículas de carbón arrastradas por el gas, son despreciables.
- Todas las variables son uniformes en la dirección radial.
- El flujo de vapor y la presión en el horno son constantes.
- La reacción química obedece a la Ley de Arrhenius y las reacciones secundarias no se tienen en cuenta.

En la solución del modelo se utilizó el método numérico Runge Kutta cuarto orden, con ayuda del software profesional MATLAB, para las condiciones de operaciones de diseño del horno.

2.2. Descripción de la instalación

El horno cilíndrico rotatorio objeto de estudio tiene 1,6 m de diámetro y 12 m de longitud; posee un ángulo de inclinación de 15 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal, para facilitar el mezclado y traslado del material. El mismo trabaja en isocorriente (Figura 1) y con las condiciones de operación expuestas en la Tabla 1.

Para garantizar la energía requerida en el proceso se utilizan los gases generados en la cámara de combustión (1), los cuales se suministran al

interior del cilindro (2) junto con el vapor de agua saturado (4). El carbón que se emplea para la activación se suministra a través de bandas transportadoras que descarga a una tolva (3) con dosificadores que garantiza el flujo de carbón fijado para el proceso. El carbón activado sale del horno por medio de un serpentín enfriador de descarga que rodea la superficie exterior final del horno hacia un transportador de tornillo sinfín (5) de 0,138 m de diámetro.

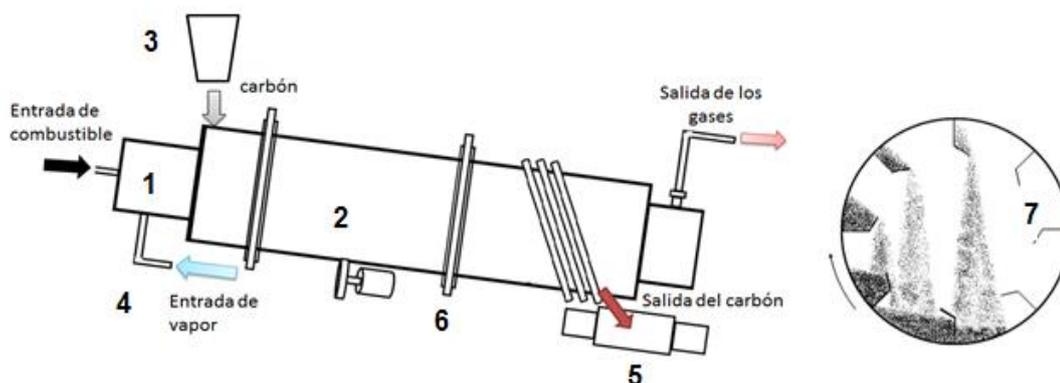


Figura 1. Horno de activación del carbón.

Además, en la parte interna del horno están dispuestas una serie de palas o aletas soldadas (7) que favorecen la elevación y volteo del material, mientras el cilindro rota apoyado sobre rodillos (6), permitiendo un mejor contacto entre el sólido y la corriente gaseosa. Las referidas paletas están inclinadas con respecto al eje del cilindro para facilitar el desplazamiento del material a lo largo del mismo.

Tabla 1. Condiciones de operación horno cilíndrico rotatorio utilizado para la activación del carbón

Variables del proceso	Valores	Unidad
Flujo de carbón al horno	150-200	kg/h
Flujo de vapor	300-350	kg/h
Velocidad de rotación	6	rev/min
Tiempo de permanencia	3-4	h
Temperatura del vapor	123-140	°C
Presión del vapor al horno	2	kgf/cm ²
Temperatura de la cámara de combustión	1 100-1 400	°C
Temperatura de los gases en el horno		
Sección 1	900-950	°C
Sección 2	850-950	°C
Sección 3	850-900	°C

Sección 4	700-800	°C
Temperatura de salida de los gases	750-800	°C
Presión interna del horno	2,5-6,0	kgf/cm ²

2.2.1. Identificación de los procesos de transferencia de calor

La Figura 2 muestra los procesos de transferencia de calor que se ponen de manifiesto en el horno cilíndrico rotatorio utilizado en la activación del carbón. En la instalación, los gases producto de la combustión y el vapor de agua saturado le transfieren calor por convección y radiación al carbón y a la pared interior del cilindro no cubierta por el sólido (1). El calor absorbido por la pared es transferido por conducción: una parte, al sólido en contacto con la pared (2) y, la otra parte, por conducción desde la pared interior a la exterior y de esta por convección y radiación a los alrededores (3).

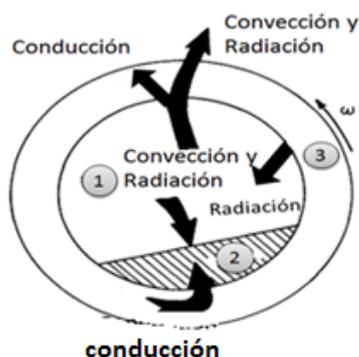


Figura 2. Corte transversal del horno para la activación.

Algunos investigadores plantean que el carbón en el interior del reactor se comporta como un fluido y proponen estimar la transferencia de calor entre el sólido y la pared cubierta del cilindro a través de la convección (Gorog, Adams & Brimacombe 1982; Ortiz *et al.* 2003; Kim 2012).

3. MODELACIÓN MATEMÁTICA

3.1. Pérdida de sólido por reacción química

Según (Yehaskel 1978), durante el proceso de activación parte del carbón reacciona con el vapor de agua, obteniéndose monóxido de carbono y hidrógeno, liberándose 28,5 kcal/mol (ecuación 1).



La cantidad de masa de sólido perdida se determina por la ecuación 2, obtenida experimentalmente en condiciones similares a las de un horno rotatorio para la activación de carbón. Es una ecuación cinética que tiene en cuenta a la Ley de Arrhenius y considera el flujo de vapor para la activación constante (Martínez 1998; Ortiz *et al.* 2003).

$$r_s = -\frac{\partial \dot{m}_s}{\partial z} = \frac{6,005 \left[\exp\left(\frac{-8033}{T_s}\right) \right] \cdot \dot{m}_v \cdot \dot{m}_s}{V_s} \quad (2)$$

3.2. Balance de masa

Para determinar la variación de la humedad en el sólido se tienen en cuenta las dos fases de secado de una sustancia. La primera, está gobernada por la evaporación y se considera que la superficie sólida permanece saturada. En la segunda, el proceso de secado se gobierna por la difusión de humedad desde adentro de la partícula hacia su superficie (Coulson & Richardson 1981). Para la humedad crítica de 10 % y suponiendo la continuidad de las dos fases, la variación de la humedad en el sólido en la dirección axial se expresa por la ecuación 3.

$$\frac{\partial \dot{m}_h}{\partial z} = -\frac{h_t \cdot A \cdot (T_g - T_s) \cdot \dot{m}_h}{H_v \cdot (0,1 \cdot \dot{m}_s)} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta el análisis de la pérdida de sólido por la reacción química y la variación de la humedad (ecuaciones 2 y 3) se obtiene la expresión 4 para el balance de masa del carbón a lo largo del cilindro. La misma permite determinar la variación del flujo del carbón a lo largo del reactor, considerando que los movimientos del sólido a través del reactor es en dirección positiva de la coordenada "z" (Ortiz *et al.* 2003).

$$\frac{\partial \dot{m}_s}{\partial z} = -K_e \cdot e^{-\left(\frac{8033}{T_s}\right)} \cdot \dot{m}_v \cdot \frac{\dot{m}_s}{V_s} - \frac{h_t \cdot A \cdot (T_g - T_s) \cdot \dot{m}_h}{H_v \cdot (0,1 \cdot \dot{m}_s)} \quad (4)$$

El balance de masa para el gas, que considera el incremento del flujo de gases debido a la evaporación de la humedad de la cama sólida y los gases producto de la reacción química, se realiza por la ecuación 5 (Ortiz *et al.* 2003).

$$\frac{\partial \dot{m}_g}{\partial z} = K_e \cdot e^{-\left(\frac{8033}{T_s}\right)} \cdot \dot{m}_a \cdot \frac{\dot{m}_s}{V_s} \cdot \frac{30}{12} + \frac{h_t \cdot A \cdot (T_g - T_s) \cdot \dot{m}_h}{H_v \cdot (0,1 \cdot \dot{m}_s)} \quad (5)$$

3.3. Balance de energía

Ortiz y demás investigadores (2003) plantean que al realizar el balance energético para el gas (ecuación 6) se infiere que la variación del flujo de calor del gas a lo largo de la coordenada "z" depende del calor transferido por la convección y radiación por la combinación gas-sólido, y gas-pared, más el calor sensible añadido por el vapor de agua para la activación del carbón. Las variables K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 y K_6 son los coeficientes de

transferencia de calor por convección y radiación del gas al sólido (expresiones 7-12).

$$\frac{\partial(\dot{m}_g \cdot C_g \cdot T_g)}{\partial z} = \left[\begin{array}{l} -K_1 \cdot (T_g - T_s) - K_2 \cdot (T_g^4 \cdot e_g - T_s^4 \cdot A_v) - K_3 \cdot (T_g - T_w) \\ -K_4 \cdot (T_g^4 \cdot e_g - T_w^4 \cdot A_v) + \frac{\partial \dot{m}_h}{\partial z} \cdot C_v \cdot (T_s - 373) \end{array} \right] \quad (6)$$

Siendo:

$$K_1 = h_{gs} \cdot L_{ss} \quad (7)$$

$$K_3 = h_{gw} \cdot L_{pnc} \quad (8)$$

$$K_2 = \frac{\sigma \cdot L_{ss} \cdot e_w}{[1 - (1 - e_s) \cdot (1 - A_v)]} \quad (9)$$

$$K_4 = \frac{\sigma \cdot L_{pnc} \cdot e_w}{[1 - (1 - e_w) \cdot (1 - A_v)]} \quad (10)$$

$$K_5 = h_{sw} \cdot L_{pcs} \quad (11)$$

$$K_6 = \sigma \cdot L_{ss} \cdot \phi_{sw} \cdot e_w \cdot e_s \quad (12)$$

La variación de flujo de calor del sólido a lo largo de la coordenada "z" depende del calor transferido por: convección y radiación del gas al sólido; convección y radiación de la pared al sólido; el calor de vaporización de la humedad y el calor de la reacción química del sólido para la activación. Al considerar todos los calores antes mencionados la ecuación de balance de energía para el carbón es la siguiente.

$$\frac{\partial(\dot{m}_s \cdot C_s \cdot T_s)}{\partial z} = \left[\begin{array}{l} K_1 \cdot (T_g - T_s) + K_2 \cdot (T_g^4 \cdot e_g - T_s^4 \cdot A_v) + K_5 \cdot (T_w - T_s) + \\ K_6 \cdot (T_w^4 \cdot e_w - T_s^4 \cdot A_v) - \frac{\partial \dot{m}_h}{\partial z} \cdot H_v - K_e \cdot e^{-\left(\frac{8033}{T_s}\right)} \cdot \frac{\dot{m}_s}{V_s} \cdot \dot{m}_v \cdot \Delta H \end{array} \right] \quad (13)$$

Para resolver las ecuaciones anteriores (ecuación 12 y 13) es necesario conocer la temperatura de la pared en el interior del cilindro; para ello se realiza un balance de energía para la pared considerando el flujo de calor neto transferido del interior al exterior del cilindro (Figura 3): gas-pared interior-pared exterior-ambiente exterior (Gorog, Adams & Brimacombe 1982). En este caso el calor transferido por conducción y

convección entre la pared cubierta y el sólido no es considerado porque se asume que ambas poseen la misma temperatura (expresión 14).

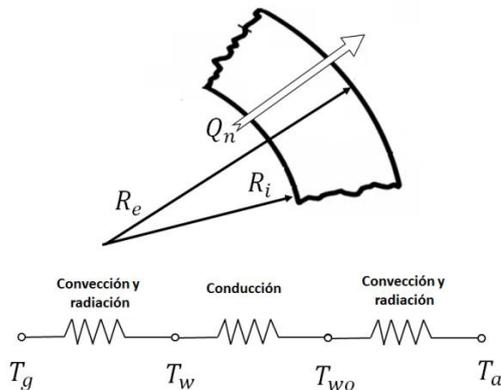


Figura 3. Circuito de resistencia para el flujo de calor del interior del cilindro al exterior.

La Figura 3 muestra el circuito de resistencia que se tiene en cuenta para determinar la temperatura interior de la pared conociendo la temperatura exterior.

$$T_w = \frac{\frac{T_a}{h_i \cdot R_i} + T_g \cdot \left[\frac{1}{\left[\left[1 + \frac{T_a}{T_{wo}} + \left(\frac{T_a}{T_{wo}} \right)^2 + \left(\frac{T_a}{T_{wo}} \right)^3 \right] \cdot e_{wo} \cdot \sigma \cdot (T_{wo})^3 + h_o \right] \cdot R_e} - \frac{\ln \frac{R_i}{R_e}}{K_w} \right]}{\frac{1}{h_i \cdot R_i} + \frac{1}{\left[\left[1 + \frac{T_a}{T_{wo}} + \left(\frac{T_a}{T_{wo}} \right)^2 + \left(\frac{T_a}{T_{wo}} \right)^3 \right] \cdot e_{wo} \cdot \sigma \cdot (T_{wo})^3 + h_o \right] \cdot R_e} - \frac{\ln \frac{R_i}{R_e}}{K_w}} \quad (14)$$

Por otro lado, se puede considerar que la temperatura de la pared en el interior del cilindro es igual a la temperatura del gas (Leyva 2014) ya que a medida que pasa el tiempo se puede alcanzar el estado de equilibrio entre el gas y la pared interior.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Validación de los modelos matemáticos

Para la validación del modelo se comparan los resultados obtenidos con el uso del modelo matemático de la temperatura de los gases producto de la combustión en el interior del cilindro y los experimentales medidos en la instalación para iguales condiciones de trabajo (Figura 4); evidenciándose un alto grado de coincidencia entre los resultados obtenidos experimentalmente y los calculados por el modelo.

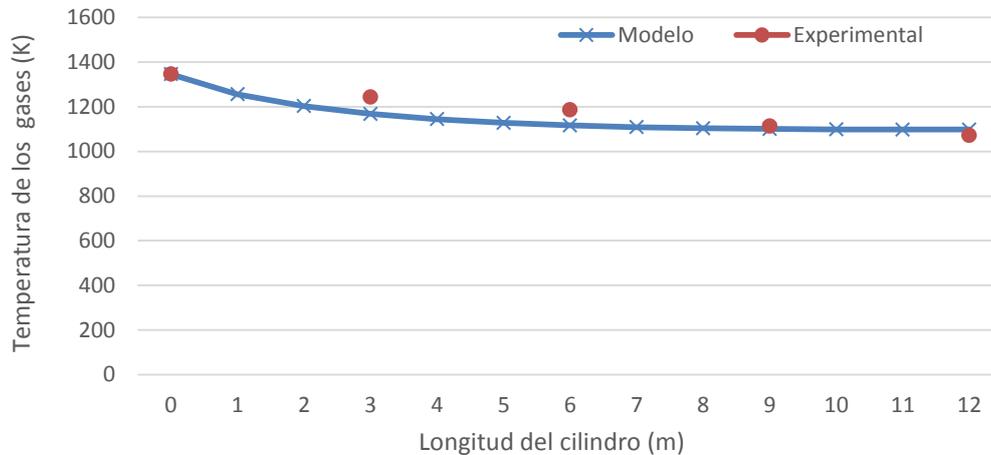


Figura 4. Comportamiento de la temperatura de los gases.

La magnitud del error relativo puntual existente entre los valores experimentales de temperatura del gas obtenidos en la instalación y los calculados con el modelo son inferiores al 5 % y el error relativo promedio es de 1,19 % (Figura 5). Estos resultados confirman la validez del modelo propuesto para predecir el comportamiento de temperatura del gas en el interior del cilindro del horno utilizado para la activación del referido material.

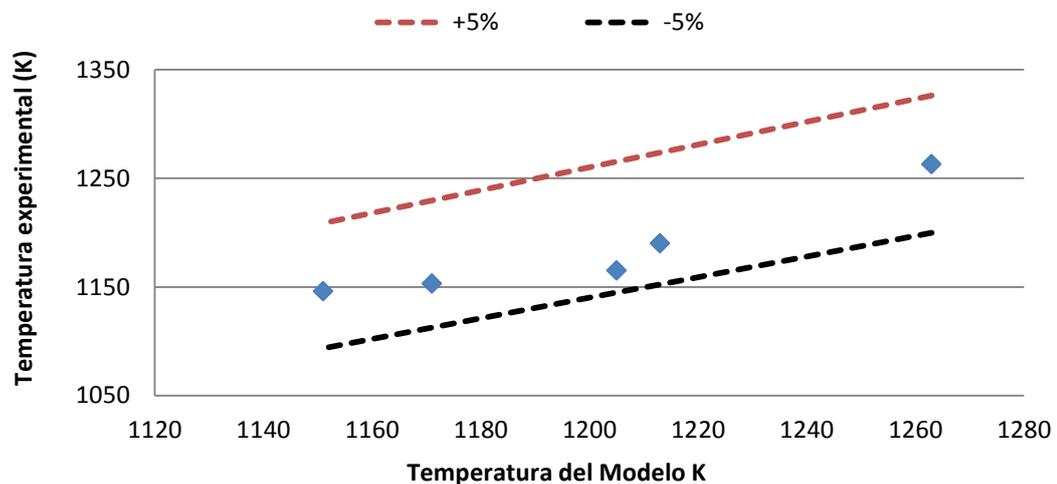


Figura 5. Comportamiento del error relativo promedio para la temperatura del carbón.

4.2. Temperatura del gas y el carbón

A través del modelo propuesto se obtuvo el comportamiento de la temperatura del gas y el carbón en función de la longitud del horno (Figura 6). Como se observa, la temperatura del sólido (T_s) aumenta rápidamente en los primeros tres metros del secador, obteniendo valores entre 750 K y 900 K. Luego, se mantiene prácticamente constante en

valores ligeramente superiores a los 1 000 K, lo que constituye el perfil de temperatura requerida para su activación. En el caso de la temperatura de los gases, su decrecimiento entre los 1 350 K y 1 150 K es lógico y congruente con los resultados obtenidos en las condiciones de producción de la instalación.

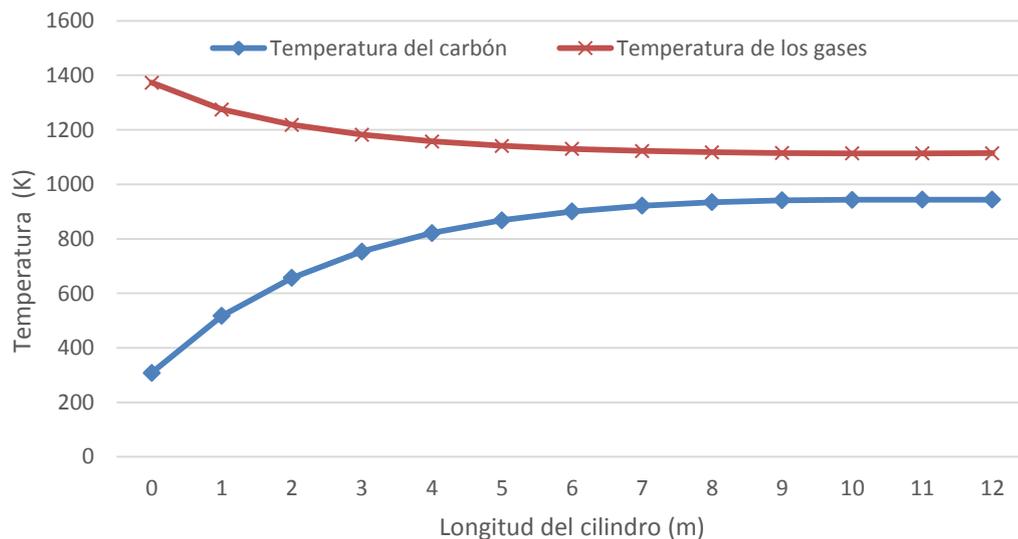


Figura 6. Comportamiento de la temperatura del gas y del carbón.

4.3. Variación de los flujos másicos

Otro de los comportamientos que se obtienen a través de la modelación fue la variación de los flujos de carbón y gas en el interior del cilindro (Figura 7).

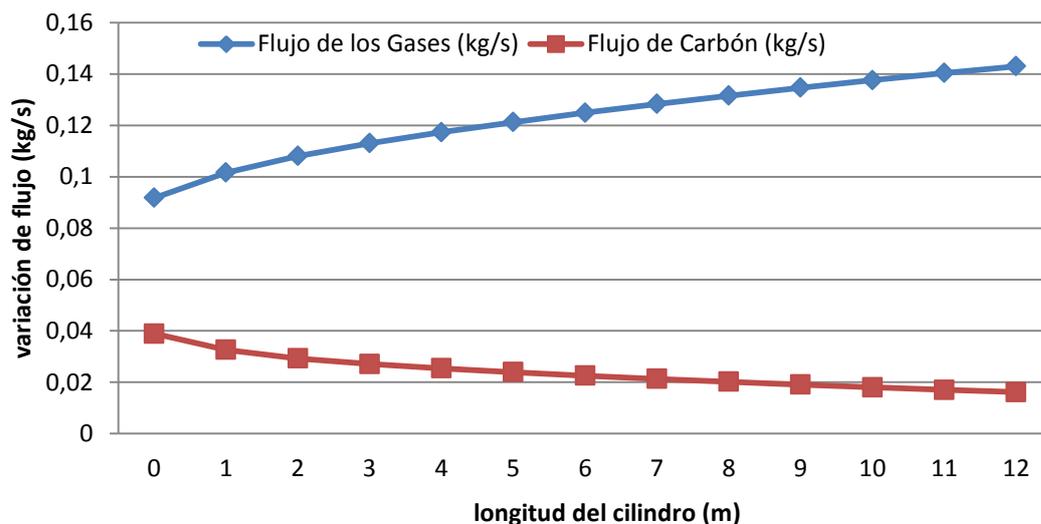


Figura 7. Comportamiento de los flujos de carbón y gas en el interior del cilindro.

La Figura 6 presenta la variación de temperatura del carbón y el gas a lo largo del cilindro, en la cual se muestra cómo varía el flujo de carbón de 0,038 kg/s a 0,016 kg/s y el incremento del flujo de los gases de 0,09 kg/s a 0,14 kg/s.

Para las condiciones estudiadas se determinó que el rendimiento de la producción de carbón activado varía entre 30 % y 60 %, en función de la temperatura que se tiene en los gases en el interior del horno.

Es importante destacar que estos comportamientos expuestos se obtienen por primera vez para el proceso objeto de investigación y, por tanto, constituyen aportes de esta investigación.

5. CONCLUSIONES

- Se estableció el modelo matemático que caracteriza a la transferencia de calor y masa durante el proceso de activación del carbón vegetal en un horno cilíndrico rotatorio. El mismo está formado por un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, que se obtienen del balance de energía y masa en la instalación. La precisión del modelo es superior al 95 %, por tanto, es satisfactorio para la evaluación energética del proceso investigado.
- Los comportamientos obtenidos para la distribución de temperatura del sólido y los gases producto de la combustión, en el horno, evidenciaron la validez del modelo para describir el perfil térmico que se produce en el proceso de activación del carbón vegetal. Lo anterior se corroboró con mediciones experimentales desarrolladas en una instalación real.
- El rendimiento del objeto de estudio tratado se asemeja con los obtenidos en instalaciones experimentales para la activación de carbón por el método físico.

NOMENCLATURA

C : Carbono

H_2O : Agua

CO : Monóxido de carbono

H_2 : Di-hidrógeno

V_s : Velocidad del carbón; m/s

\dot{m}_s : Flujo de carbón; (kg/h)

l : Longitud del cilindro; m

K_e : Constante cinética de la reacción; (s^{-1})

H_v : Calor latente de vaporización; J/kg

\dot{m}_v : Flujo del vapor; kg/s

\dot{m}_h : Contenido de agua del carbón; kg/s

A : Superficies de contacto gas-sólido; m^2/m

T_s : Temperatura del carbón; K

T_g : Temperatura del gas; K

h_t : Coeficiente de transferencia de calor en el interior; $W/(m^2 \cdot K)$

\dot{m}_g : Flujo de gases de la combustión; kg/s

C_g : Calor específico del gas; $J/(kg \cdot K)$

T_w : Temperatura de la pared; K

K_2 : Coeficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la convección del gas al sólido; $W/(m \cdot K)$

K_3 : Coeficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la radiación del gas al sólido; $W/(m \cdot K^4)$

K_3 : Coeficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la convección del gas a la pared; $W/(m \cdot K)$

K_4 : Coeficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la radiación del gas a la pared; $W/(m \cdot K^4)$

e_g : Emisividad del gas; adimensional

A_v : Adsorción; adimensional

C_v : Calor específico del vapor de agua; $J/(kg \cdot K)$

h_{gs} : Coeficiente de transferencia de calor por convección del gas al sólido; $W/(m^2 \cdot K)$

h_{gw} : Coeficiente de transferencia de calor por convección del gas a la pared en el interior del cilindro; $W/(m^2 \cdot K)$

L_{ss} : Longitud del arco del cilindro que está en contacto con el gas; m

L_{pnc} : Longitud del arco de la pared del cilindro no cubierto por el sólido; m

e_w : Emisividad de la pared; adimensional

e_{wo} : Emisividad de la pared exterior; adimensional

e_s : Emisividad del carbón; adimensional

σ : Constante de Stefan-Boltzmann; $W/(m^2 \cdot K^4)$

L_{pcs} : Longitud del arco que forma la pared cubierta por el sólido; m

ϕ_{sw} : Número de radiación; adimensional

ΔH : Calor por la reacción química entre la corriente gaseosa y el carbón; $kJ/(k \cdot mol)$

K_5 : Coeficiente variable de transferencia de calor por unidad de longitud para la convección entre el sólido y la pared; $W/(m \cdot K)$

K_6 : Coeficiente variable de transferencia de calor por unidad de longitud para la radiación entre la pared-sólido; $W/(m \cdot K^4)$

R_e : Radio exterior del horno; m

R_i : Radio interior del horno; m

K_w : Conductividad térmica de la pared; $W/(m \cdot K)$

h_i : Coeficiente de transferencia de calor en el interior; $W/(m^2 \cdot K)$

h_o : Coeficiente de transferencia de calor en el exterior; $W/(m^2 \cdot K)$

T_a : Temperatura del ambiente; K

T_{wo} : Temperatura de la pared exterior; K

r_s : Masa del carbón que reacciona con el vapor de agua; kg/h.

6. REFERENCIAS

- BAH, A. I. 2012: Preparación y caracterización de carbón activado a partir de residuos de biomasa y su utilización en tratamientos de descontaminación del agua. Universidad de Extremadura.
- CORREDOR, S. A. A. 2014: *Preparación y caracterización de carbón activado granular obtenido a partir de cuesco de palma africana (elaeis guineensis) para la adsorción de CO₂*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Colombia.
- COULSON, J. M. & RICHARDSON, J. F. 1981: *Ingeniería química*. T. 2. *Operaciones básicas*. 950 p.
- GÓMEZ, A.; KLOSE, W.; RINCÓN, S. L. & WIEST, W. 2004: Proceso de producción de carbón activado a partir de cáscaras de palma de aceite en un horno rotatorio y su aplicación en la limpieza de NO. *Revista Palmas* 25(especial): 461-471.
- GOROG, J. P.; ADAMS, T. N. & BRIMACOMBE, J. K. 1982: Regenerative Heat Transfer In Rotary Kilns. *Metallurgical and Materials Transactions B* 13b(2): 153-163.
- HAN, S. H. & CHANG, D. 2012: Optimum Residence Time Analysis For A Walking Beam Type Reheating Furnace. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55(15-16): 4 079-4 087.
- KIM, N. & SRIVASTAVA, R. 1990: Simulation and Control of an Industrial Calciner. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 29(1): 71-81.
- KIM, Y. H. 2012: Development of Process Model of a Rotary Kiln for Volatile Organic C Compound Recovery from Coconut Shell. *Korean Journal of Chemical Engineering* 29(12): 1 674-1 679.

- LAINE, J.; SIMONI, S. & CALLES, R. 1991: Preparation Of Activated Carbon From Coconut Shell In A Small Scale Cocurrent Flow Rotary Kiln. *Chemical engineering communications* 99(1): 15-23.
- LEYVA, E. G. 2014: *Modelación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico en cilindros horizontales rotatorios*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- MARSH, H. & REINOSO, F. R. 2006: *Activated Carbon*. Elsevier Science & Technol Ogy Books.
- MARTÍNEZ, N. 1998: Ecuación cinética para la activación de carbón de eucalipto. Instituto de Ingeniería Química, Universidad Nacional De San Juan.
- ORTIZ, O. A.; MARTÍNEZ, N. D.; MENGUAL, C. A. & NORIEGA, S. E. 2003: Steady State Simulation of a Rotary Kiln for Charcoal Activation. *Latin American Applied Research* 33(1): 51-57.
- WANG, W.; SI, X.; YANG, H.; ZHANG, H. & LU, J. 2010: Heat-transfer model of the rotary ash cooler used in circulating fluidized-bed boilers. *Energy & Fuels* 24(4): 2 570-2 575.
- WATKINSON, A. P. & BRIMACOMBE, J. K. 1978: Heat Transfer In A Direct-Fired Rotary Kiln: 1. Pilot Plant And Experimentation. *Metallurgical Transactions B* 9(2): 201-208.
- YEHASKEL, A. 1978: *Activated Carbon: Manufacture and Regeneration*. Noyes Data Corporation, New Jersey, USA.

Carlos Zalazar-Oliva, czalazar@ismm.edu.cu

Profesor Instructor. Máster en Electromecánica. Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Ever Góngora-Leyva, egongora@ismm.edu.cu

Profesor Auxiliar. Doctor en Ciencias Técnicas. Departamento de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Yoalbys Retirado-Mediaceja, yretirado@ismm.edu.cu

Profesor Auxiliar. Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Manuel Arturo Falconí-Borja

Profesor. Ingeniero. Universidad Técnica Equinoccial, Santo Domingo, Ecuador

Luis Fernando Mata-Jácome

Profesor. Ingeniero. Universidad Técnica Equinoccial, Santo Domingo, Ecuador