



FENOMENOLOGÍA DE LOS VÓRTICES ATMOSFÉRICOS EN VENEZUELA: TROMBAS MARINAS Y LACUSTRES EN EL PERIODO 2008-2018

GLADYS CASTILLO ^{1,2} y NELSON FALCON.¹

¹ Laboratorio de Física de la Atmosfera y Espacio Ultraterrestre, FACYT Dpto. de Física. Universidad de Carabobo. Valencia Carabobo.

² Instituto Pedagógico de Maracay Rafael Escobar Lara, Dpto. de Física. Universidad Pedagógicas Experimental Libertador. Maracay Aragua. Venezuela.

Gladys.castillo.ipmar@upel.uc.ve nelsonfalconv@gmail.com

Recibido: 14/05/2025, Revisado: 18/06/2025, Aceptado: 25/07/2025

Resumen

Se presenta una síntesis fenomenológica de trombas Marinas y Lacustres, con documentación inequívoca, acaecidas en el país, en la última década. Junto a la caracterización extraída de la planimetría fotométrica en los registros noticiosos. Adicionalmente se desarrolla un modelo del balance energético en los vórtices. Se concluye que las trombas Marinas y Lacustres tienen una fenomenología similar, siendo las ultimas más frecuentes y asociadas a nubes bajas de 500-800 m. En general las condiciones de ocurrencia del modelo prescriben una diferencia de temperatura entre el viento cizallante y la temperatura superficial del agua de orden de 4 -5 °C, humedad relativa del 70% y confluencia de corrientes de viento con velocidades del orden de 2 m/s. Se concluye las trombas marinas son de categoría F1-F2 en la escala de Fujita-Pearson, mayormente asociados a cizalladuras orográficas y a la variación de la advección en altura.

Palabras clave: Vórtices atmosféricos, Trombas Marinas, eolometeoros, Lago de Maracaibo.

Phenomenology of atmospheric vortices in Venezuela: waterspouts and lake-spouts in the period 2008-2018

Abstract

A phenomenological synthesis of waterspouts and lake spouts, with unequivocal documentation, that have occurred in the country over the last decade is presented. Characterization is extracted from photometric planimetry in news records. Additionally, a vortex energy balance model is developed. It is concluded that waterspouts and lake spouts have similar phenomenology, with the latter being more frequent and associated with low clouds at 500-800 m. In general, the model's occurrence conditions prescribe a temperature difference between wind shear and water surface temperature of 4-5 °C, relative humidity of 70%, and confluence of wind currents with speeds of 2 m/s. It is concluded that waterspouts are category F1-F2 on the Fujita-Person scale, mostly associated with orographic shear and variations in upper-air advection.

Key words Atmospheric vortices, waterspouts, wind meteors, Lake Maracaibo

1. Introducción

Entre los eolometeoros o fenómenos transitorios del viento, destacan los vórtices atmosféricos que se producen por el movimiento combinado de ascensión y rotación de fluidos en trayectorias cerradas, a raíz de una inestabilidad térmica local. Los vórtices se caracterizan por el desplazamiento repentino de aire, agua y/o partículas (humo, polvo, agua, nieve, etc.) en trayectorias helicoidales ascendentes dentro de la capa límite planetaria (Doswell y Burgess 1993) y destacan como meteoros cuando hay transporte de partículas que permitan visualizar las líneas de corriente ascendentes del fluido, bien como remolinos de viento, tolvánas, remolinos de humo, de fuego o nieve. Mientras que en condiciones muy húmedas se hacen visibles por el agua condensada que es transportada en el ducto, en contraste con el aire circundante.

Las trombas marinas son vórtices de viento intenso que se caracterizan principalmente por una columna de vapor de agua que se extiende desde la superficie del mar hasta el nivel de las nubes (Wakimoto y Wilson, 1989) ocurren en todas las latitudes, pero su duración y magnitud son mayores en latitudes subtropicales, especialmente en las Antillas, Los Baleares y costa este de Estados Unidos. Los Tornados y las Trombas Marinas ocurren también en Venezuela, aun cuando su intensidad y frecuencia son menores que en otras latitudes. Falcon y colaboradores han reportado numerosas ocurrencias de trombas marinas en los últimos años, principalmente en el Lago de Maracaibo, las costas del Mar Caribe, y en el Lago de Valencia (Sira et al 2010, Falcon et al 2012, Peña y Falcon 2012).

También se ha establecido (González y Falcón, 2015) que el origen de las trombas y tornados en Venezuela, donde la aceleración de Coriolis es despreciable, es debido a la transición entre los regímenes barotrópico y

baroclínico en la capa límite planetaria, debido a la convergencia entre masas de aire caliente-húmedo y frío-seco sobre una superficie sobrecalentada, con cizalladura de vientos y humedad relativa cercanas a la saturación.

Los tornados en Venezuela son de categoría F1 de la escala Fujita-Pearson mientras que las trombas marinas en Venezuela no exceden la escala F2, a diferencia de las trombas marinas interoceánicas y mediterráneas que pueden alcanzar valores de F3 y F4 (Falcon et al 2012). Los tornados y trombas marinas son fenómenos de muy corta duración, entre las decenas de minutos y las dos horas; y su frecuencia es de solo dos o tres eventos anuales reportados (Sira et al 2012). Su ocurrencia en zonas urbanas, sobre plataformas petroleras en el Lago de Maracaibo y/o en zonas portuarias, constituye un riesgo importante por la severidad de los daños materiales y humanos que ocasionan.

Aún queda por precisar las regiones más propensas de formación de vórtices atmosféricos severos (tornados y trombas marinas), las épocas de ocurrencias y las condiciones meteorológicas sinópticas que los generan. Para ello hay que establecer las estadísticas espacio-temporales de las trombas marinas y lacustres (sección 1), cuantificar las magnitudes de los vórtices, según aparecen ocasionalmente registrados como noticias en las documentaciones fílmicas y fotográficas *amateur* sobre casi todo el territorio nacional (sección 2), describir y modelar la evolución de los vórtices atmosféricos como inestabilidades convectivas en la interfaz agua-atmósfera (sección 3 y 4 respectivamente). Finalmente, las conclusiones generales se muestran en la última sección.

2. Metodología

Se realizó una búsqueda exhaustiva de información en fuentes digitales para

documentar los eventos de tornados y trombas marinas en Venezuela durante el período comprendido entre 2008 y 2018. Se utilizaron las herramientas avanzadas del motor de Google para hallar noticias, registros fílmicos e imágenes de eventos publicados en línea, relacionadas con tornados y trombas marinas en Venezuela, contando solo aquellas que podían ser verificables su autenticidad y autoría.

Se conformó una base de datos en línea, georreferenciada, a partir de la información obtenida en la búsqueda bibliográfica y en las redes sociales (Falcon 2018). Cada registro incluyó la fecha, hora, ubicación geográfica (latitud y longitud), descripción del evento e imágenes. Para un total de 38 eventos de vórtices en el periodo considerado, limitándose este estudio a trombas marinas y lacustres, discriminadas como vórtices costeros, lacustres e insulares, cuya distribución geográfica se muestra en la figura 1.



Figura 1: Distribución espacial de trombas marinas en el periodo 2008-2018, se destacan los eventos analizados planimétricamente en este trabajo.

Toda la región insular de Venezuela, las costas orientales y occidentales y los lagos de Maracaibo y Valencia acusan vórtices atmosféricos de tipo tornádico. Los Estados Zulia (Lago de Maracaibo) y Nueva Esparta (Isla de Margarita) acusan mayores registros- Puede deberse a un sesgo estadístico por ser zonas densamente pobladas.

La distribución temporal de los vórtices se muestra en la figura 2. Obsérvese que la mayor ocurrencia es en los meses de julio a noviembre en las regiones insulares y costeras, debido quizá a las inestabilidades producidas por la llegada de las ondas tropicales del periodo lluvioso. Sin embargo, las trombas lacustres pueden aparecer también en el mes de mayo al inicio de la temporada húmeda en Venezuela.

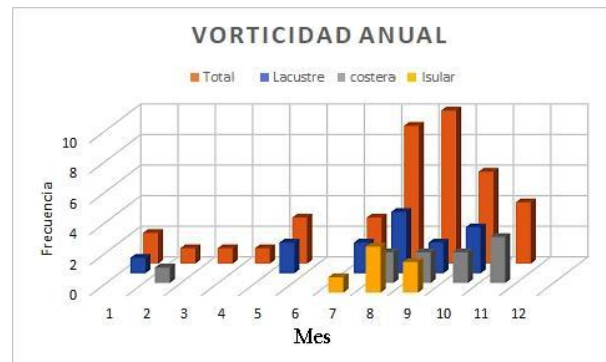


Figura 2: Distribución anual de los eventos de vorticidad en el periodo 2008-2018.

Se seleccionaron cuatro trombas marinas y lacustres acaecidas en los años 2012, 2015, 2016 y 2017 (fig. 1), que contaban cada una con varias documentaciones fidedignas, de buena calidad y duración, que permitían seleccionar fotogramas para el análisis planimétrico siguiendo la metodología establecida en trabajos similares (Wakimoto y Wilson 1989, Sira et al 2010, Peña et al 2012, Falcon et al 2012).

Un criterio adicional de selección es el de completitud y panorámica, que consiste en el requerimiento que el registro muestre la morfología completa del evento. Deben estar documentados las tres zonas morfológicas de la

tromba: (i) la zona de *spray* o de interfase agua-aire, (ii) el ducto que conecta la superficie con la base la nube, y (iii) la zona de embudo o de conexión entre el ducto y la nube generatriz; además de panorámicas generales con objetos y/o accidentes geográficos que puedan servir de referencias espaciales en la planimetría y evolución temporal, cuyos resultados se sintetizan en la sección siguiente.

3. Resultados

El análisis morfológico permite establecer las magnitudes relevantes del vórtice: dimensiones del ducto, volumen de la zona de spray, velocidad superficial del viento, velocidad angular en la zona de spray y volumen del embudo. La altura de la nube informa el Nivel de Condensación por Elevación (LCL) en el que una parcela de aire húmedo se satura condensándose. Es una estimación razonable de la altura de la base de las nubes cuando las parcelas experimentan un ascenso forzado.

3.1. Tromba Marina Punto Fijo 2012

Este fue un evento muy notable por su cercanía a las Refinerías petroleras de Amuay y Punta Cardón, en la población de Punto Fijo de la Península de Paraguaná (Edo Falcón). Ampliamente documentado, y se trató de dos trombas marinas simultaneas, una de las cuales se aproximó hasta la costa y se desvaneció justo antes de entrar en contacto terrestre. Su duración fue de unos 150 minutos aproximadamente y la nube generatriz de muy baja altitud (409 msnm) tipo nimbus-estratus y en condiciones de buen tiempo. Las dimensiones de la tromba más próxima pudieron estimarse como se muestra en la figura 3.

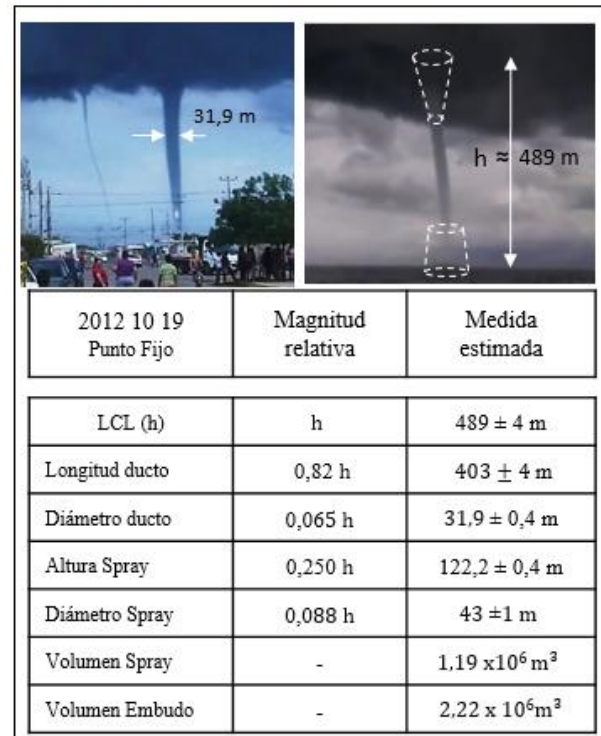


Figura 3: Análisis planimétrico de la tromba Marina 2012 10 19 Punto Fijo.

3.2. Tromba Lacustre Maracaibo 2015

Los avistamientos de trombas al interior del lago de Maracaibo son frecuentes durante casi todo el año, incluso hay reporte de trombas dobles y cuádruples. Sin embargo, los registros suelen ser desde embarcaciones en movimiento, reportes parciales de su avistamiento en el horizonte y/o videos parciales del ducto de los vórtices como aspecto más conspicuo, que los lugareños denominan “mangueras de agua”.

El registro 2015 09 18 permitió la planimetría por la ocurrencia del vórtice en la cercanías de un carguero petrolero clase Panamax El fenómeno se desarrolló bajo condiciones lluviosas, desde nubes cumulo-nimbus de baja altitud y ráfagas de viento en altitud que ocasionó el alargamiento del ducto vorticoso como se muestra en la figura 4..

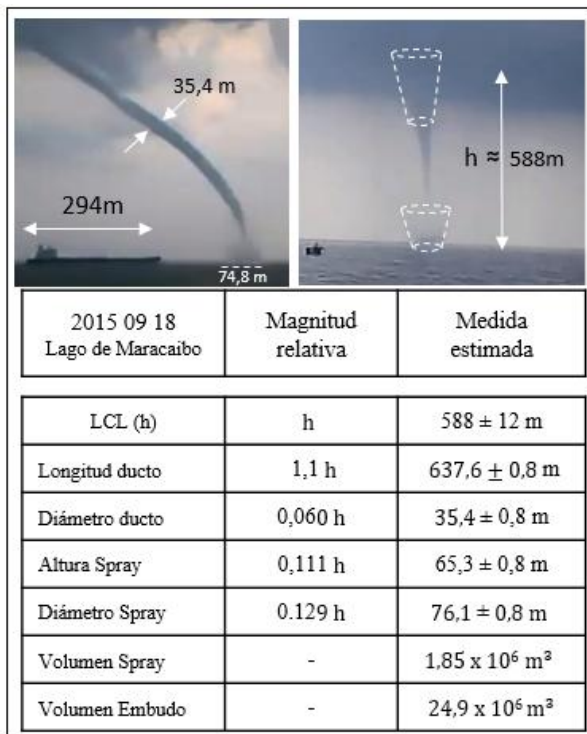


Figura 4: Análisis planimétrico de la tromba Marina 2015 09 18 Lago de Maracaibo.

Adviértase la similitud entre la tromba lacustre y la ocurrida en la bahía de Paraguaná en cuanto a morfología y dimensiones,

3.3. Tromba Marina Caraballeda 2016

En el litoral del Estado La Guaira, a barlovento de la cordillera de la costa, son frecuentes las trombas marinas; que se generan lejos de la costa y cuyo avistamiento permite su registro desde las localidades de la Guaira, Caraballeda y los Corales, situadas a mayor altitud respecto a la costa. Al inicio de la época lluviosa los vientos alisios recorren el litoral central casi paralelo al mar caribe. El vórtice 2016 09 13 fue similar al registrado en el 2011 11 11 en Caraballeda (González y Falcon 2015). Ambos con niveles LCL del orden de mil metros, embudos prominentes que descienden desde nubes nimbus-estratus en mar abierto, y con humedad relativa menor comparativamente a las trombas lacustres y de bahías costeras como las referidas previamente (Figura 5).

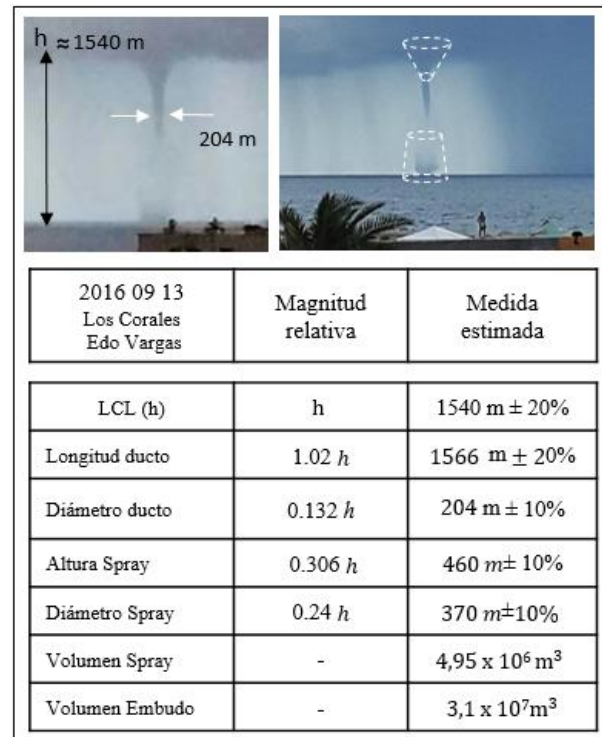


Figura 5: Análisis planimétrico de la tromba Marina 2016 09 13 Los Corales

3.4. Tromba Marina Cumaná 2017

En el litoral oriental, a barlovento del Turimiquire (Estados Sucre y Anzoátegui) son frecuentes los vórtices que se presentan en la temporada lluviosa y de inestabilidad atmosférica. Son morfológicamente similares a las trombas del litoral central e insulares, con ductos más angostos y largos que en las trombas lacustres, amplias zonas de spray y embudos más prominente, que descuelgan desde nubes de mayor desarrollo vertical y altura. En la misma región se han reportado eventos similares como 2006 08 08, 2010 02 12 Barcelona (Sira et al 2010) y 2007 10 25 Barcelona (Falcon et al 2012), Las dimensiones características se presentan en la Figura 6, y son similares a la Figura 5. Los volúmenes de la zona de embudo exceden en un orden de magnitud a las trombas lacustres.

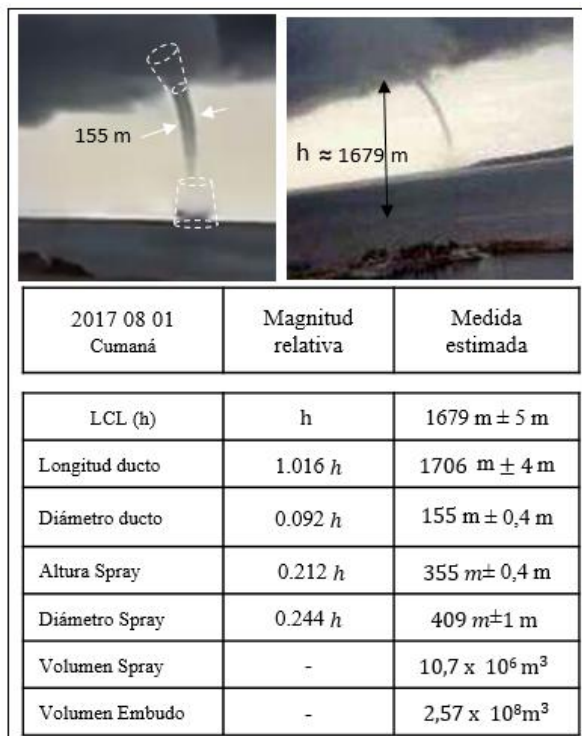


Figura 6: Análisis planimétrico de la tromba Marina 2017 08 01 Cumaná

3.5. Velocidad Lineal y angular

En unos pocos casos del material filmico colectado, es posible determinar la velocidad angular mediante la selección adecuada de fotogramas de partículas en movimiento, bien en el ducto o en la zona de spray de los vórtices. Similarmente en ocasiones puede evaluarse el desplazamiento tangencial a la línea de visión, bien del vórtice o del ducto, tomando referencias fijas en el terreno.

Para la tromba marina de Punto fijo en el 2012 se cuenta con varios registros desde observadores situados en diferentes lugares (figura 7). La velocidad angular medida en la etapa de madurez de la tromba, vale decir antes de su disipación y luego del establecimiento del ducto, fue del orden de 14 rad/s y un desplazamiento horizontal debido a la brisa costera, en el orden de 2 m/s.

La tromba marina de Isla de Margarita del 2017 09 12 fue captada fílmicamente cuando

penetró en la costa y se convirtió en un tornado categoría F1. La zona de spray quedó muy bien resuelta en los registros *amateur*, pero desafortunadamente no pudieron evaluarse las dimensiones del Ducto ni la altura de la nube nodriza (Figura 8).

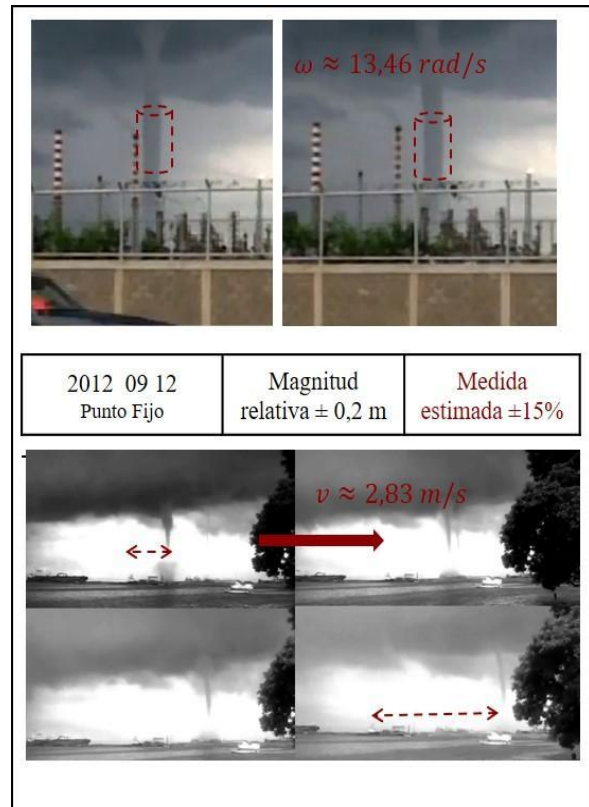


Figura 7: Estimación planimétrica de las velocidad angular y lineal en la tromba Marina 2012 10 19 Punto Fijo.

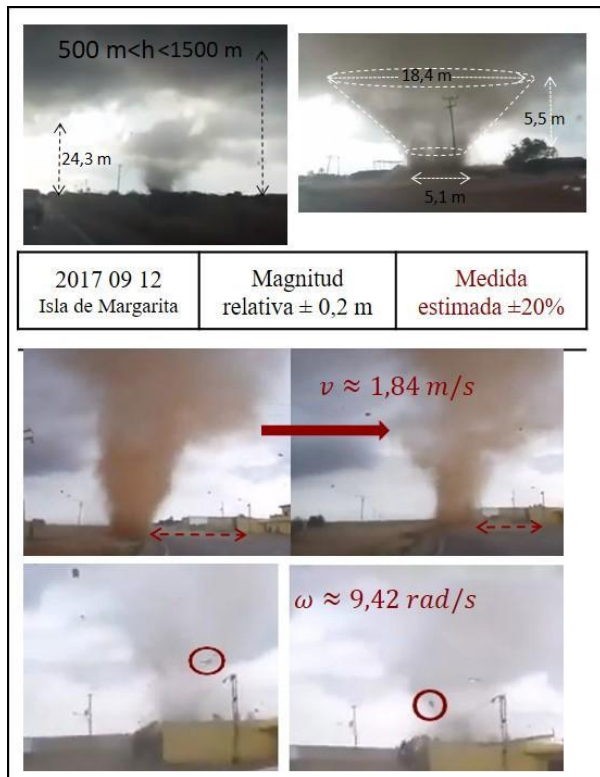


Figura 8: Estimación planimétrica de las velocidad angular y lineal en la tromba Marina 2017 09 12 Isla de Margarita.

Sin embargo, en la tromba de 2017 09 12 Isla de Margarita, la velocidad lineal sobre la superficie costera es del orden de la brisa marina 1,8 m/s y la velocidad angular del orden de 10 rad/s en acuerdo a reportes similares, como la tromba marina que penetró en la Isla La Tortuga 2008 08 29, Estado Nueva Esparta (Sira et al 2010).

4. Discusión

El viento cortante sobre la superficie libre del agua, tanto en el mar como en los lagos, ocasiona la disminución de la presión atmosférica sobre la parcela del fluido y genera la zona de spray con aire saturado de vapor. Si además hay cizalladura del viento o colisión de corrientes de aire caliente- húmedo y frío-seco, se genera un vórtice ascendente (Renno y Blustein 2001).

El giro produce una zona superior de

baja presión y en consecuencia actúa como un empuje ascendente, similar fenoménicamente al impulso ascensional de un *drom* o de un autogiro. A medida que el aire sobresaturado asciende en la atmosfera, se va enfriando debido al gradiente adiabático húmedo, hasta alcanzar la altura correspondiente del punto de rocío en la base de la nube (Nivel de Condensación Libre: LCL).

Las porciones del fluido caliente y húmedo ascendente, directamente en contacto con la atmosfera más fría circundante, se condensa formando gotitas, cuya opacidad a la luz “dibuja” un cilindro o columna que percibimos como el ducto de la Tromba. El vapor ascendente llega a la nube transportando calor por convección y contribuyendo a la energía convectiva disponible en la nube, y el aire húmedo se condensa formando gotas de agua que finalmente precipita en lluvia (Burgess 1993, González y Falcon 2015).

En primera aproximación las parcelas de fluido ascendente, de densidad ρ temperatura T y presión P , se mueven adiabáticamente entre la zona de Spray y la altura h (nivel LCL). La energía a nivel del mar, de cada parcela del fluido será solo cinética. Incluyendo el término rotacional en la zona de *spray* y en movimiento lineal de velocidad v (Fig 9).

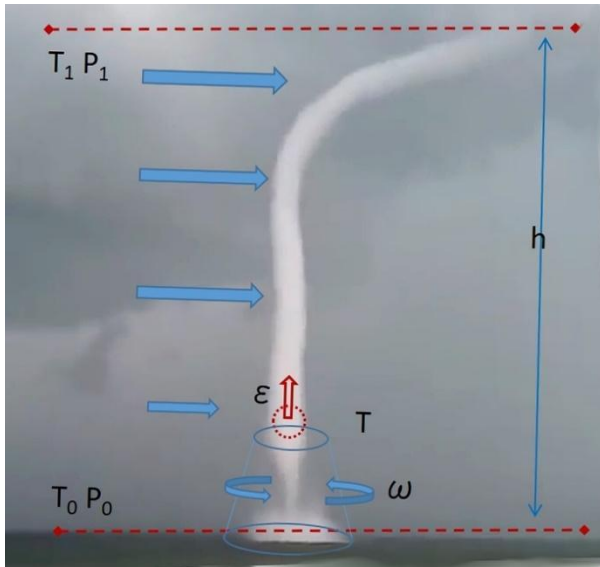


Figura 9: Modelo simplificado de una tromba Marina, el viento cortante (flechas azules) sobre una superficie sobrecalentada del fluido causa un vórtice de vapor en la zona de spray (trapezio). Las parcelas de fluido reciben un empuje desde el nivel de superficie hasta la altura del nivel de condensación. Imagen de la Tromba 2015 09 18 vista desde el puente Rafael Urdaneta en el Lago de Maracaibo.

Al ascender la parcela de fluido la energía cinética se transforma en energía potencial gravitatoria a la altura h y ocurre una transferencia de calor. La cantidad de calor por unidad de volumen, puede evaluarse a través del calor específico a volumen constante C_v , más la entalpía por unidad de volumen; que se incorpora a través del calor latente $L \approx 2,5$ MJ/kg, con lo cual el balance energético queda descrito por la ecuación de Bernoulli como:

$$\frac{\rho}{2} v^2 + \frac{I}{2} \omega^2 = \rho g h + \rho C_v \Delta T + \rho L + \Delta P \quad (1)$$

Donde I representa el momento de Inercia por unidad de volumen. Se ha considerado la variación de presión ΔP entre el nivel del mar (P_0) y el nivel LCL (P_1); y la variación de temperaturas de la parcela del fluido y la temperatura en el nivel LCL de la base de la nube: $\Delta T = T - T_1$.

El momento de Inercia por unidad de

volumen (I) puede ser modelado mediante un cono truncado, de radios mínimo y máximo r y R respectivamente (figuras 3,4,5 y 6), con lo cual:

$$I = \frac{3}{10} \frac{r^4 + r^3 R + r^2 R^2 + r R^3 + R^4}{r^2 + r R + R^2} \rho \quad (2)$$

Por otro lado, el nivel LCL puede expresarse en términos de la humedad relativa HR y la diferencia de temperatura como (Falcon 2007):

$$h \approx \frac{T - T_d}{8} \frac{km}{K} = \frac{100 - HR}{40} km \quad (3)$$

En la atmosfera húmeda la presión disminuye con la altitud, por lo tanto:

$$P_1 = P_0 (1 - \Gamma h / T_0)^{g/\Gamma R} \quad (4)$$

Donde $g \approx 9,8$ m/s², $\Gamma = 6,5$ K/km es el gradiente adiabático húmedo y la constante del aire $R \approx 687$ (1+0,6W) J/kg K. Donde se ha usado la razón de mezcla W del aire húmedo.

El empuje hidrostático (ϵ) por unidad de masa, para una parcela de fluido de temperatura T inmersa en el entorno de temperatura T_0 , como ocurre en la zona de spray, viene dado por (Rogers 1977):

$$\frac{\epsilon}{m} \cong g \left[\frac{T(1+0,6W) - T_0}{T_0} \right] \quad (5)$$

El conjunto de ecuaciones (1) - (5) se resuelve en términos de la razón de mezcla de la parcela de fluido húmedo en ascenso con Temperatura T y aceleración a , para valores de la temperatura inicial T_0 en el rango probable de 25-40 °C (Fig 10).

Se observa en general que los parámetros de ocurrencia de los vórtices: Temperatura del Spray, humedad (razón de mezcla W) y empuje ascendente (aceleración) son similares para los eventos estudiados. Además, pueden clasificarse en dos grupos separados: las trombas lacustres y de bahía (Pto Fijo y lago de

Maracaibo) y las trombas marinas propiamente dichas de mar abierto (Cumaná y Los Corales).

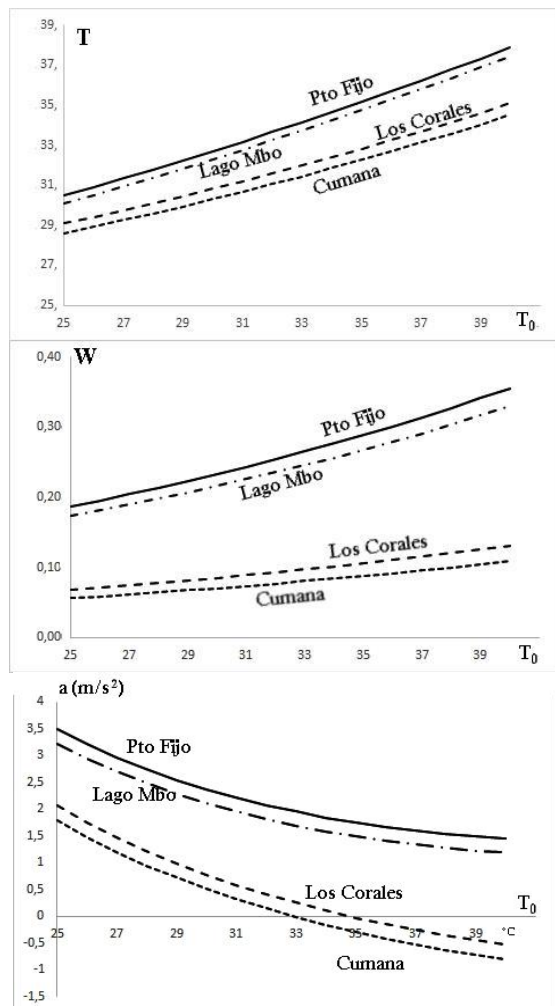


Figura 10: Condiciones de ocurrencia de las Trombas estudiadas, en función de la temperatura ambiente. Panel superior: Temperatura media del spray. Panel central razón de mezcla (aire húmedo/aire seco). Panel inferior empuje ascendente por unidad de masa.

Las trombas en aguas poco profundas (En Punto Fijo y Lago de Maracaibo) tienen mayor temperatura media en la zona de Spray respecto del entorno y mayor contenido de humedad, luego su aceleración es positiva para casi cualquier valor de la temperatura ambiente (T_0). De allí que sean más frecuentes y de mayor duración; mientras que las que ocurren en mar abierto pueden tener vórtices cuya aceleración sería negativa a temperaturas ambientales

mayores a 33 °C y los vórtices no evolucionarían para formar ductos hasta las nubes.

5. Conclusiones

El calentamiento diurno, la confluencia de vientos caliente-húmedo y frío-seco en el litoral caribeño venezolano y en los lagos de Maracaibo y Valencia; origina fenómenos de vorticidad severa, de categorías F1 a F2 en la Escala de Fujita-Pearson. La morfología de las trombas marinas observada es común a las reportadas en otras regiones como los Baleares, los lagos de Michigan y la costa Este de Estados Unidos. La ocurrencia de las trombas marinas del litoral es más frecuente a barlovento de la cordillera de la costa y del Turimiquire al oeste de Venezuela. Surgen mayormente a finales de la estación seca (mayo) y luego en época de la llegada de ondas tropicales (julio- octubre).

Las trombas lacustres y en bahías como las ocurridas en los Lagos de Maracaibo, lago de Valencia, Península de Paraguaná y el golfo de Cariaco, se producen asociadas a nubes bajas, con nivel LCL del orden de los 500-800 metros y con ductos de mayor diámetro que las trombas en mar abierto del litoral y zona insular. Estas se presentan desde nubes medias y de gran desarrollo vertical, con ductos más largos y curvados por el estiramiento, debido a vientos cizallantes a nivel de nubes estratocúmulo y cumulo nimbus,

Los modelos cuantitativos basados en el balance energético durante el transporte convectivo, permiten establecer que las trombas lacustres y costeras pueden ocurrir aún en condiciones meteorológicas no extremas, vale decir a finales de temporada seca, luego de un sobrecalentamiento diurno, en zonas de abundante evaporación y humedad con brisas marinas y aguas tranquilas. Para ello es suficiente una diferencia de temperatura entre el viento cizallante y la temperatura superficial del agua

de orden de 4 -5 °C, humedad relativa del 70% y confluencia de corrientes de viento con velocidades del orden de 2 m/s .

La frecuencia de estos eolometeoros: Trombas y Tornados, es del orden de 2-3 por año; pero aún no hay suficientes reportes completos ni radares *Doppler* que permitan elaborar mapas de riesgo para prevenir los daños materiales sobre todo en instalaciones sensibles: portuarias y petrolíferas, abundantes en las zonas de ocurrencia hasta ahora documentada.

6. Agradecimientos

Se agradece el financiamiento del Ministerio del Poder Popular para la Ciencia y Tecnología a través del proyecto **CFP 2025000011**: Fenómenos Transitorios en la Troposfera: Electrometeoros y Vórtices Atmosféricos.

7. Referencias

Burgess, D.W. (1993) Tornadoes and tornadic storms: a review of conceptual models. Monogr. **79**, *Amer. Geophys. Union* 161172.

Falcon, N. (2007) Microfísica de la Formación de Nubes. En *Meteorología y Física Atmosférica*. Falcon y Vega Ed. APUC, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela,

Falcon, N., Sira, O., Medina, A. (2012) Estudio descriptivo de los vórtices atmosféricos causantes de tornados en Venezuela. *Revista de Climatología* **12**: 4960.

Falcon N. (2018) *Tornados y Trombas Marinas en Venezuela*. Portal en línea. <https://sites.google.com/site/tornadosytrombasmarinas/>

González, Y.; Falcón, N. (2015) Vórtices Atmosféricos en Venezuela: Tornados y Trombas Marinas. *Acta Científica Venezolana*

66 (2): 72-77.

Peña, E., Falcon, N., Iza, I. (2012) El eolometeoro de Caracas (Venezuela) del 07/05/2012: Un mini tornado? *Faraute de Ciencia y Tecnología* **7**(2): 15-23.

Renno, N.O., Blustein, H. (2001) A simple theory for waterspouts. *J. Atmosph. Sc.* **58** (47): 927-932.

Rogers, R. (1977) *Física de las Nubes*, Reverte: Madrid.

Sira, O.; Falcon, N.; Vega, C. (2010). Micro-tornados y trombas marinas en Venezuela. *Revista Ingeniera UC* **17**(1): 73-82,

Wakimoto, R. M.; Wilson, J. W. (1989). Non-supercell tornadoes. *Monthly Weather Review* **117**(6): 1113-1140.

