

Tormentas de polvo y convección seca en Marte

Material suplementario

Aitor Erkoreka

Resumen

En este documento se adjunta el material suplementario del TFG. Este material incluye medidas de tormentas adicionales a las presentadas en la memoria principal, así como una breve explicación del esquema numérico empleado para la resolución de la ecuación diferencial correspondiente al modelo unidimensional de convección.

Tormenta del 31 de mayo

Esta tormenta fue capturada el 31 de mayo ($L_s = 32.88^\circ$, $L_t = 13.5$ h). Tal y como se observa en la Figura 1, esta tormenta está situada en una región más meridional que las otras.

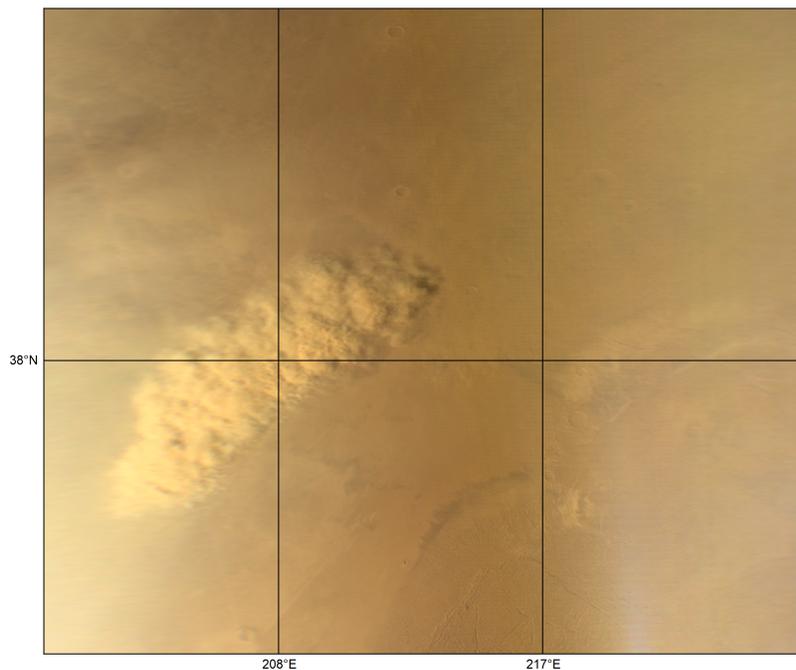


Figura 1: Vista general de la tormenta del 31 de mayo.

La tormenta tiene un área de $1.4 \times 10^5 \text{ km}^2$, lo cual la convierte en una tormenta local. Su velocidad de traslación no ha podido ser determinada ya que no hemos observado esta tormenta en más imágenes. En cuanto a su textura, a pesar de que alguna zona pudiera presentar una textura algodonosa, se siguen observando granos o celdas, de manera que es de tipo *pebbled*.

La Figura 2 muestra la identificación de las celdas. En este caso, hemos clasificado las celdas en dos tipos: “pequeñas” (rojas) y “grandes” (azules). Esta clasificación no está basada únicamente en el tamaño de las celdas, sino también en su anisotropía; las celdas pequeñas son mucho más alargadas (en relación a su anchura) que las grandes, propiedad evidente en los resultados de las medidas.

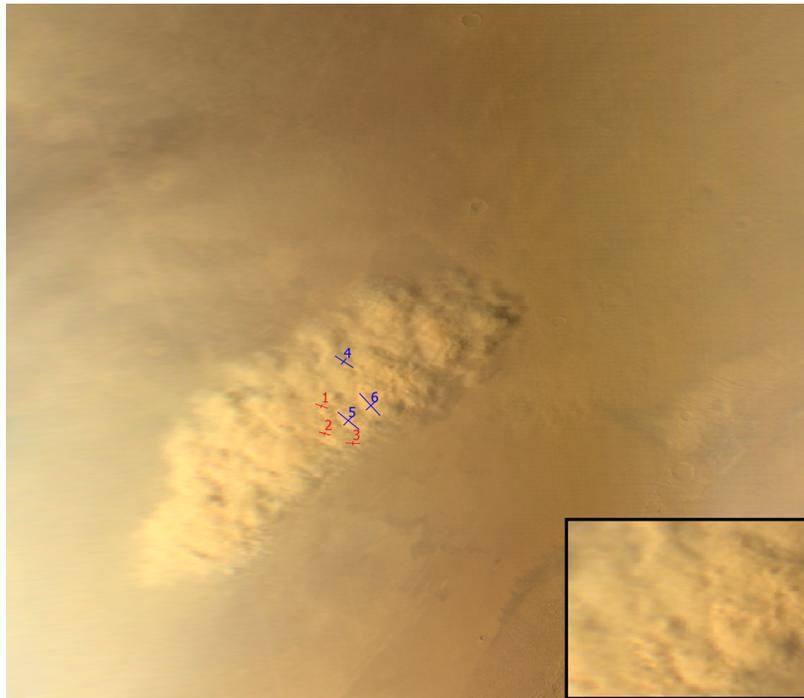


Figura 2: Celdas de la tormenta del 31 de mayo.

La Tabla 1 muestra las medidas llevadas a cabo en esta imagen, y la Tabla 2 su promedio.

Celda	Longitud (km)	Anchura (km)	Área (km ²)
1	18.3	5.4	77.6
2	16.1	3.8	48.1
3	18.4	4.7	67.9
4	31.0	11.6	282.4
5	41.1	17.5	564.9
6	47.0	20.1	742.0

Tabla 1: Medidas de tamaños de las celdas de la tormenta del 31 de mayo.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
Longitud (km)	28.7	13.2
Anchura (km)	10.5	7.0
Área (km ²)	297.1	294.1

Tabla 2: Promedio de tamaños de las celdas de la tormenta del 31 de mayo.

Es interesante observar que, a pesar de tratarse de una tormenta pequeña, el tamaño de sus celdas es muy grande. La anisotropía promedio de las celdas es $l/w \sim 3.1$. No obstante, al tener tamaños muy dispares, la dispersión en los resultados es considerable. Es por ello que en las Tablas 3 y 4 hemos recogido el promedio de cada tipo individualmente, dando lugar a una menor dispersión y justificando nuestra clasificación. Además, la anisotropía de cada tipo también es muy diferente: $l/w \sim 3.8$ para las pequeñas y ~ 2.5 para las grandes.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
Longitud (km)	17.6	1.3
Anchura (km)	4.6	0.8
Área (km ²)	64.5	15.1

Tabla 3: Promedio de tamaños de las celdas pequeñas de la tormenta del 31 de mayo.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
Longitud (km)	39.7	8.1
Anchura (km)	16.4	4.4
Área (km ²)	529.8	231.8

Tabla 4: Promedio de tamaños de las celdas grandes de la tormenta del 31 de mayo.

En cuanto a las distancias entre celdas, también las hemos medido por tamaño, tal y como se puede ver en la Tabla 5.

Tamaño	Distancia (km)	Desviación estándar (km)
Pequeñas	56.0	16.8
Grandes	75.9	28.9

Tabla 5: Promedio de distancias por tamaño de las celdas de la tormenta del 31 de mayo.

Tormenta del 4 de junio

Esta tormenta fue capturada el 4 de junio ($L_s = 34.75^\circ$, $L_t = 14.45$ h). Esta tormenta, al igual que la anterior, está situada en una región más meridional, aunque en este caso se extiende en un rango de latitudes más amplio, siendo visible, por ejemplo, el cráter Milankovic en la parte superior de la imagen (Figura 3). La tormenta tiene un área aproximada de 1.1×10^6 km²; es, por lo tanto, una tormenta local. No ha sido posible identificar un centro en esta tormenta (tanto por su forma como por su extensión), y tampoco hemos podido medir su velocidad de traslación. En cuanto a su textura, se trata de una tormenta de tipo *pebbled*, aunque también es cierto que en ciertas zonas se observan celdas más bien algodonosas.

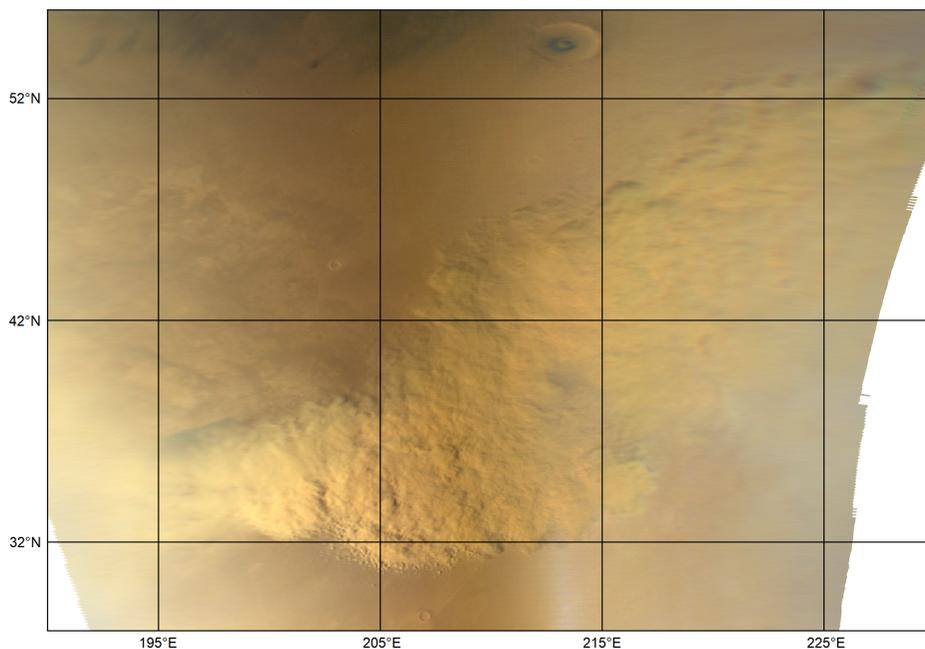


Figura 3: Vista general de la primera imagen de la tormenta del 4 de junio.

La Figura 4 muestra la identificación de las celdas. Estas, al igual que en la tormenta anterior, han sido clasificadas en dos tipos: “pequeñas” (rojas) y “grandes” (azules). En este caso, la anisotropía también es un factor decisivo en esta clasificación, aunque ocurre lo contrario que en la tormenta anterior: las celdas pequeñas tienen una anisotropía más baja, es decir, son menos alargadas que las grandes.

Las Tablas 6 y 7 muestran las medidas de las celdas y su promedio. Estos resultados, a pesar de tener una dispersión considerable por las grandes diferencias de tamaño entre celdas, muestran un tamaño promedio bastante reducido en comparación con el tamaño de la tormenta. El factor de anisotropía promedio es $l/w \sim 2.4$. No obstante, tal y como se ha mencionado anteriormente, cada tipo de celda tendrá un valor promedio de la anisotropía diferente.

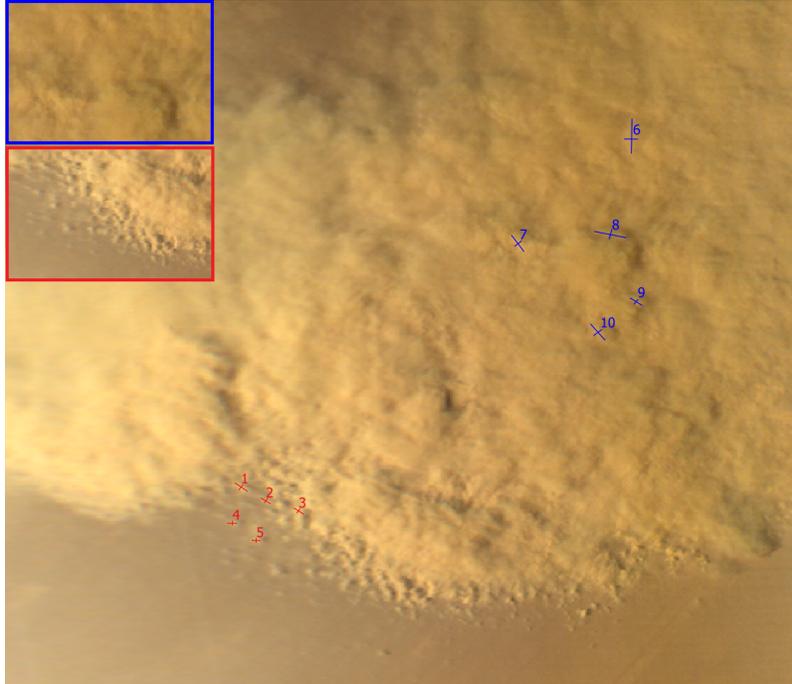


Figura 4: Celdas de la primera imagen de la tormenta del 4 de junio.

Celda	Longitud (km)	Anchura (km)	Área (km ²)
1	11.5	4.8	43.4
2	8.3	3.5	22.8
3	8.8	3.9	27.0
4	6.4	3.3	16.6
5	5.9	3.5	16.2
6	29.4	8.7	200.9
7	16.6	7.7	100.4
8	22.6	8.4	149.1
9	10.7	4.8	40.3
10	17.6	7.3	100.9

Tabla 6: Medidas de tamaños de las celdas de la primera imagen de la tormenta del 4 de junio.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
Longitud (km)	13.8	7.7
Anchura (km)	5.6	2.2
Área (km ²)	71.8	63.8

Tabla 7: Promedio de tamaños de las celdas de la primera imagen de la tormenta del 4 de junio.

Con el fin de caracterizar adecuadamente las celdas en función del tipo, las Tablas 8 y 9 muestran los tamaños promedio de las celdas pequeñas y grandes, respectivamente.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
Longitud (km)	8.2	2.2
Anchura (km)	3.8	0.6
Área (km ²)	25.2	11.1

Tabla 8: Promedio de tamaños de las celdas pequeñas de la primera imagen de la tormenta del 4 de junio.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
Longitud (km)	19.4	7.0
Anchura (km)	7.4	1.5
Área (km ²)	118.3	60.1

Tabla 9: Promedio de tamaños de las celdas grandes de la primera imagen de la tormenta del 4 de junio.

Las celdas pequeñas tienen una anisotropía de $l/w \sim 2.1$ y las grandes de $l/w \sim 2.6$, tal y como esperábamos de la inspección visual. Finalmente, la Tabla 10 recoge el promedio de las distancias entre celdas en función del tamaño.

Tamaño	Distancia (km)	Desviación estándar (km)
Pequeñas	28.5	6.3
Grandes	72.2	26.0

Tabla 10: Promedio de distancias de las celdas de la primera imagen de la tormenta del 4 de junio.

La segunda imagen de esta tormenta puede verse en la Figura 5 ($L_s = 35.21^\circ$, $L_t = 14.13$ h). Esta imagen corresponde al sol siguiente (entre las dos capturas ha transcurrido 1 día y 20 minutos terrestres).

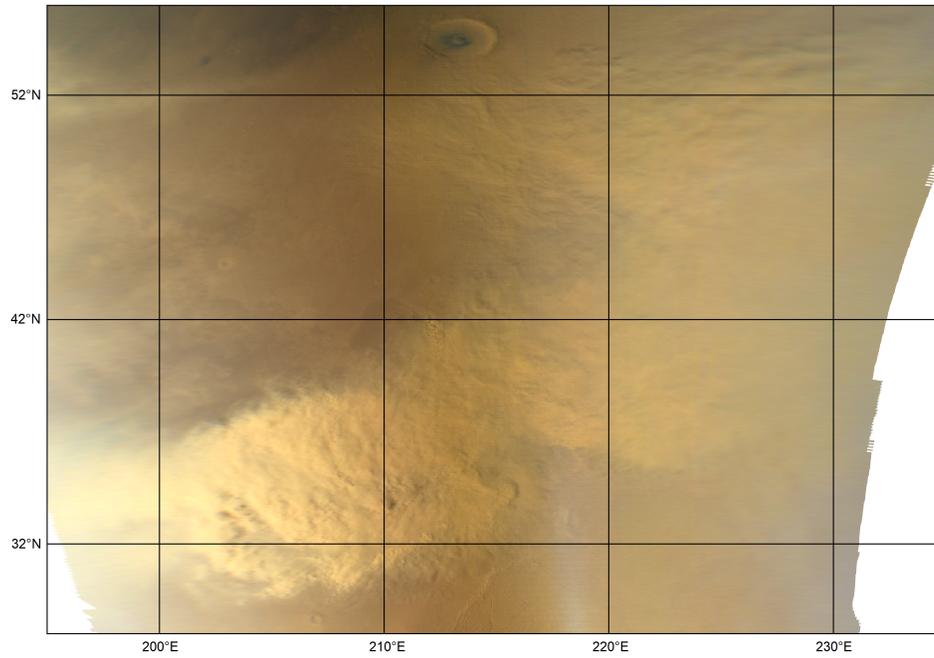


Figura 5: Vista general de la segunda imagen de la tormenta del 4 de junio.

El área aproximada de la tormenta es de 1.5×10^6 km². La Figura 6 muestra la identificación de las celdas.

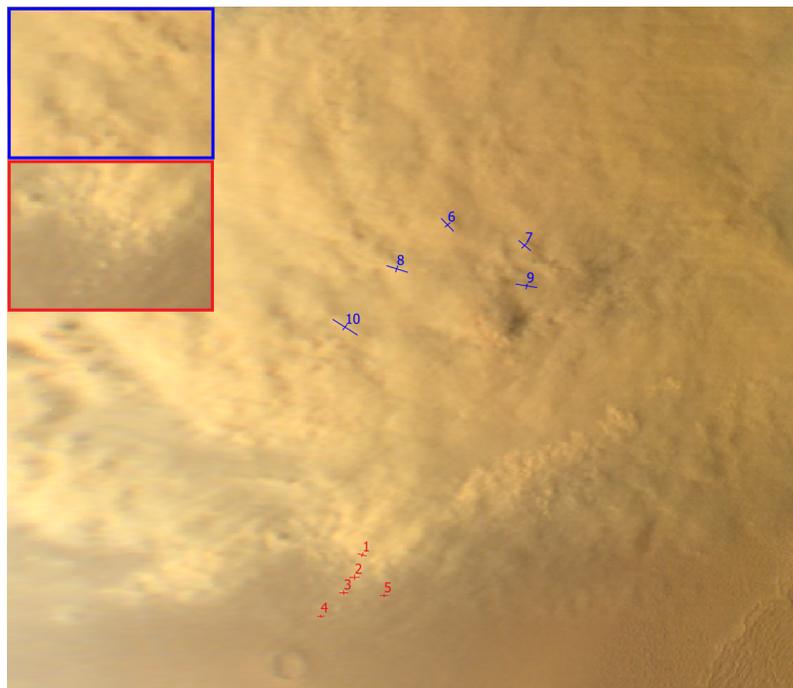


Figura 6: Celdas de la segunda imagen de la tormenta del 4 de junio.

Las Tablas 11 y 12 recogen las medidas de las celdas y su promedio. Estos resultados muestran una clara disminución del tamaño promedio de las celdas. La anisotropía, en cambio, ha aumentado ligeramente: $l/w \sim 2.6$.

Celda	Longitud (km)	Anchura (km)	Área (km ²)
1	6.5	3.1	15.8
2	7.1	4.1	22.9
3	6.2	3.0	14.6
4	4.7	1.7	6.3
5	5.8	2.5	11.4
6	14.3	5.0	56.2
7	11.8	5.2	48.2
8	16.2	5.3	67.4
9	15.5	4.2	51.1
10	22.5	6.3	111.3

Tabla 11: Medidas de tamaños de las celdas de la segunda imagen de la tormenta del 4 de junio.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
Longitud (km)	11.1	5.9
Anchura (km)	4.0	1.4
Área (km ²)	40.5	32.9

Tabla 12: Promedio de tamaños de la segunda imagen de la tormenta del 4 de junio.

En las Tablas 13 y 14 hemos recogido el promedio de los tamaños de las celdas en función del tipo.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
Longitud (km)	6.1	0.9
Anchura (km)	2.9	0.9
Área (km ²)	14.2	6.1

Tabla 13: Promedio de tamaños de las celdas grandes de la segunda imagen de la tormenta del 4 de junio.

Por último, la Tabla 15 recoge el promedio de las distancias entre celdas en función del tamaño. Estas distancias también han disminuido en relación a la anterior imagen.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
Longitud (km)	16.1	4.0
Anchura (km)	5.2	0.8
Área (km ²)	66.8	25.9

Tabla 14: Promedio de tamaños de las celdas pequeñas de la segunda imagen de la tormenta del 4 de junio.

Tamaño	Distancia (km)	Desviación estándar (km)
Pequeñas	26.4	8.7
Grandes	61.7	23.1

Tabla 15: Promedio de distancias de las celdas de la segunda imagen de la tormenta del 4 de junio.

Esquema numérico

Con el fin de resolver la ecuación diferencial correspondiente al modelo unidimensional de convección, comencemos reescribiendo $w'(dw'/dz')$ como $(1/2)(dw'^2/dz')$. Además, cambiemos la variable independiente z' (altura sobre la superficie) por P (presión), reescribiendo toda la ecuación en función de esta y suponiendo en todo momento que se satisfacen las ecuaciones de un gas ideal y de equilibrio hidrostático. Asimismo, agrupemos los términos que no vayan con w'^2 en un término denotado como A , y los que sí vayan con w'^2 en un término denotado como B (naturalmente estos términos dependen de P), de tal manera que la ecuación se pueda expresar como

$$-\frac{1}{2} \frac{dw'^2}{dP} = A + Bw'^2; \quad (1)$$

$$A = \frac{R_g^*}{P} \left[(T' - T) + T \frac{\partial \pi_D}{\partial P} - T \ell_C \right], \quad (2)$$

$$B = -\frac{Pg}{R_g^* T} \frac{\alpha}{r_0} - \frac{R_g^* T}{Pg} \frac{C_D}{r_0}. \quad (3)$$

Integremos ahora esta ecuación entre P_0 y P , escogiendo $|\Delta P|$ lo suficientemente pequeño como para suponer A y B constantes en ese intervalo:

$$\int_{P_0}^P dP = -\frac{1}{2} \int_{w_0'^2}^{w'^2} \frac{dw'^2}{A + Bw'^2}. \quad (4)$$

Su solución es trivial:

$$\Delta P = -\frac{1}{2B} \ln(A + Bw'^2) \Big|_{w_0'^2}^{w'^2}. \quad (5)$$

Reordenando los términos, finalmente llegamos al esquema iterativo para la resolución numérica de este modelo:

$$w'^2 (P_0 + \Delta P) = \frac{(A + Bw_0'^2) \exp\{-2B\Delta P\} - A}{B}. \quad (6)$$

Por último, en la tabla 16 recogemos un resumen de los valores de los diferentes parámetros que hemos empleado en las simulaciones presentadas en la memoria principal.

Parámetro	Rango de valores
C_D	0.1 – 1.0
r_0	100 – 2500 m
ΔT_0	0.5 – 5.0 K
w_0	2×10^{-4} m/s
$\partial\pi_D/\partial P$	10^{-3}
l_C	10^{-5}
α	0.2

Tabla 16: Valores de los parámetros empleados en las simulaciones.