

## Determinación de factores de emisión durante procesos de erosión eólica en pilas de áridos

Determination of emission factors during wind erosion processes in  
aggregate piles

María Cristina Olivera-Ferrer<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6902-6503>

Anel Hernández-Garcés<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3666-1746>

Victor Iriarte-Docampo<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8182-1705>

<sup>1</sup>Empresa de Canteras, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), La Habana, Cuba

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), La Habana, Cuba

\*Autor para correspondencia: [maryc.olivera@gmail.com](mailto:maryc.olivera@gmail.com)

### RESUMEN

La actividad minera es una fuente importante de contaminación atmosférica donde se producen grandes cantidades de material particulado que generan impactos ambientales, sanitarios y económicos. Las emisiones de polvo pueden ser generadas por la erosión eólica en las pilas de almacenamiento de agregados expuestas en una instalación industrial, que en muchas ocasiones, provocan la contaminación de las producciones, daños al Medio Ambiente y a la salud de los trabajadores. En el presente trabajo se estimaron los factores de emisión y las tasas de emisión (Q) en la UEB productiva Canteras Mariel, durante procesos de erosión eólica en pilas de áridos de granito, arena, gravilla y macadam. Se aplicaron las normas NC 182/2002 para la toma de muestras, NC 671/2008 para determinar el contenido de finos y la norma AP 42/ 2023 de la EPA para determinar los factores y tasas de emisión. Como resultado se obtuvieron tasas de emisión (Q) de:  $4,053 \cdot 10^{-4}$ ,  $3,182 \cdot 10^{-4}$ ,  $7,460 \cdot 10^{-2}$  y  $2,263 \cdot 10^{-1}$  g/s, para cada árido respectivamente.

**Palabras clave:** áridos; emisiones; erosión eólica; tasa de emisión.

## ABSTRACT

Mining activities are a significant source of atmospheric pollution, producing large quantities of particulate matter that lead to environmental, health, and economic impacts. Dust emissions can be generated by wind erosion from storage piles of aggregates exposed in an industrial facility, which often causes contamination of products, environmental damage, and harm to workers' health. This study estimated the emission rates at the productive UEB Canteras Mariel during wind erosion processes in piles of granite, sand, gravel, and macadam, resulting in values of  $4,053 \times 10^{-4}$ ,  $3,182 \times 10^{-4}$ ,  $7.460 \times 10^{-2}$ , and  $2,263 \times 10^{-1}$  g/s, respectively.

**Keywords:** aggregates; emissions; wind erosion; emission rate.

Recibido: 10/01/2025

Aceptado: 18/04/2025

## Introducción

El término polvo se aplica a partículas sólidas, inanimadas y no solubles en agua que se originan a raíz de la disgregación de materiales rocosos o de suelos. La emisión excesiva de polvo puede generar riesgos para la salud de los trabajadores, daños al medio ambiente e incidencias en la producción.<sup>(1)</sup>

Por otra parte, el material particulado (MP) es un término utilizado para referirse a partículas suspendidas en el aire, debido tanto a causas naturales como por acciones humanas. El tamaño del MP se expresa como el diámetro aerodinámico, el cual se refiere a la unidad de densidad de partículas esféricas con las mismas propiedades aerodinámicas, tales como la velocidad de caída. El MP con diámetro aerodinámico  $\text{Ø}10 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) y  $2,5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ) se emite por numerosas fuentes (plantas de energía, fábricas de cemento, y de diverso tipo, volcanes, incendios forestales y pastizales, atomizadores o aerosoles), fuentes no puntuales (camiones, automóviles, actividades agrícolas, caminos de terracería, ranchos ganaderos) y sitios de construcción. Debido a su densidad y tamaño, en cuanto más pequeña es la partícula, mayor es el tiempo en que permanece en el aire.<sup>(2)</sup>

La contaminación por polvo es un problema complejo de creciente interés ambiental, sanitario y económico. El viento constituye un eficaz agente de erosión que puede ser capaz de arrancar, levantar y acarrear ingentes cantidades de polvo a través de largas distancias mientras que las partículas más gruesas sólo pueden ser transportadas a distancias relativamente cortas.<sup>(3)</sup>

En la provincia Artemisa se evaluaron los factores de emisión para la industria azucarera.<sup>(4)</sup> Otros estudios en Cuba estimaron factores de emisión con el fin de evaluar el impacto de la contaminación atmosférica en la calidad del aire.<sup>(5,6,7,8,9,10,11)</sup>

En la industria de producción de material granulado, que se utiliza principalmente como materia prima en la construcción, según Gutiérrez (2010),<sup>(12)</sup> la Empresa Extractora y Comercializadora de Áridos Santa Fe de Chile en sus procesos de producción acumula pilas de granito, arena, gravilla y macadam durante días y hasta meses; en consecuencia, se pueden ver afectadas por la acción del viento que puede provocar la erosión de notables cantidades de polvo.

Precisamente, en los caminos no pavimentados desde el frente de canteras "La Molina" hasta los centros productivos de la Unidad Empresarial de Base Canteras Mariel, así como en pilas de almacenamiento de áridos se determinó un contenido de fino promedio de 24,9% y 12,80% respectivamente.<sup>(13)</sup> Además, se determinaron de factores y tasas de emisión durante las transferencias continuas de material en la formación de pilas de áridos.<sup>(14)</sup>

Los métodos de evaluación del impacto ambiental para la gestión de la contaminación por material particulado se basan en la simulación de la dispersión de polvo, por medio de una caracterización precisa del término fuente y de los parámetros que intervienen.<sup>(15)</sup>

La presente investigación se desarrolló en la Unidad Empresarial de Base productora de áridos Canteras Mariel, perteneciente a la Empresa de Canteras, La Habana, Cuba. Una vez concluido el proceso productivo, sobre las superficies de los áridos acopiados actúa el viento causando emisión de finos; también, en muchas ocasiones provoca la contaminación de los diferentes surtidos de producción en los patios de acopio. Actualmente se desconoce el impacto medioambiental de estas emisiones de material fino.

El propósito de este trabajo fue determinar los factores de emisión y las tasas de emisión, durante procesos de erosión eólica en pilas de áridos de granito, arena, gravilla y macadam en la UEB productiva Canteras Mariel.

## Materiales y métodos

### Ubicación y descripción del área de estudio

Los estudios para la determinación del contenido de material fino, factor de emisión y tasas de emisión se realizaron en la UEB Canteras Mariel, yacimiento La Molina, específicamente el área de estudio se encuentra ubicada en al Noreste de Artemisa en la parte Sur de la vía Mariel playa El Salado, entre la carretera de Machurrucutu y la Autopista Nacional Habana – Pinar del Río. El mismo se encuentra a una distancia de 5 km del poblado de El Mariel y a 7 km de Guanajay (figura 1).



**Fig.1-**Yacimiento la molina donde se aprecian los poblados del Mariel y Guanajay

Las determinaciones del porcentaje del contenido de material fino se realizaron en el laboratorio físico de la Empresa de Canteras del MICONS.

#### **Determinación del contenido de finos en las pilas activas de agregados**

Para la determinación de finos se realizó un muestreo puntual según Norma Cubana (NC) 671: 2008 <sup>(16)</sup>; empleando un depósito para muestra de alrededor 30 g del material de la superficie en las pilas de los áridos a estudiar (granito, arena, gravilla y macadam) en sus respectivos patios de acopio.

Luego de acuerdo con la NC 182: 2002 <sup>(17)</sup>, fueron sometidas a un tamizado húmedo a través de un tamiz de diámetro 0,074 mm. Dicha suspensión fue decantada y secada en una estufa a convección forzada siendo determinando luego por el método gravimétrico el porciento de contenido de finos.

### **Cálculo de los factores de emisión por erosión eólica en pilas activas de agregados**

Los datos para la determinación del factor de emisión en pila de agregados producto de la erosión eólica se determinaron a partir de las muestras de pilas acopiadas en el terreno de la instalación.

El factor de emisión para las emisiones de partículas generadas por el viento provenientes de mezclas de materiales de superficie erosionables y no erosionables sujetos a perturbaciones se puede expresar en unidades de gramos por metro cuadrado (g/m<sup>2</sup>) por año. De acuerdo con la metodología del reporte AP 42 de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), <sup>(2)</sup> la formulación del factor de emisión predictivo se puede expresar según la ecuación 1:

$$E = k \sum_{i=1}^N P_i \quad (1)$$

donde

K: multiplicador de tamaño de partículas;

N: número de perturbaciones por año;

P<sub>i</sub>, potencial de erosión correspondiente a la milla de viento más rápida (g/m<sup>2</sup>)

El multiplicador del tamaño de partícula (k) para la ecuación 1 varía con el tamaño de partícula aerodinámica (tabla 1).

**Tabla 1-Valores de multiplicador de tamaño de partículas**

<b>30 micras</b>	<b>&lt; 15 micras</b>	<b>&lt; 10 micras</b>	<b>&lt; 2,5 micras</b>
1,0	0,6	0,5	0,075

Fuente: Reporte AP 42, epígrafe 13.2.5 Erosión eólica industrial

La función potencial de erosión para una superficie seca y expuesta se determina mediante la norma AP 42.<sup>(2)</sup>

$$P = 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) \quad (2)$$

Donde,  $u^*$ : velocidad de fricción (m/s),  $u_t^*$ : velocidad umbral de fricción (m/s)

Para convertir la milla de viento más rápida ( $u^+$ ) desde una altura de anemómetro de referencia de 10 m a la velocidad de fricción equivalente ( $u^*$ ), se emplea AP 42 (3).

$$u^* = 0,053 * u_{10}^+ \quad (3)$$

Donde,  $u^*$ : velocidad de fricción (m/s),  $u_{10}^+$ : milla más rápida del anemómetro de referencia (m/s)

La milla de viento más rápida se obtuvo de la estación meteorológica de Bauta, a partir de datos correspondientes al año 2016.

## Resultados y discusión

### Contenido de finos en las pilas de material en la UEB Canteras Mariel

Se determinó que el contenido de finos fue mayor para el árido apilado gravilla, con un 16,56%, mientras que se obtuvo el menor valor para la arena con un 1,67% (tabla 2). Los mayores valores de contenido de finos se asocian a los materiales que poseen un mayor tamaño granulométrico ya que, por la acción de factores como el viento y la lluvia, se logra la mayor adherencia a la superficie de ellos.

**Tabla 2-** Contenido de finos en las muestras de áridos apilados

Muestra	Áridos apilados	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Contenido de Finos (%)
1	Granito	30,2	4,5	14,90
2	Arena	29,9	0,5	1,67
3	Gravilla	30,4	5,5	18,09
4	Macadam	30,2	5,0	16,56

### Factores de emisión por erosión eólica en pilas activas de agregados

Teniendo en cuenta que la milla más rápida del anemómetro de referencia fue de 40 m/s, a través de (3) se obtuvo una velocidad de fricción ( $u^*$ ) de 2,12 m/s. Los valores de las velocidades umbral de fricción se estimaron de acuerdo con los estudios de Batt y colaboradores <sup>(18)</sup> y estos fueron de 3,10 para el granito; 1,55 para la arena, 6,50 para la gravilla y 9,90 para el macadam (tabla 3).

Conociendo estos dos parámetros, se determinaron los valores de la función potencial de erosión para las pilas de acopio de áridos de acuerdo con (2).

Además, se calcularon los factores de emisión a partir de (1), considerando el valor de multiplicador de tamaño de partículas de 30  $\mu\text{m}$  (al tratarse en este caso de un estudio de contenido de finos) y que toda la superficie de la pila queda expuesta durante un período de 1 mes después de retirar una pila, por lo cual el número de perturbaciones por año es  $N = 1$  (tabla 3).

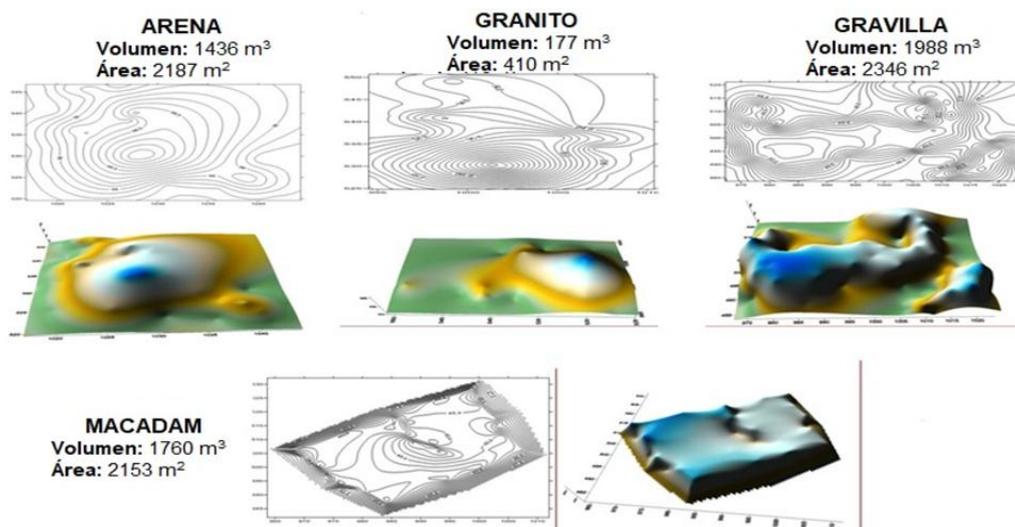
**Tabla 3-** Velocidad umbral de fricción, potencial de erosión y factor de emisión en pilas de áridos

Áridos apilados	$u_t^*$ (m/s)	$P$ (g/m <sup>2</sup> )	$E$ (g/m <sup>2</sup> )
Granito	3,10	31,20	31,20
Arena	1,55	4,59	4,59
Gravilla	6,50	1003,20	1003,20
Macadam	9,90	3316,15	3316,15

### Determinación de las tasas de emisión por erosión eólica en pilas

Las tasas de emisiones generadas por el evento de erosión se calculan como el producto del multiplicador de PM-30 ( $k=1$ ), el factor de emisión y el área de la fuente.

El área de las pilas de áridos (figura 2), fue determinada a través de técnicas topográficas en el terreno y posterior empleo del programa TopoCal que permite generar modelos digitales que representan las características de un terreno.



**Fig. 2-**Modelos obtenidos por el programa TopoCal

De acuerdo a los valores de las tasas de emisión Q (tabla 4), la arena es el árido que menos emite a la atmósfera ya que durante su proceso de obtención se le realiza un beneficio húmedo y se apila con altos valores de humedad; sin embargo, el macadam muestra la mayor emisión ya que al parecer, su mayor área superficial permite a los finos adherirse en mayor medida a su superficie.

**Tabla 4-** Tasas de emisión (Q) para la erosión eólica en pilas activas de agregados

Áridos apilados	Q (kg/año)	Q (g/s)
Granito	12,79	$4,053 \cdot 10^{-4}$
Arena	10,04	$3,182 \cdot 10^{-4}$
Gravilla	2353,51	$7,460 \cdot 10^{-2}$
Macadam	7139,67	$2,263 \cdot 10^{-1}$

Se espera que los factores de emisión que se determinaron en esta investigación contribuyan a simular el alcance del material particulado producto de la dispersión, con el empleo de un simulador de calidad del aire, para evaluar la calidad del aire en su entorno.<sup>(19, 20)</sup>

## Conclusiones

Se determinó que los valores de contenidos de finos para los áridos: granito, arena, gravilla y macadam son: 14,90 %, 1,67 %, 18,09 % y 16,56 %, respectivamente.

Se obtuvieron valores de factor de emisión para el granito, arena, gravilla y macadam de: 31,20, 4,59, 1003,20 y 3316,15 g/m<sup>2</sup>, respectivamente; y tasas de emisión de:  $4,053 \cdot 10^{-4}$ ,  $3,182 \cdot 10^{-4}$ ,  $7,460 \cdot 10^{-2}$  y  $2,263 \cdot 10^{-1}$  g/s, respectivamente.

## Referencias bibliográficas

1. ANEFA. *Explotaciones de áridos y Medio Ambiente* [en línea]. España. [Consultado 14 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.aridos.org/manual-de-aridos>
2. EPA, AP-42. *Miscellaneous Sources: Industrial Wind Erosion* [en línea]. Estados Unidos. [Consultado 13 junio 2024]. Disponible en: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch13/final/c13s0202.pdf>

3. EPA, AP-42. *Miscellaneous Sources: Aggregate Handling and Storage Piles* [en línea]. Estados Unidos. [Consultado 13 junio 2024]. Disponible en: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition>
4. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A., REINOSA-VALLADARES, M., HERNÁNDEZ-BILBAO, F. y CANCIANO-FERNÁNDEZ, J. *Emisión a la atmósfera de contaminantes procedentes de centrales azucareros en Artemisa* [en línea]. 2019. *Revista Cubana de Ingeniería*, **10**(3), 63-70. Disponible en: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/733/0>
5. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A., REINOSA-VALLADARES, M. y HERNÁNDEZ-BILBAO, F. *Contaminantes atmosféricos emitidos por centrales azucareros cienfuegueros* [en línea]. 2017. *Revista Universidad y Sociedad*, **9**(2), 70-74. Disponible en: <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/713>
6. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A., REINOSA-VALLADARES, M., ORDOÑEZ, Y. C. y HERNÁNDEZ, F. *Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros espirituanos* [en línea]. 2016. *Revista Eco Solar*, **56**, 1-7. Disponible en: <https://dspace.uniss.edu.cu/handle/123456789/7718>
7. PEÑA-COSSÍO, R. y HERNÁNDEZ-GARCÉS, A. *Inventario de las fuentes fijas que producen contaminantes atmosféricos en la bahía de La Habana* [en línea]. 2020. *Revista Cubana de Ingeniería*, **11**(1), 31-37. Disponible en: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/736/>
8. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A., REINOSA-VALLADARES, M. y HERNÁNDEZ-BILBAO, F. *Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros de la provincia de Holguín* [en línea]. 2018. *Revista Minería y Geología*, **34**(3), 363-373. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v34n3/mg09318.pdf>
9. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A., REYNOSA-VALLADARES, M., HERNÁNDEZ-BILBAO, F. y CANCIANO-FERNÁNDEZ, J. *Emisión de contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros santiagueros* [en línea]. 2018. *Revista Tecnología Química*, **39**(2), 390-402. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/4455/445559634010/html/>
10. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A., TRUJILLO, J., REINOSA, M., CANCIANO, J. y HERNÁNDEZ, F. *National inventory of air quality pollutants from the bagazo burning* [en línea]. 2020, 17-20. Disponible en: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20230324506>

11. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A., PEÑA-COSSÍO, R., HERNÁNDEZ- BILBAO, F. y GONZÁLEZ, J. A. *Distribución espacial de la emisión de contaminantes a la atmósfera emitidos por centrales azucareros villaclareños* [en línea]. 2021. Revista Centro Azúcar. **48(3)**, 29-40. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S222348612021000300029&script=sci\\_arttext&lng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S222348612021000300029&script=sci_arttext&lng=en)
12. GUTIÉRREZ, C. M. y RIVAS, S. P. *Tratamiento de Agua y Gestión y Tratamiento de Residuos* [en línea]. Cuba. [Consultado 20 junio 2024]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/284188773>
13. OLIVERA-FERRER, M. C., RAGNAR-MEDINA, L. y HERNÁNDEZ-GARCÉS, A. *Determinación del contenido de finos en las Canteras Mariel* [en línea]. 2023. Revista Minería y Geología, **39(4)**, 267-276. ISSN 1993 8012.
14. OLIVERA-FERRER, M. C., HERNÁNDEZ-GARCÉS, IRIARTE-DOCAMPO, V. *Determinación de factores de emisión durante procesos de transferencias continuas de material en formación de pilas de áridos* [en línea]. 2023. Revista INFOMIN, **15**, cu-id. E-ISSN: 1992-4194.
15. ROMEO, A., CAPELLI, L., SIRONI, S., NANO, G., ROTA, R., BUSINI, V. *Dust emission and dispersion from mineral storage piles* [en línea]. 2017. Environmental Science and Pollution Research, **24**, 22663-22672. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-9881-9>
16. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, NC 671. Áridos. Toma de muestras. Método de ensayo. 1ra Edición. ICS: 91.100.20, 2008.
17. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, NC 182. Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No. 200). Método de ensayo. 1ra Edición. ICS: 91.100.20, 2008.
18. R-G, Batt y S-A, Peabody. Threshold friction velocities for large pebble gravel beds [en línea]. 1999. Journal of Geophysical Research, **104(D20)**. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/1999JD900484>
19. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A., JAUREGUI- HAZA, U., SOUTO-GONZÁLEZ, J., CASARES-LONG, J., SAAVEDRA -RODRÍGUEZ, S., GUZMÁN-MARTÍNEZ, F., TORRES-VALLE, A. Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones [en línea]. 2015. UCE Ciencia. Revista de Postgrado, **3(2)**, 1-17. Disponible en:

[https://www.academia.edu/69710836/Estado\\_actual\\_de\\_los\\_modelos\\_de\\_dispersi%C3%B3n\\_atmosf%C3%A9rica\\_y\\_sus\\_aplicaciones](https://www.academia.edu/69710836/Estado_actual_de_los_modelos_de_dispersi%C3%B3n_atmosf%C3%A9rica_y_sus_aplicaciones)

20. ORDOÑEZ-SÁNCHEZ, Y. C., REINOSA-VALLADARES, M., HERNÁNDEZ-GARCÉS, A. y CANCIANO-FERNÁNDEZ, J. Aplicación de modelos simplificados para la dispersión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio [en línea]. 2018. *Revista Cubana de Química*, **30**(1), 90-103. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/4435/443557751008/html/>

### **Conflicto de interés**

Los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con el presente artículo a publicar.

### **Contribuciones de los autores**

María Cristina Olivera Ferrer: realizó el estudio, análisis y escritura del artículo.

Anel Hernández Garcés: colaboró con el análisis de los resultados y la escritura del artículo.

Victor Iriarte Docampo: colaboró con el análisis de los resultados y la escritura del artículo.