



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

Caracterización de las distribuciones de tamaños de partículas, en la estratosfera, referida a la erupción del volcán Agung en 1963.

Autor: Mario Muriel Herrera

Tutores: Dr. Abel Calle Montes

Dr. Juan Carlos Antuña Marrero

2024

Mario Muriel Herrera

En agradecimiento a mis padres por su apoyo incondicional y por haber asumido los esfuerzos que me han permitido poder estudiar el grado que siempre había querido. Gracias por su paciencia, por su sacrificio y por enseñarme la importancia de esforzarse a pesar de las adversidades...

Gracias por todo.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN Y ABSTRACT | 1 |
| MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS | 2 |
| INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| CAPAS DE LA ATMÓSFERA Y SU COMPOSICIÓN | 3 |
| ERUPCIONES VOLCÁNICAS | 6 |
| AEROSOLLES PRODUCIDOS POR LAS ERUPCIONES VOLCÁNICAS | 10 |
| PROYECTO HASP Y STARDUST..... | 12 |
| PROYECTO HASP | 12 |
| PROYECTO STARDUST | 12 |
| MATERIAL | 14 |
| METODOLOGÍA | 15 |
| PARÁMETROS RELACIONADOS CON EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS | 15 |
| OTROS PARÁMETROS | 23 |
| FUNCIONES DE DITRIBUCIÓN | 25 |
| PROBABILIDAD DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS | 28 |
| RESULTADOS..... | 30 |
| RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS RELACIONADOS CON EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS | 30 |
| RESULTADOS DE OTROS PARÁMETROS | 30 |
| RESULTADOS DE LAS FUNCIONES DE DITRIBUCIÓN..... | 31 |
| RESULTADOS DE LA PROBABILIDAD DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS | 33 |
| ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS..... | 34 |
| CONCLUSIONES | 38 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 39 |

CAPÍTULO 1

RESUMEN Y ABSTRACT

RESUMEN

El estudio de las erupciones volcánicas tiene gran importancia por su impacto en el clima. Hoy en día, se conoce cómo se forman los aerosoles a partir de las erupciones volcánicas, pero sigue habiendo gran desconocimiento sobre su impacto y las consecuencias en el clima. Aún falta mucho por descubrir acerca de las co-emisiones en columnas volcánicas, el impacto de las erupciones en el clima tropical, el clima invernal en el hemisferio norte, cómo se produce el transporte de los aerosoles desde donde ocurre la erupción hasta el hemisferio opuesto y el papel de las erupciones volcánicas a largo plazo. Sin embargo, el avance tecnológico y la liberalización de datos, que eran confidenciales hasta la actualidad, están permitiendo realizar grandes avances en este campo. Los aerosoles tienen un papel clave en el cambio climático por su doble función, en la que absorben y reflejan la radiación, además de los efectos provocados por su interacción con las nubes. Por lo tanto, entender mejor el comportamiento de los aerosoles producidos en erupciones volcánicas puede ser de vital importancia para estudiar el cambio climático y crear un modelo de actuación en caso de catástrofe natural. Además, a pesar de su controversia, hay un gran interés desde el sector de la geoingeniería para tratar de revertir los efectos del cambio climático recreando de manera artificial lo que provoca de manera natural una erupción volcánica. El análisis de los datos que se poseen de erupciones pasadas o actuales, será clave en el estudio del clima y ayudará a entender futuras grandes erupciones.

ABSTRACT

The study of volcanic eruptions is really important due to the impact they have on the climate. Nowadays, it is known how aerosols are given off by volcanic eruptions, but there is still a great lack of information about their impact and consequences on the climate. Much remains to be done and discovered about co-emissions in volcanic columns, the impact of eruptions on the tropical climate, winter climate in the northern hemisphere, aerosol's streams from the volcano to the opposite hemisphere, and the long-term role of volcanic eruptions. However, technological advancements and the release of previously confidential data are allowing significant progress in this field. Aerosols play a key role in the climate change due to their dual function, in which they absorb and reflect radiation, as well as the effects caused by their interaction with clouds. Therefore, understanding better the behavior of aerosols produced in volcanic eruptions can be crucial for studying the climate change and setting a response model in case of natural disaster. Furthermore, despite of its controversy, there is a great interest from the geoengineering sector in developing a way to reverse the effects of climate change. The analysis of data from past and current eruptions will be crucial in future climate studies and it will help to understand better future major eruptions.

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

Los conflictos bélicos hacen que las potencias mundiales se interesen por el sector tecnológico promoviendo grandes avances científicos que de otra forma difícilmente se llevarían a cabo sin su respaldo económico. La Guerra Fría fue un enfrentamiento político, económico, social, ideológico, militar y propagandístico el cual comenzó al término de la Segunda Guerra Mundial entre los bloques Occidental (capitalista) y Oriental (comunista), liderados por los Estados Unidos y la Unión Soviética respectivamente en 1945 [Link 1]. Durante la Guerra Fría, se produjo un significativo avance en el desarrollo de armas nucleares y se llevaron a cabo numerosos ensayos nucleares por parte de las dos grandes potencias, así como por otros países como China, el Reino Unido y Francia. Estados Unidos y la Unión Soviética implementaron proyectos de investigación que empleaban y perfeccionaban las tecnologías más modernas de ese periodo. Estos proyectos tenían varios propósitos, incluyendo la detección y monitoreo del material radiactivo liberado por las explosiones, la identificación del origen y la magnitud de las detonaciones, y el estudio de los impactos del material radiactivo en la salud humana y el ecosistema natural. Dos de estos proyectos se enfocaron especialmente en la observación atmosférica para detectar material radiactivo en la estratosfera. El High Altitude Sampling Program (HASP), llevado a cabo entre 1956 y 1961, recolectaba muestras de aire en la estratosfera utilizando colectores de partículas instalados en globos meteorológicos y aviones militares equipados para tal fin, destacándose el Lockheed U-2, un avión espía capaz de alcanzar los 70,000 pies de altura (aproximadamente 21 km) [Friend et al., 1961]. Entre 1962 y 1967, se desarrolló el proyecto STARDUST, que continuó la recolección de muestras en la estratosfera. Este proyecto también buscaba crear un modelo matemático de mezcla y transporte para predecir la duración del material radiactivo en la estratosfera y sus patrones de deposición en la superficie terrestre, ya fuera debido a pruebas nucleares, la incineración de fuentes nucleares de satélites al reingresar a la atmósfera, o por otras razones [Feely et al., 1967]. La mayoría de las muestras recolectadas en la estratosfera por ambos proyectos fueron analizadas química y físicamente para identificar una variedad de isótopos radiactivos. Solo unas pocas muestras de cada proyecto se utilizaron para determinar la distribución de tamaños de partículas y la composición química de los aerosoles estratosféricos [Friend et al., 1961];[Feely et al., 1967], información que ha sido recuperada y reanalizada en este estudio. En colaboración con el Grupo Óptica Atmosférica (GOA) ubicado en la Facultad de Ciencias en Valladolid, y como parte de las prácticas en empresa realizadas, se descargaron, clasificaron y trataron dichos datos para hacerlos accesibles al propio grupo de investigación y con el objetivo final de difundirlos a toda la comunidad científica. La finalidad principal de este Trabajo Fin de Grado es la caracterización de las distribuciones de tamaños de los aerosoles estratosféricos en el hemisferio norte antes y después de la erupción del volcán Agung en 1963. Es necesario un estudio detallado de los aerosoles para entender las posibles aplicaciones de los mismos en geoingeniería con la finalidad de revertir el cambio climático, así como sus posibles efectos futuros y riesgos. El impacto de estas erupciones en el clima puede ser clave para entender futuras erupciones a gran escala.

3.1 CAPAS DE LA ATMÓSFERA Y SU COMPOSICIÓN

De manera general se define la atmósfera como la capa de gases que envuelve la Tierra o cualquier otro cuerpo celeste y que se mantiene unida a él por efectos gravitatorios. La atmósfera terrestre tiene un espesor aproximado de 1000 km. Atendiendo a diversos parámetros como la temperatura y composición del aire, la atmósfera se divide en varias capas concéntricas.

La primera clasificación de la atmósfera, atendiendo a su **composición**, es:

- **Heterosfera:** Es la capa más externa de la atmósfera y se extiende desde los 100 km hasta el límite superior de la atmósfera (1000 km). La composición no es uniforme y el gas predominante varía dependiendo de la altitud.
- **Homosfera:** Es la capa de la atmósfera que se encuentra más cercana a la superficie terrestre, con un grosor de unos 100 km y manteniendo una composición que se puede considerar constante y uniforme. La composición de la homosfera es la siguiente:

| Gas | % |
|---------------------------------|------------------------|
| Nitrógeno (N_2) | 78,1 |
| Oxígeno (O_2) | 20,9 |
| Argón (Ar) | 9×10^{-1} |
| Dióxido de Carbono (CO_2) | 4×10^{-2} |
| Neón (Ne) | $1,8 \times 10^{-3}$ |
| Helio (He) | 5×10^{-4} |
| Metano (CH_4) | $1,8 \times 10^{-4}$ |
| Kriptón (Kr) | $1,1 \times 10^{-4}$ |
| Hidrógeno (H_2) | 6×10^{-5} |
| Óxido Nitroso (N_2O) | 3×10^{-5} |
| Monóxido de Carbono (CO) | 1×10^{-5} |
| Xenón (Xe) | 9×10^{-6} |
| Ozono (O_3) | $0 - 7 \times 10^{-6}$ |
| Dióxido de nitrógeno (NO_2) | 2×10^{-6} |
| Yodo (I_2) | 1×10^{-6} |

Tabla 1: Composición en la Homosfera [Link 2].

Si en vez de tener en cuenta la composición, hacemos una clasificación por capas teniendo en cuenta los **cambios de temperatura** que se producen con la altitud, la clasificación es la siguiente:

- **Troposfera:** Esta capa alcanza una altura media de unos 11 km (18 km sobre el ecuador y unos 8 km sobre los polos). En esta capa tienen lugar la mayor parte de fenómenos

meteorológicos, como la formación de nubes. En la troposfera la temperatura disminuye a razón de unos 6,5 K por cada kilómetro de altitud, llegándose a alcanzar en su límite superior temperaturas de unos 215 K.

- **Estratosfera:** Esta capa se extiende hasta unos 55 km de altitud. Debido a corrientes de aire verticales que hacen ascender la humedad, es posible la formación de nubes en esta capa, aunque es mucho más improbable que en la troposfera. De hecho, este mismo mecanismo es el que ocurre cuando se forman aerosoles en esta capa debido a las grandes corrientes verticales de material que ascienden por la nube eruptiva. Cuando se producen erupciones lo suficientemente violentas, los aerosoles alcanzan la estratosfera, y se extienden desde la tropopausa hasta unos 30-35 km de altura, alcanzando su máxima concentración a una altitud aproximada de 22 km.

Además, dentro de la propia estratosfera se encuentra una subcapa llamada ozonósfera. En la ozonósfera se encuentra la capa de ozono, bien conocida por sus efectos sobre el clima. Este gas desempeña una gran labor que permite que la vida en la tierra sea posible, ya que absorbe la radiación ultravioleta procedente del Sol. La capa donde se acumula la mayor parte del ozono recibe el nombre de ozonósfera y está situada a unos 20-25 km de altitud. A diferencia de lo que ocurría en la troposfera, en la estratosfera la temperatura aumenta con la altitud, hasta alcanzar temperaturas similares a la terrestre en su zona superior. Este aumento de temperatura está asociado a la radiación que absorbe el ozono.

- **Mesosfera:** Se extiende desde la capa superior de la estratosfera hasta 80 km de altitud. Es esta capa apenas hay ozono, por lo que no se produce el aumento de temperatura que se producía en la estratosfera debido a la absorción de la radiación. Las temperaturas pueden disminuir hasta los 173 K.
- **Termosfera o Ionosfera:** Se extiende desde la capa superior de la mesosfera (mesopausa) hasta los 500 km de altitud. En esta capa es donde se producen las auroras boreales como resultado de la ionización del aire. Por este motivo, en muchas ocasiones a esta capa también se le conoce por el nombre de ionosfera. Y es precisamente debido a las ionizaciones del aire lo que provoca que las temperaturas vuelvan a aumentar muy considerablemente. Los gases se excitan alcanzando grandes temperaturas de hasta 2750 K.
- **Exosfera:** Es la capa más distante a la superficie terrestre y se extiende hasta los 1000 km de altitud. Aunque realmente no tiene un límite bien definido porque la densidad va disminuyendo de manera gradual hasta la desaparición total de la atmósfera. Hace de frontera entre la atmósfera terrestre y el espacio interplanetario. En esta capa la temperatura disminuye progresivamente hasta alcanzar temperaturas cercanas al cero absoluto (3 K).

De todas estas capas, las que van a ser objeto de estudio en este trabajo son principalmente la **troposfera** y la **estratosfera**, siendo la más importante la segunda. La troposfera es una capa que se caracteriza por su inestabilidad. Esta inestabilidad se produce debido a los gradientes de temperatura y las variaciones en la presión y la humedad dentro de la propia capa. Por el contrario, la estratosfera es una capa muy estable, con flujos predominantemente horizontales. Como resultado, los aerosoles depositados en la troposfera decaen rápidamente debido a efectos como

la gravedad, mientras que los aerosoles depositados en la estratosfera pueden permanecer en dicha capa durante largos períodos de tiempo. Para nuestro caso de estudio, cuando los volcanes erupcionan con la suficiente virulencia, son capaces de crear grandes corrientes ascendentes que consiguen trasportar los materiales expulsados hasta la estratosfera. Los materiales más grandes y pesados se precipitan rápidamente por efecto gravitatorio, pero los más pequeños (aerosoles) son capaces de permanecer grandes estancias de tiempo.

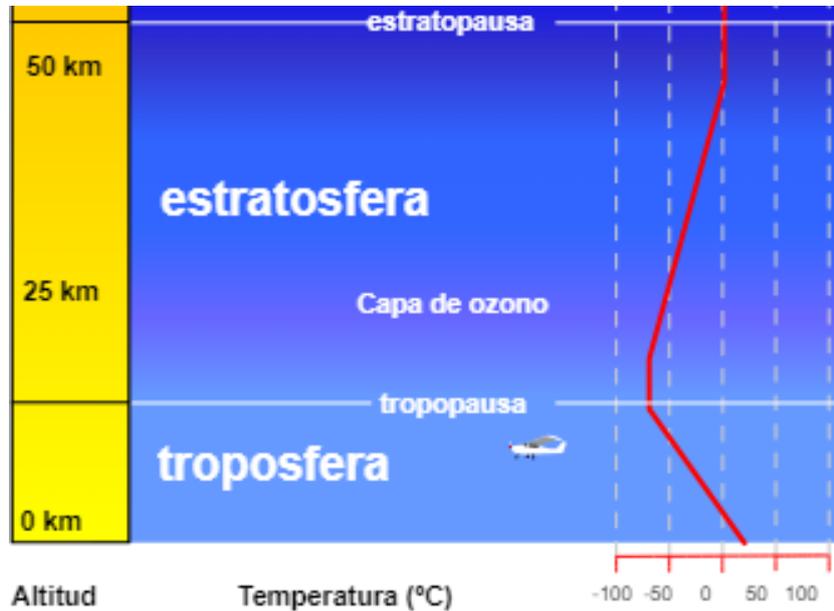


Fig. 1: Altitud y temperatura de la troposfera y estratosfera. [Link 3]

Tanto la troposfera como la estratosfera se encuentra por debajo de los 100 km de altitud, por lo tanto, su composición va a ser la de la homosfera. Entre la troposfera y la estratosfera hay una región denominada tropopausa que hace de frontera entre ambas capas y que tiene la peculiaridad de que en ella la temperatura se mantiene constante. Aproximadamente, en la tropopausa se tiene un gradiente térmico vertical medio inferior a 2 K por kilómetro, es decir, que la temperatura varía menos de 2 K por cada kilómetro de altitud recorrido en la tropopausa.

3.2 ERUPCIONES VOLCÁNICAS

Se puede definir volcán como una acumulación de materiales expulsados de forma explosiva o efusiva que tienen su origen en una o múltiples aberturas o fisuras en la superficie de la Tierra u otros planetas. Acorde a los datos aportados por los vulcanólogos y geólogos, se estima que hay entorno 1500 volcanes, en el mundo, de los cuales 1300 han estado alguna vez activos en los últimos 12 000 años. Si nos restringimos a un periodo de tiempo más cercano al presente, se ha confirmado visualmente actividad de un total de 562 volcanes, 530 desde 1800 y 332 desde 1960. Además, entre 2010 y 2020 se registraron de media 35 erupciones nuevas anuales, siendo el promedio anual entre estas mismas fechas de 80 erupciones totales activas [Link 4]. Por lo tanto, la actividad volcánica es una de las grandes preocupaciones de todo el sector científico.

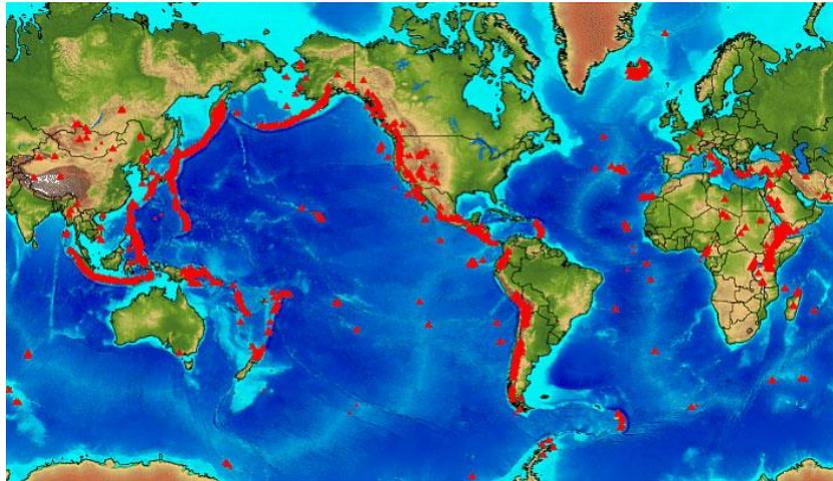


Fig. 2: Distribución de volcanes en la corteza terrestre. [Link 5]

Como se aprecia en la **Figura 2**, la distribución de los volcanes en la Tierra no es homogénea. Los volcanes se distribuyen principalmente en el denominado cinturón o anillo de fuego del Pacífico. Esta es una de las zonas de subducción ubicada en las costas del océano Pacífico y que se caracteriza por ser la zona con mayor actividad volcánica y sísmica del mundo [Link 6].

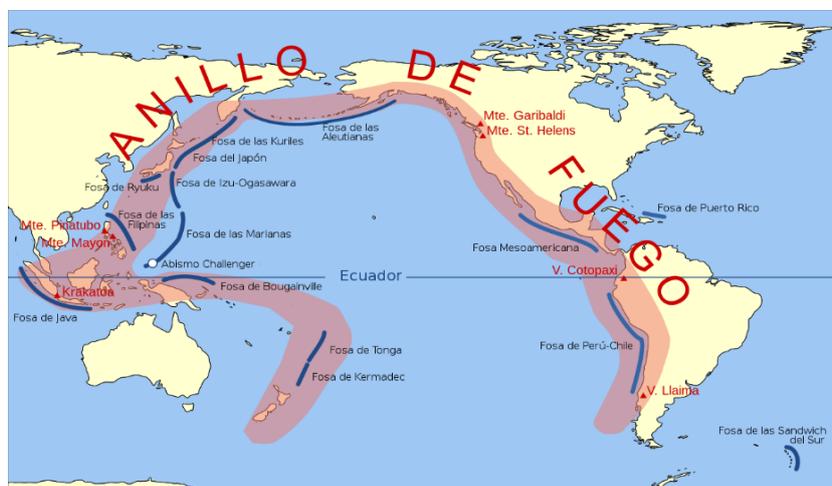


Fig. 3: Ubicación del “Anillo de Fuego” en la corteza terrestre. [Link 6]

En la actualidad hay un total de 46 volcanes en erupción continuada. El más reciente es el volcán Fernandina, Ecuador, 2 de Marzo de 2024. El que más tiempo lleva en erupción hasta la actualidad es el volcán Yasur, Vanuatu, 1270 (con un error aproximado de 100 años en la medida).



Fig. 4: Volcanes en erupción en la actualidad [Link 7]

Sin embargo, los volcanes que más preocupan a los investigadores no son los que se encuentran en erupción actualmente, sino que son los denominados súper-volcanes. Se define súper-volcán a todo volcán que tiene una cámara magmática al menos mil veces más grande que la de un volcán convencional. Como consecuencia, los súper-volcanes tienden a tener erupciones más explosivas.



Fig. 5: Distribución Geográfica de los Supervolcanes [INSMET]

Para medir la explosividad relativa de un volcán existe una medida llamada Índice de Explosividad de un Volcán (IEV). El Índice de Explosividad Volcánica (IEV) o en inglés, Volcanic Explosivity Index (VEI) sirve a los vulcanólogos como escala para medir la magnitud de la

explosividad de un volcán. Esta es una escala de 0 a 8 grados y cada punto es un factor de 10 en la explosividad de la erupción. Un aumento de 1 grado indica una erupción 10 veces más explosiva, un aumento de 2 grados indica una erupción 100 veces más explosiva y así sucesivamente. Para la elaboración de la escala se tienen en cuenta factores como el volumen total de los productos expulsados por el volcán (ceniza, piroclastos, lava...), la altura alcanzada por la nube eruptiva, el tiempo de duración de la erupción, la cantidad de productos expulsados que se inyectan en las capas de la atmósfera (troposfera y estratosfera) y más factores que son relevantes a la hora de medir las explosividad.

Aunque después se comentará en mayor detalle en el apartado dedicado a aerosoles, cabe destacar que una de las principales fuentes de aerosoles estratosféricos son las erupciones volcánicas. Entonces es previsible que uno de los principales factores que afectan a la cantidad de aerosoles liberados a la estratosfera es la intensidad con la que explota un volcán. Por lo tanto, generalmente los volcanes con mayor índice IEV suelen liberar una mayor cantidad de aerosoles.

| <i>Volcán</i> | <i>IEV</i> | <i>Aerosoles(MT)</i> | <i>Fecha</i> |
|---------------|------------|----------------------|---------------------|
| Pinatubo | 6 | 30 | 1991 |
| Krakatau | 6 | 50 | 1883 |
| Tambora | 7 | 200 | 1815 |
| Rabaul | 6 | 300 | 536 |
| Toba | 8 | 1000 | 75 mil años |
| Roza | 8 | 6000 | 14 millones de años |

Tabla 2: Ejemplos de algunas de las erupciones volcánicas más intensas
(tabla modificada de la fuente [INSMET])

Sin embargo, el índice IEV no es siempre determinante a la hora de cuantificar el número de aerosoles producido. Otros factores como si el volcán es submarino o la proporción entre los productos expulsados deben de ser tenidos en cuenta. Esto se aprecia claramente en el caso de los volcanes “Rabaul” y “Tambora”. Pese a tener un mayor índice de explosividad el volcán “Tambora”, la cantidad de aerosoles liberados a la atmósfera se estima que fue menor. Respecto a la frecuencia con la que se producen las erupciones volcánicas, se ha observado que, afortunadamente para la supervivencia de nuestra especie, la frecuencia de las erupciones y su índice de explosividad son inversamente proporcionales. Esto se aprecia claramente en la siguiente tabla adjunta.

| <i>IEV</i> | <i>Volumen</i> | <i>Altura de la columna</i> | <i>Frecuencia</i> | <i>Ejemplos destacados</i> |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 0 | < 10 000 m ³ | > 100 m | Constante | Kilauea (EEUU.) |
| 1 | > 10 000 m ³ | 100 - 1000 m | Diaria | Estrómboli (Italia) |
| 2 | > 1 000 000 m ³ | 1 - 5 km | Semanal | Cumbre Vieja, 1971 (España) |
| 3 | > 10 000 000 m ³ | 3 - 15 km | Mensual | Nevado del Ruíz, 1985 (Colombia) |
| 4 | > 0,1 km ³ | > 10 km | Anual | Eyjafjallajökull, 2010 (Islandia) |
| 5 | > 1 km ³ | > 10 km | 10 años | Santa Helena, 1985 (EEUU.) |
| 6 | > 10 km ³ | > 20 km | 100 años | Pinatubo, 1991 (Filipinas) |
| 7 | > 100 km ³ | > 20 km | 1000 años | Tambora, 1815 (Indonesia) |
| 8 | > 1000 km ³ | > 20 km | 10 000 años | Yellowstone, 640 mil años (EEUU.) |

Tabla 3: Ejemplo de volcanes con su índice IEV y su frecuencia eruptiva. [Link 8]

Además, atendiendo al índice IEV, las erupciones se clasifican y reciben distintos nombres.

| <i>IEV</i> | <i>Clasificación</i> | <i>Descripción</i> |
|------------|-----------------------------------|----------------------|
| 0 | Erupción Hawaiana | Efusiva no explosiva |
| 1 | Erupción Estromboliana | Ligera |
| 2 | Erupción Estromboliana/Vulcaniana | Explosiva |
| 3 | Erupción Vulcaniana/Peleana | Violenta |
| 4 | Erupción Peleana/Subpliniana | Catastrófica |
| 5 | Erupción Pliniana | Cataclísmica |
| 6 | Erupción Pliniana/Ultrapliniana | Colosal |
| 7 | Erupción Ultrapliniana | Supercolosal |
| 8 | Erupción Ultrapliniana | Apocalíptica |

Tabla 4: Clasificación de las erupciones [Instituto Nacional]

De todas las erupciones, las principales son las Hawaianas, las Estrombolianas, las Vulcanianas y las Plinianas. Las erupciones Hawaianas son poco explosivas y tranquilas y dan lugar a magma poco fluido y sin apenas contener gas. Las erupciones Estrombolianas tienen también un magma fluido aunque en este caso sí que contiene mayores cantidades de gas en su interior, lo que provoca que se produzcan explosiones más violentas que pueden hacer que se expulse material piroclástico. Las erupciones Vulcanianas, están a medio camino entre las Estrombolianas y las Plinianas. Estas erupciones se forman debido a que el magma se encuentra dentro de conductos cerrados lo que provoca que los gases se acumulen y la presión aumente hasta que el tapón se rompe y se produce la explosión. Por último, las erupciones Plinianas se caracterizan por tener un magma muy viscoso, lo que provoca que los gases se queden atrapados en él y en su búsqueda por salir a la superficie produzcan fuertes explosiones. Como resultado se emite gran cantidad de materiales piroclásticos que ascienden por la nube eruptiva hasta gran altura. Por lo tanto, de esta lista, las erupciones Plinianas son las que más aerosoles generan y las Hawaianas las que menos.

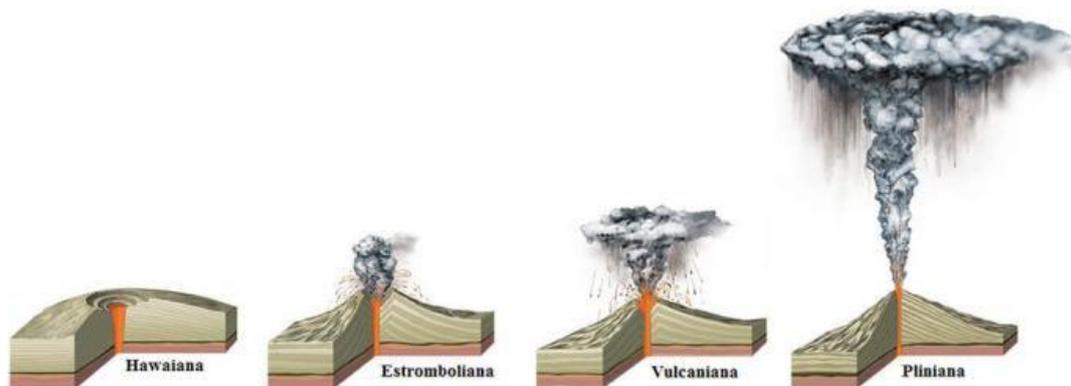


Fig. 6: Principales Erupciones
(imagen modificada de la enciclopedia británica)

3.3 AEROSOLES EN ERUPCIONES VOLCÁNICAS

Se llaman aerosoles a las partículas sólidas o líquidas que se encuentran suspendidas en un medio gaseoso, como es el caso de la atmósfera, con tamaños típicos entre $0,01 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$, que permanecen en la atmósfera durante al menos unas horas. En la actualidad se conocen tres grandes fuentes de aerosoles: las súper – erupciones volcánicas [Spark and Self et al., 2005] [McGuire, 2006] el impacto de objetos extraterrestres [Chapman, 2004] [McGuire, 2006] y por último los conflictos nucleares [Sagan, 1985] [Robock, 1989] [Robock et al., 2006]. En este caso, nuestro objeto de estudio va a ser el estudio de aerosoles producido por erupciones volcánicas, aunque como se ha explicado en la motivación y en los objetivos, su medición en ocasiones está directamente relacionada con el área nuclear. El proceso de producción de aerosoles en erupciones volcánicas es el que se explica a continuación:

Entre los materiales y compuestos que son arrojados a la atmósfera durante una erupción volcánica se encuentran diversos tipos de gases. Los principales tipos de gases arrojados son: vapor de agua (aproximadamente el 70% del volumen de los gases emitidos), dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N), dióxido de azufre (SO_2) y también otros gases, aunque en menor cantidad. Dependiendo de la fuente consultada, estos datos pueden variar, lo cual es razonable dado que las concentraciones varían de un volcán a otro, e incluso, pueden variar en un mismo volcán durante las diferentes etapas o fases de una erupción [Link 9]. De estos gases que se han mencionado, el más importante para el área de estudio que nos concierne es el dióxido de azufre. El dióxido de azufre se puede combinar con el vapor de agua en la troposfera produciendo lluvias ácidas. Sin embargo, el principal motivo por el que el dióxido de azufre es tan importante en esta área de estudio es porque cuando alcanza la estratosfera (por una erupción volcánica) produce aerosoles de sulfato. Los aerosoles se producen cuando el sulfato (SO_2) se oxida, se convierte en ácido sulfúrico (H_2SO_4) y se condensa junto con el agua formando pequeñas gotas de $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$, en una composición aproximada de 75 % de H_2SO_4 y 25 % de H_2O . A estas gotas son a las que se las conoce como aerosoles estratosféricos de sulfato.

Cuando se produce una erupción volcánica explosiva, grandes cantidades de material son expulsados a la atmósfera, alcanzando capas más altas cuanto mayor sea la explosividad. Las partículas más pesadas y de mayor tamaño no suelen aguantar mucho tiempo en la atmósfera y tienden a precipitarse como consecuencia de los efectos gravitatorios. Sin embargo, los aerosoles estratosféricos de origen volcánico tienen la particularidad de que por su pequeño tamaño pueden permanecer largos períodos de tiempo suspendidos en la atmósfera. Esto se ve favorecido también porque en la estratosfera no existen movimientos convectivos, ni ascendentes ni descendentes, de aire. Los movimientos predominantes en la estratosfera son los horizontales, lo que hace que las partículas permanezcan periodos mucho más largos de tiempos sin llegar a precipitarse. Además, este tipo de movimientos favorecen la propagación de aerosoles a lo largo de toda la capa estratosférica que envuelve al planeta.

Aunque posteriormente se abordarán y tratarán con más detalle las consecuencias de la acumulación de aerosoles desde un punto de vista más teórico, los aerosoles pueden producir tanto que la temperatura terrestre aumente o disminuya. El ligero aumento de temperatura se debe a que los aerosoles pueden absorber la radiación infrarroja. Respecto a la disminución de temperatura se debe a la difracción que sufre el resto de radiación con los aerosoles. En general este segundo efecto es el predominante y el que origina los inviernos volcánicos.

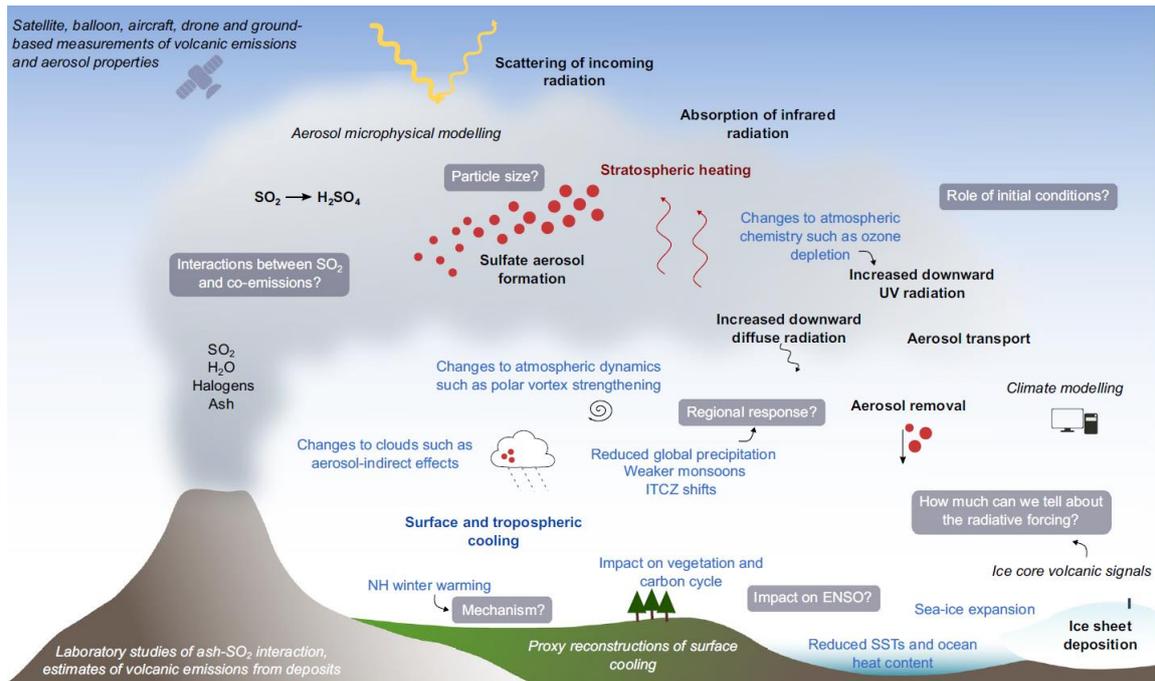


Fig. 7: Proceso de creación de aerosoles por erupción volcánica y sus efectos directos.

(Los procesos están en **negrita**, los impactos climáticos en azul, el texto en cursiva describe los métodos utilizados para comprender los impactos climáticos, las preguntas objeto de investigación se muestran en recuadros. El acrónimo SST “Sea Surface Temperature” hace referencia a la temperatura superficial del mar, ITCZ “Intertropical Convergence Zone” a la zona de convergencia intertropical y ENSO “El Niño Southern Oscillation” que es un fenómeno climático). [Marshall]

PROYECTO HASP Y STARDUST

Los proyectos HASP y STARDUST son los proyectos que van a dar sentido a este trabajo. Como se ha comentado en las motivaciones y objetivos, estos dos proyectos recopilaron datos de la erupción del volcán Agung en 1963, aunque su objetivo inicial era muy distinto. Entender el proceso de obtención de los datos y las condiciones en las que se obtuvieron es de gran utilidad para su posterior estudio. Los datos de estos dos proyectos han permanecido clasificados hasta hace apenas una década y su valor actual es muy elevado por la información que arrojan.

4.1 PROYECTO HASP

Las siglas HASP son un acrónimo de “High Altitude Sampling Program” [Stebbins]. El programa surgió con la finalidad de estudiar los posibles efectos que tendría la dispersión radioactiva en la estratosfera como resultado de los ensayos nucleares. El programa comenzó a funcionar en otoño de 1957, pero en concreto las medidas que se han estudiado en colaboración con el GOA datan de 1960. Para generar una red de muestreo se utilizaron aviones U2 (aviones de vigilancia de gran altitud) que volaban habitualmente a altitudes de unos 60 000 pies (18 km). La red de muestreo realizó mediciones desde los 57° S hasta 71° N. Durante estos ensayos se realizaron mediciones de la cantidad de aerosoles en la atmósfera y de sus respectivos radios.

4.2 PROYECTO STARDUST

El proyecto STARDUST, del inglés, “polvo de estrellas” fue un proyecto que al igual que el anterior se centró en el estudio de aerosoles en la atmósfera resultado de ensayos nucleares en la década de los 60. Este proyecto muestra algunos datos muy interesantes dado que es en el que se registró la erupción del volcán Agung en el año 1963. De nuevo los datos se recopilaron con aviones U2, y las altitudes de medida fueron similares a las del proyecto HASP, aunque algo menores. A continuación, se adjunta una de las tablas rescatadas y digitalizadas en colaboración con el GOA, en la que se observan las muestras estudiadas, la fecha de vuelo, la altitud, latitud y longitud, así como otros valores de gran interés.

| Sample Number | Collection Date | Altitude (km) | Latitude | Longitude | TAS* (Knots) | Sample Time (min) | Sample Volume (cm ³) |
|---------------|-----------------------|---------------|------------|--------------|--------------|-------------------|----------------------------------|
| 243 | 13 de febrero de 1962 | 18,3 | 49° -32° N | 112° -100° W | 410 | 169 | 2,14 × 10 ⁸ |
| 244 | 13 de febrero de 1962 | 15,2 | 49° -32° N | 112° -100° W | 380 | 191 | 2,24 × 10 ⁸ |
| 245 | 13 de marzo de 1962 | 12,2 | 49° -31° N | 112° -101° W | 324 | 209 | 2,09 × 10 ⁸ |
| 252 | 19 de junio de 1962 | 15,2 | 49° -31° N | 112° -101° W | 384 | 194 | 2,3 × 10 ⁸ |
| 254 | 12 de junio de 1962 | 16,8 | 49° -31° N | 112° -101° W | 403 | 175 | 2,18 × 10 ⁸ |
| 257 | 26 de junio de 1962 | 16,8 | 48° -31° N | 112° -101° W | 389 | 180 | 2,16 × 10 ⁸ |
| 258 | 14 de febrero de 1963 | 18,3 | 45° -39° N | 109° -104° W | 411 | 60 | 7,6 × 10 ⁷ |
| 259 | 19 de febrero de 1963 | 18,3 | 31° -20° N | 100° -96° W | 406 | 120 | 1,5 × 10 ⁸ |
| 265 | 2 de abril de 1963 | 18,3 | 32° -31° N | 100° -99° W | 407 | 60 | 7,5 × 10 ⁷ |
| 266 | 7 de mayo de 1963 | 18,3 | 33° -31° N | 100° -100° W | 415 | 60 | 7,7 × 10 ⁷ |
| 268 | 30 de julio de 1963 | 18,3 | 33° -32° N | 111° -111° W | 415 | 60 | 7,7 × 10 ⁷ |
| 271 | 13 de agosto de 1963 | 18,3 | 32° -32° N | 111° -111° W | 415 | 60 | 7,7 × 10 ⁷ |

Tabla 5: Resumen de datos recopilados del proyecto Stardust.

El volcán Agung tuvo dos grandes erupciones en el año 1963. En concreto, el 17 de marzo y el 16 de mayo de 1963. Por lo tanto los datos recopilados para las muestras 243, 244, 245, 252, 254, 257, 258, y 259 fueron adquiridos antes de las erupciones, mientras que las muestras 266, 268 y 271 lo hicieron después. La muestra 265 es un caso particular, porque pertenece a un periodo de tiempo en el que la erupción ya había comenzado, pero los aerosoles estaban en proceso de llegar a las latitudes en las que operaban los aviones que los detectaban. Por lo tanto para esta muestra puede ser que se obtengan valores algo distintos y por ello resulta oportuno estudiarla por separado.

Posteriormente se compararán los resultados obtenidos antes de las erupciones y después para ver la influencia de la erupción en la concentración y el tamaño de los aerosoles emitidos.

CAPÍTULO 5

MATERIAL

El material utilizado, incluye los datos relativos al proyecto STARDUST, los cuales se han recuperado y digitalizado para su posterior tratamiento en este trabajo y para que la comunidad científica pueda disponer de ellos. Estos datos se agrupan en tablas en las que se arroja información sobre la fecha de vuelo, la latitud, altura, el tiempo de muestreo y sobre la cantidad de aerosoles medidos y sus respectivos radios. En concreto, a partir de la cantidad de aerosoles medidos y sus radios se podrá realizar una función de distribución que permita estudiar cómo varían las magnitudes de los aerosoles con la erupción.

Cabe destacar que los datos recuperados tienen un gran valor por la cantidad de información que aportan. Pese a que dichos datos se tomaron hace casi 70 años no se habían estudiado hasta la actualidad, de ahí el interés de este trabajo. El avance de las técnicas actuales y el conocimiento de la importancia que tienen los aerosoles en el clima permiten e incentivan el tratamiento y análisis de este material

Utilizando los datos del proyecto STARDUST se pueden calcular distintos parámetros que resultan de gran interés. El objetivo del trabajo de fin de grado es ver como dichos parámetros se vieron alterados con la erupción del volcán Agung en el año 1963. Para ello, se deben comparar los resultados de las mediciones registradas antes de la fecha de la erupción y las posteriores. A continuación, se procede a explicar cuáles son dichos parámetros, su significado físico y la forma en la que se calculan. Para ello se van a calcular los parámetros para la “*Muestra 243*”, y se va a indicar que los mismos cálculos se realizarían de manera oportuna para el resto de muestras y de este modo obtener el resto de resultados, que aparecerán adjuntos en el apartado de resultados correspondiente.

6.1 PARÁMETROS RELACIONADOS CON EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS

Los aerosoles pueden presentar diferentes tamaños y reciben diferentes nombres acorde a ello. Suponiendo que los aerosoles son esféricos, la clasificación de los aerosoles según su tamaño es la siguiente:

- **Aerosoles “gruesos” o partículas de gran tamaño** (del inglés “coarse particles”):
Generalmente tienen diámetros de partícula mayores a 2,5 μm .
- **Aerosoles “finos” o de partículas de pequeño tamaño** (del inglés “fine particles”):
Los diámetros de partícula van desde 0,1 μm hasta 2,5 μm .
- **Aerosoles ultrafinos o partículas Aitken** (del inglés “ultrafine particles”):
Tienen diámetros de partícula inferiores a 0,1 μm .

Para un proceso como el estudiado (una erupción volcánica) la producción de aerosoles no se produce de manera homogénea. Para algunos tamaños, las concentraciones de aerosoles pueden ser mucho mayores que para otros. Por eso se dice que el número de partículas por unidad de volumen depende del tamaño y en consecuencia del radio ($N(r)$). Precisamente, a partir de que la concentración de aerosoles no es homogénea, surge la necesidad de definir la distribución de tamaños de partículas. Se llama “distribución del tamaño de las partículas” ($n(r)$) del inglés “Particle Size Distribuion” a la distribución que representa la densidad de partículas en función de su tamaño (radio).

$$n(r) = \frac{dN(r)}{dr}$$

En nuestro caso, para la “*Muestra 243*”, después del proceso de digitalización de los datos realizado durante las prácticas en empresa, contamos con las siguientes tablas de datos:

| Radius (μm) | $\frac{1}{\mu}$ | Obs. Frec. $\times 10^{-4}(\text{cm}^{-2})$ | $dN \times 10^5(\text{cm}^{-3})$ | $V \times 10^5 \left(\frac{\mu\text{m}^3}{\text{cm}^3}\right)$ |
|--|-----------------|---|--|--|
| $1,38 \times 10^{-1}$ | 1,82 | 11,88 | 101 | 1,11 |
| $1,6 \times 10^{-1}$ | 1,69 | 37,44 | 296 | 5,02 |
| $1,82 \times 10^{-1}$ | 1,59 | 51,77 | 385 | 9,66 |
| $1,99 \times 10^{-1}$ | 1,54 | 44,15 | 318 | 10,5 |
| $2,24 \times 10^{-1}$ | 1,46 | 73,06 | 499 | 23,4 |
| $2,44 \times 10^{-1}$ | 1,41 | 108,36 | 714 | 43,5 |
| $2,64 \times 10^{-1}$ | 1,38 | 98,2 | 633 | 48,7 |
| $2,82 \times 10^{-1}$ | 1,36 | 101,18 | 643 | 60,4 |
| 3×10^{-1} | 1,33 | 42,18 | 262 | 29,6 |
| $3,18 \times 10^{-1}$ | 1,3 | 39,67 | 241 | 32,3 |
| $3,36 \times 10^{-1}$ | 1,28 | 16,83 | 100 | 15,9 |
| $3,52 \times 10^{-1}$ | 1,26 | 15,59 | 91,3 | 16,6 |
| $3,7 \times 10^{-1}$ | 1,25 | 11,98 | 70 | 14,9 |
| $3,86 \times 10^{-1}$ | 1,23 | 4,92 | 28,3 | 6,78 |
| $4,02 \times 10^{-1}$ | 1,22 | 5,32 | 30,3 | 8,24 |
| $4,18 \times 10^{-1}$ | 1,21 | 1,95 | 11 | 3,35 |
| $4,32 \times 10^{-1}$ | 1,2 | 4,73 | 26,5 | 8,93 |
| $4,48 \times 10^{-1}$ | 1,18 | 0,36 | 2,01 | 0,76 |
| $4,62 \times 10^{-1}$ | 1,18 | 0,45 | 2,48 | 1,02 |
| $4,78 \times 10^{-1}$ | 1,17 | 0,22 | 1,17 | 0,53 |
| $4,92 \times 10^{-1}$ | 1,16 | 0,14 | 0,75 | 0,37 |

Tabla 6: Datos digitalizados de la muestra 243

De esta tabla lo que nos interesa, para los cálculos que se van a realizar y para calcular la distribución del tamaño de las partículas, son los valores del radio (que nos permiten determinar el tamaño de cada intervalo) y la densidad de partículas:

| Radius (μm) | $dr (\mu\text{m})$ | $dN [\text{cm}^{-3}]$ |
|--|--------------------------------------|---|
| $1,38 \times 10^{-1}$ | $2,2 \times 10^{-2}$ | $1,01 \times 10^{-3}$ |
| $1,6 \times 10^{-1}$ | $2,2 \times 10^{-2}$ | $2,96 \times 10^{-3}$ |
| $1,82 \times 10^{-1}$ | $1,7 \times 10^{-2}$ | $3,85 \times 10^{-3}$ |
| $1,99 \times 10^{-1}$ | $2,5 \times 10^{-2}$ | $3,18 \times 10^{-3}$ |
| $2,24 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-2} | $4,99 \times 10^{-3}$ |
| $2,44 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-2} | $7,14 \times 10^{-3}$ |
| $2,64 \times 10^{-1}$ | $1,8 \times 10^{-2}$ | $6,33 \times 10^{-3}$ |
| $2,82 \times 10^{-1}$ | $1,8 \times 10^{-2}$ | $6,43 \times 10^{-3}$ |
| 3×10^{-1} | $1,8 \times 10^{-2}$ | $2,62 \times 10^{-3}$ |
| $3,18 \times 10^{-1}$ | $1,8 \times 10^{-2}$ | $2,41 \times 10^{-3}$ |
| $3,36 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | 1×10^{-3} |
| $3,52 \times 10^{-1}$ | $1,8 \times 10^{-2}$ | $9,13 \times 10^{-4}$ |
| $3,7 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | 7×10^{-4} |
| $3,86 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | $2,83 \times 10^{-4}$ |
| $4,02 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | $3,03 \times 10^{-4}$ |
| $4,18 \times 10^{-1}$ | $1,4 \times 10^{-2}$ | $1,1 \times 10^{-4}$ |
| $4,32 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | $2,65 \times 10^{-4}$ |
| $4,48 \times 10^{-1}$ | $1,4 \times 10^{-2}$ | $2,01 \times 10^{-5}$ |
| $4,62 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | $2,48 \times 10^{-5}$ |
| $4,78 \times 10^{-1}$ | $1,4 \times 10^{-2}$ | $1,17 \times 10^{-5}$ |
| $4,92 \times 10^{-1}$ | — | — |

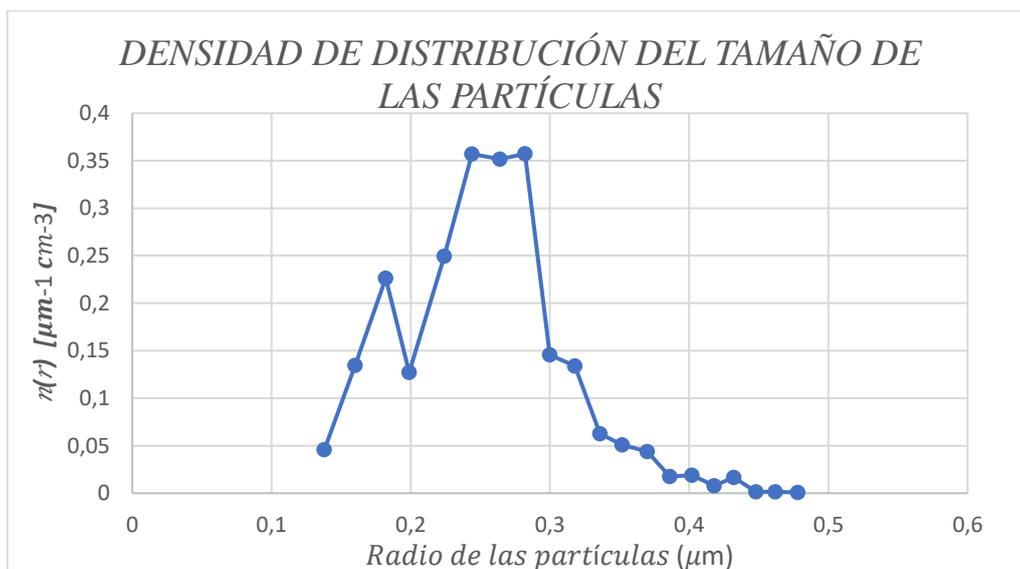
Tabla 7: Diferencias del radio (dr) y tamaños de partículas (dN) de la muestra 243

Y con estos valores se pueden calcular los de la distribución de tamaños. Como se cuenta con valores concretos y no con funciones continuas, la forma de calcular la distribución del tamaño de las partículas es haciendo el cociente entre el número de partículas registradas para cada intervalo y el diferencial del radio. Los valores obtenidos de la distribución de tamaños para cada radio (en la muestra 243) son los siguientes:

| <i>Radius</i> [μm] | $n(r) = \frac{dN(r)}{dr} \left[\frac{1}{\mu\text{m cm}^3} \right]$ |
|---------------------------------|---|
| $1,38 \times 10^{-1}$ | 5×10^{-2} |
| $1,6 \times 10^{-1}$ | $1,3 \times 10^{-1}$ |
| $1,82 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-1} |
| $1,99 \times 10^{-1}$ | $1,3 \times 10^{-1}$ |
| $2,24 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-1} |
| $2,44 \times 10^{-1}$ | 4×10^{-1} |
| $2,64 \times 10^{-1}$ | 4×10^{-1} |
| $2,82 \times 10^{-1}$ | 4×10^{-1} |
| 3×10^{-1} | $1,5 \times 10^{-1}$ |
| $3,18 \times 10^{-1}$ | $1,3 \times 10^{-1}$ |
| $3,36 \times 10^{-1}$ | 4×10^{-2} |
| $3,52 \times 10^{-1}$ | 5×10^{-2} |
| $3,7 \times 10^{-1}$ | 4×10^{-2} |
| $3,86 \times 10^{-1}$ | $1,8 \times 10^{-2}$ |
| $4,02 \times 10^{-1}$ | $1,9 \times 10^{-2}$ |
| $4,18 \times 10^{-1}$ | 8×10^{-3} |
| $4,32 \times 10^{-1}$ | $1,7 \times 10^{-2}$ |
| $4,48 \times 10^{-1}$ | $1,4 \times 10^{-3}$ |
| $4,62 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-3}$ |
| $4,78 \times 10^{-1}$ | 8×10^{-4} |
| $4,92 \times 10^{-1}$ | — |

Tabla 8: Valores de la distribución en función del radio

Obtenidos los valores de la distribución del tamaño de partículas ($n(r)$), se pueden representar frente al radio, lo que arroja unas gráficas [**Gráfica 1**] de gran valor científico.



Gráfica 1: Distribución del tamaño de partículas en la muestra 243

Conocida la función de distribución del tamaño de las partículas se puede calcular el número total de partículas por unidad de volumen (N_0):

$$N_0 = \int_0^{\infty} n(r) dr$$

Aunque la integral va desde los límites 0 hasta ∞ , solo nos quedamos con el tramo efectivo del que tenemos datos (a partir de cierto radio se puede considerar que el número de partículas que se van a detectar es nulo). N_0 se calcula con el área bajo la curva de la función de distribución representada frente al radio.

En este caso hay dos métodos que son óptimos para calcular el área. Dado que no tenemos una función continua, sino que tenemos una función construida a base de unos valores concretos, los métodos más óptimos son:

- **Método de los trapecios:** Este método se basa en aproximar el área bajo una curva mediante la suma de áreas de trapecios que se encuentran debajo de dicha curva. Para aplicar este método se deben seguir tres pasos:

1. División del intervalo: Primero, se divide el intervalo dado en subintervalos más pequeños. A mayor cantidad de subintervalos, mayor precisión en la estimación.
2. Cálculo del área de los trapecios: Se calcula el área de cada intervalo utilizando trapecios. Se calcula el área de cada trapecio formado por los puntos de la curva y los segmentos de línea recta que los unen en cada subintervalo. Aplicado a nuestro caso el área de cada trapecio se calcularía como:

$$A_k = \left(\frac{n(r_k) + n(r_{k+1})}{2} \right) \times dr_k$$

3. Suma de las áreas de los trapecios: Finalmente, se suman las áreas de todos los trapecios calculados en cada subintervalo para obtener el área total bajo la curva en el intervalo total dado. De esta forma es como se calcularía el valor de N_0 .

$$N_0 = \sum_{k=1}^n A_k$$

Utilizando este método, para la muestra 243, el valor de cada uno de las áreas de los trapecios y su suma total (N_0) son los mostrados en la tabla siguiente [Tabla 9]:

| Radius [μm] | dr [μm] | dN [cm^{-3}] | $n(r) = \frac{dN}{dr} \left[\frac{1}{\mu\text{m cm}^3} \right]$ | Área trapecios (A_k) [cm^{-3}] | N_0 [cm^{-3}] |
|--------------------------|------------------------|---------------------------|--|---|----------------------------|
| $1,38 \times 10^{-1}$ | $2,2 \times 10^{-2}$ | 0,00101 | 5×10^{-2} | 2×10^{-3} | 5×10^{-2} |
| $1,6 \times 10^{-1}$ | $2,2 \times 10^{-2}$ | 0,00296 | $1,3 \times 10^{-1}$ | 4×10^{-3} | |
| $1,82 \times 10^{-1}$ | $1,7 \times 10^{-2}$ | 0,00385 | 2×10^{-1} | 3×10^{-3} | |
| $1,99 \times 10^{-1}$ | $2,5 \times 10^{-2}$ | 0,00318 | $1,3 \times 10^{-1}$ | 5×10^{-3} | |
| $2,24 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-2} | 0,00499 | 2×10^{-1} | 6×10^{-3} | |
| $2,44 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-2} | 0,00714 | 4×10^{-1} | 7×10^{-3} | |
| $2,64 \times 10^{-1}$ | $1,8 \times 10^{-2}$ | 0,00633 | 4×10^{-1} | 6×10^{-3} | |
| $2,82 \times 10^{-1}$ | $1,8 \times 10^{-2}$ | 0,00643 | 4×10^{-1} | 5×10^{-3} | |

| | | | | |
|-----------------------|----------------------|----------|----------------------|----------------------|
| 3×10^{-1} | $1,8 \times 10^{-2}$ | 0,00262 | $1,5 \times 10^{-1}$ | 3×10^{-3} |
| $3,18 \times 10^{-1}$ | $1,8 \times 10^{-2}$ | 0,00241 | $1,3 \times 10^{-1}$ | $1,8 \times 10^{-3}$ |
| $3,36 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | 0,001 | 4×10^{-2} | 9×10^{-4} |
| $3,52 \times 10^{-1}$ | $1,8 \times 10^{-2}$ | 0,000913 | 5×10^{-2} | 9×10^{-4} |
| $3,7 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | 0,0007 | 4×10^{-2} | 5×10^{-4} |
| $3,86 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | 0,000283 | $1,8 \times 10^{-2}$ | 3×10^{-4} |
| $4,02 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | 0,000303 | $1,9 \times 10^{-2}$ | 2×10^{-4} |
| $4,18 \times 10^{-1}$ | $1,4 \times 10^{-2}$ | 0,00011 | 8×10^{-3} | $1,7 \times 10^{-4}$ |
| $4,32 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | 0,000265 | $1,7 \times 10^{-2}$ | $1,4 \times 10^{-4}$ |
| $4,48 \times 10^{-1}$ | $1,4 \times 10^{-2}$ | 0,000020 | $1,4 \times 10^{-3}$ | 2×10^{-5} |
| $4,62 \times 10^{-1}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | 0,000024 | $1,6 \times 10^{-3}$ | $1,9 \times 10^{-5}$ |
| $4,78 \times 10^{-1}$ | $1,4 \times 10^{-2}$ | 0,000011 | 8×10^{-4} | 6×10^{-6} |
| $4,92 \times 10^{-1}$ | — | 0,000007 | — | — |

Tabla 9: Datos para calcular el número total de partículas (método de los trapecios) en la muestra 243

- **Suma de rectángulos:** El proceso a seguir es el mismo que el de los trapecios, pero con la diferencia de que en este caso se utilizan rectángulos. De nuevo, los tres pasos a seguir son:
 1. División del intervalo: Como con los trapecios, se divide el intervalo dado en subintervalos más pequeños.
 2. Cálculo del área de los rectángulos: Se calcula el área de cada intervalo utilizando rectángulos. Aplicado a nuestro caso el área de cada rectángulo se calcularía como:

$$A_k = n(r_k) \times dr_k$$

3. Suma de las áreas de los rectángulos: Al igual que con los trapecios, se suman las áreas de todos los rectángulos calculados en cada subintervalo para obtener el área total bajo la curva en el intervalo total dado. De esta forma es como se calcularía el valor de N_0 utilizando rectángulos.

$$N_0 = \sum_{k=1}^n A_k$$

Utilizando este método, para la muestra 243, el valor de cada uno de las áreas de los rectángulos y su suma total son los mostrados en la siguiente tabla adjunta [Tabla 10]:

| Radius [μm] | $dN [\text{cm}^{-3}]$ | $n(r) = \frac{dN}{dr} \left[\frac{1}{\mu\text{m cm}^3} \right]$ | Área rectángulos (A_k) $n(r) dr [\text{cm}^{-3}]$ | $N_0 [\text{cm}^{-3}]$ |
|--------------------------|-----------------------|--|--|------------------------|
| $1,38 \times 10^{-1}$ | $1,01 \times 10^{-3}$ | 5×10^{-2} | 1×10^{-3} | 4×10^{-2} |
| $1,6 \times 10^{-1}$ | $2,96 \times 10^{-3}$ | $1,3 \times 10^{-1}$ | 3×10^{-3} | |
| $1,82 \times 10^{-1}$ | $3,85 \times 10^{-3}$ | 2×10^{-1} | 4×10^{-3} | |
| $1,99 \times 10^{-1}$ | $3,18 \times 10^{-3}$ | $1,3 \times 10^{-1}$ | 3×10^{-3} | |
| $2,24 \times 10^{-1}$ | $4,99 \times 10^{-3}$ | 2×10^{-1} | 5×10^{-3} | |
| $2,44 \times 10^{-1}$ | $7,14 \times 10^{-3}$ | 4×10^{-1} | 7×10^{-3} | |
| $2,64 \times 10^{-1}$ | $6,33 \times 10^{-3}$ | 4×10^{-1} | 6×10^{-3} | |
| $2,82 \times 10^{-1}$ | $6,43 \times 10^{-3}$ | 4×10^{-1} | 6×10^{-3} | |
| 3×10^{-1} | $2,62 \times 10^{-3}$ | $1,5 \times 10^{-1}$ | 3×10^{-3} | |
| $3,18 \times 10^{-1}$ | $2,41 \times 10^{-3}$ | $1,3 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-3} | |

| | | | |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| $3,36 \times 10^{-1}$ | 1×10^{-3} | 4×10^{-2} | 1×10^{-3} |
| $3,52 \times 10^{-1}$ | $9,13 \times 10^{-4}$ | 5×10^{-2} | 9×10^{-4} |
| $3,7 \times 10^{-1}$ | 7×10^{-4} | 4×10^{-2} | 7×10^{-4} |
| $3,86 \times 10^{-1}$ | $2,83 \times 10^{-4}$ | $1,8 \times 10^{-2}$ | 3×10^{-4} |
| $4,02 \times 10^{-1}$ | $3,03 \times 10^{-4}$ | $1,9 \times 10^{-2}$ | 3×10^{-4} |
| $4,18 \times 10^{-1}$ | $1,1 \times 10^{-4}$ | 8×10^{-3} | $1,1 \times 10^{-4}$ |
| $4,32 \times 10^{-1}$ | $2,65 \times 10^{-4}$ | $1,7 \times 10^{-2}$ | 3×10^{-4} |
| $4,48 \times 10^{-1}$ | $2,01 \times 10^{-5}$ | $1,4 \times 10^{-3}$ | 2×10^{-5} |
| $4,62 \times 10^{-1}$ | $2,48 \times 10^{-5}$ | $1,6 \times 10^{-3}$ | 2×10^{-5} |
| $4,78 \times 10^{-1}$ | $1,17 \times 10^{-5}$ | 8×10^{-4} | $1,2 \times 10^{-5}$ |
| $4,92 \times 10^{-1}$ | $7,5 \times 10^{-6}$ | — | — |

Tabla 10: Datos para calcular el número total de partículas (método de los rectángulos) en la muestra 243

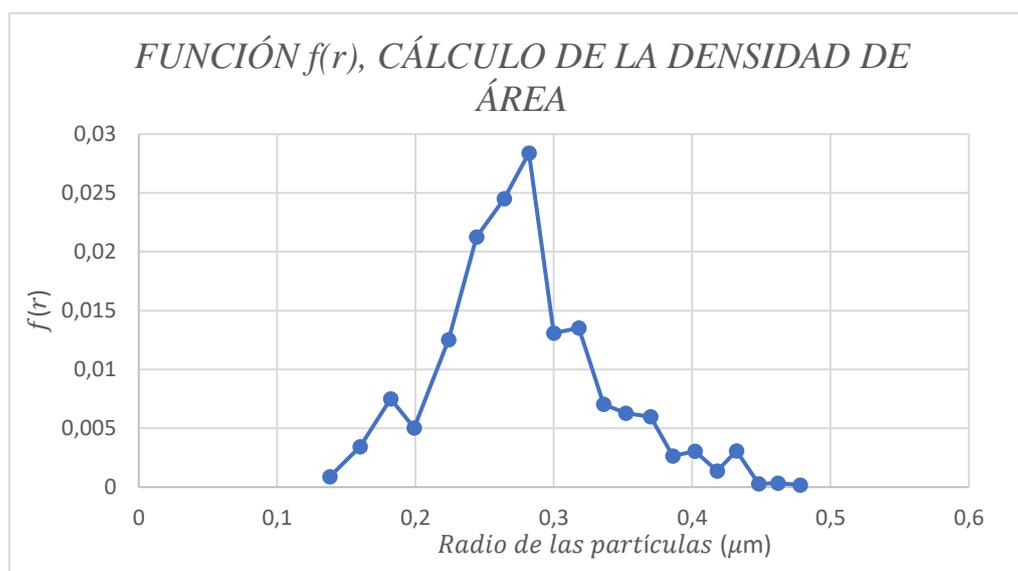
Para mejorar los resultados, tanto en el caso del área de los trapecios, como en el caso de los rectángulos se puede tomar un punto intermedio de cada subintervalo y hacer un promedio de la medida. Este método permitiría obtener una medida extra, pero bajo consulta con los tutores, se ha decidido que dicha mejora es irrelevante y por lo tanto innecesaria. Y también bajo recomendación de los tutores, **se han realizado los cálculos utilizando rectángulos**. Como se ha comprobado por comparación entre las tablas [Tabla 9 y Tabla 10], los resultados apenas varían. Además, es más recomendable usar rectángulos porque la unión de valores mediante rectas (Gráfica 1) se ha producido de manera artificial (no sabemos cómo es la función de distribución de tamaños continua). Una vez calculado el valor del número de partículas por unidad de volumen (N_0), se define la siguiente función:

$$f(r) = r^2 n(r)$$

Se define esta función porque se utiliza para calcular el área total de la distribución del tamaño de partículas (A_0). El área total de la distribución se calcula como:

$$A_0 = 4\pi \int_0^{\infty} r^2 n(r) dr = 4\pi \int_0^{\infty} f(r) dr$$

Entonces se representa la función $f(r)$ en función del radio y del área bajo la curva se obtiene el valor de A_0 .



Gráfica 2: Cálculo de la densidad de área en la muestra 243

De nuevo, haciendo uso de los datos de la muestra 243, se calcula el área a partir de la suma de pequeños rectángulos, como se ha realizado previamente para calcular N_0 , pero en este caso para la función $f(r)$ en vez de para $n(r)$.

| <i>Radius</i> [μm] | $f(r)$ [$\frac{\mu\text{m}}{\text{cm}^3}$] | Área de los rectángulos $f(r) dr$ [$\frac{\mu\text{m}^2}{\text{cm}^3}$] | A_0 [$\frac{\mu\text{m}^2}{\text{cm}^3}$] |
|---------------------------------|--|--|---|
| $1,38 \times 10^{-1}$ | 9×10^{-4} | $1,9 \times 10^{-5}$ | 4×10^{-2} |
| $1,6 \times 10^{-1}$ | 3×10^{-3} | 8×10^{-5} | |
| $1,82 \times 10^{-1}$ | 8×10^{-3} | $1,3 \times 10^{-4}$ | |
| $1,99 \times 10^{-1}$ | 5×10^{-3} | $1,3 \times 10^{-4}$ | |
| $2,24 \times 10^{-1}$ | $1,3 \times 10^{-2}$ | 3×10^{-4} | |
| $2,44 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-2} | 4×10^{-4} | |
| $2,64 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-2} | 4×10^{-4} | |
| $2,82 \times 10^{-1}$ | 3×10^{-2} | 5×10^{-4} | |
| 3×10^{-1} | $1,3 \times 10^{-2}$ | 2×10^{-4} | |
| $3,18 \times 10^{-1}$ | $1,4 \times 10^{-2}$ | 2×10^{-4} | |
| $3,36 \times 10^{-1}$ | 7×10^{-3} | $1,1 \times 10^{-4}$ | |
| $3,52 \times 10^{-1}$ | 6×10^{-3} | $1,1 \times 10^{-4}$ | |
| $3,7 \times 10^{-1}$ | 6×10^{-3} | 1×10^{-4} | |
| $3,86 \times 10^{-1}$ | 3×10^{-3} | 4×10^{-5} | |
| $4,02 \times 10^{-1}$ | 3×10^{-3} | 5×10^{-5} | |
| $4,18 \times 10^{-1}$ | $1,4 \times 10^{-3}$ | $1,9 \times 10^{-5}$ | |
| $4,32 \times 10^{-1}$ | 3×10^{-3} | 5×10^{-5} | |
| $4,48 \times 10^{-1}$ | 3×10^{-4} | 4×10^{-6} | |
| $4,62 \times 10^{-1}$ | 3×10^{-4} | 5×10^{-6} | |
| $4,78 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-4} | 3×10^{-6} | |
| $4,92 \times 10^{-1}$ | — | — | |

Tabla 11: Datos para calcular el área total de partículas en la muestra 243

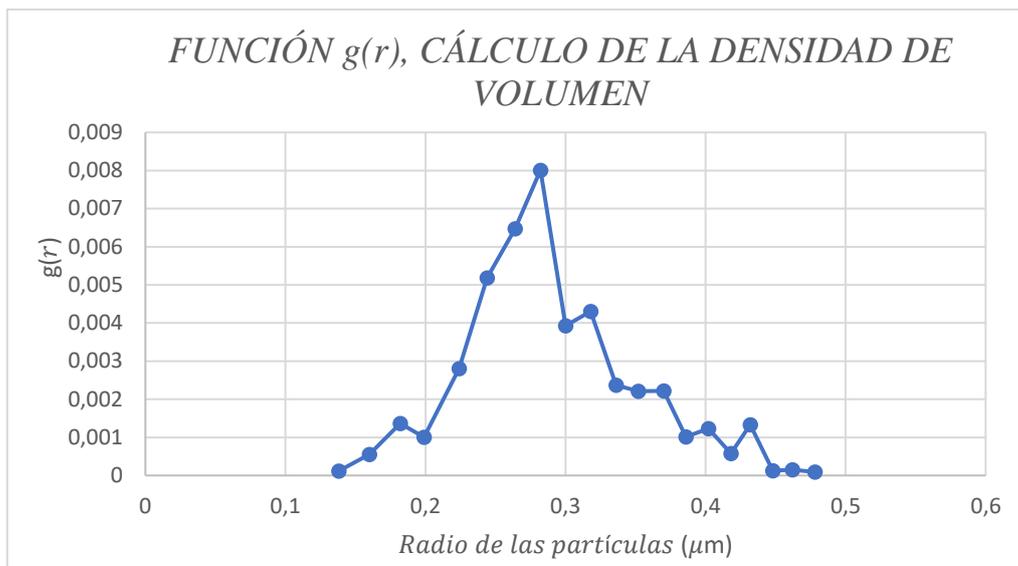
Por último, la última magnitud que vamos a calcular es la densidad de volumen. Para ello primero definimos una función que llamaremos $g(r)$:

$$g(r) = r^3 n(r)$$

Esta función se utiliza para calcular el volumen total de la distribución del tamaño de partículas (V_0):

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr = 4\pi \int_0^{\infty} g(r) dr$$

Entonces, análogamente a lo que se ha hecho previamente con las otras funciones, se representa la función $g(r)$ en función del radio, como se muestra en la gráfica [Gráfica 3], y del área bajo la curva se obtiene el valor de V_0 .



Gráfica 3: Cálculo de la densidad de volumen en la muestra 243

La tabla con los valores del área de cada uno de los rectángulos y el resultado total (V_0) es la siguiente [Tabla 12]:

| <i>Radius</i> [μm] | $g(r)$ [$\frac{\mu\text{m}^2}{\text{cm}^3}$] | Área de los rectángulos $g(r) dr$ [$\frac{\mu\text{m}^3}{\text{cm}^3}$] | V_0 [$\frac{\mu\text{m}^3}{\text{cm}^3}$] |
|---------------------------------|--|--|---|
| $1,38 \times 10^{-1}$ | $1,2 \times 10^{-4}$ | 3×10^{-6} | 3×10^{-3} |
| $1,6 \times 10^{-1}$ | 6×10^{-4} | $1,2 \times 10^{-5}$ | |
| $1,82 \times 10^{-1}$ | $1,4 \times 10^{-3}$ | 2×10^{-5} | |
| $1,99 \times 10^{-1}$ | 1×10^{-3} | 3×10^{-5} | |
| $2,24 \times 10^{-1}$ | 3×10^{-3} | 6×10^{-5} | |
| $2,44 \times 10^{-1}$ | 5×10^{-3} | 1×10^{-4} | |
| $2,64 \times 10^{-1}$ | 6×10^{-3} | $1,2 \times 10^{-4}$ | |
| $2,82 \times 10^{-1}$ | 8×10^{-3} | $1,4 \times 10^{-4}$ | |
| 3×10^{-1} | 4×10^{-3} | 7×10^{-5} | |
| $3,18 \times 10^{-1}$ | 4×10^{-3} | 8×10^{-5} | |
| $3,36 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-3} | 4×10^{-5} | |
| $3,52 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-3} | 4×10^{-5} | |
| $3,7 \times 10^{-1}$ | 2×10^{-3} | 4×10^{-5} | |
| $3,86 \times 10^{-1}$ | 1×10^{-3} | 2×10^{-5} | |
| $4,02 \times 10^{-1}$ | $1,2 \times 10^{-3}$ | 2×10^{-5} | |
| $4,18 \times 10^{-1}$ | 6×10^{-4} | 8×10^{-6} | |
| $4,32 \times 10^{-1}$ | $1,3 \times 10^{-3}$ | 2×10^{-5} | |
| $4,48 \times 10^{-1}$ | $1,3 \times 10^{-4}$ | 2×10^{-6} | |
| $4,62 \times 10^{-1}$ | $1,5 \times 10^{-4}$ | 2×10^{-6} | |
| $4,78 \times 10^{-1}$ | 9×10^{-5} | $1,3 \times 10^{-6}$ | |
| $4,92 \times 10^{-1}$ | $1,2 \times 10^{-4}$ | 3×10^{-6} | |

Tabla 12: Datos para calcular el volumen total de partículas en la muestra 243

Este mismo proceso se realiza con todas las muestras. La tabla con todos los resultados obtenidos esta añadida en el apartado de resultados.

6.2 OTROS PARÁMETROS

Generalmente, una distribución de tamaños se caracteriza por el número total de partículas por unidad de volumen, su centro y su dispersión. El centro de una distribución queda definido por:

- **La media (μ_0)**, que es el promedio aritmético:

La media es una medida que se calcula sumando todos los valores del conjunto, ponderados por sus respectivos pesos, y dividiendo el resultado entre el número total de valores. En este caso, la media se define como la suma de todos los productos de la distribución del tamaño de las partículas por el radio, entre el valor total de la densidad de partículas.

$$\mu_0 = \frac{\int_0^{\infty} r n(r) dr}{N_0}$$

- **La media geométrica (μ_g)**:

$$\mu_g = \exp\left(\frac{\int_0^{\infty} \ln r n(r) dr}{N_0}\right)$$

- **La varianza (σ_0^2)**:

La varianza es una medida de dispersión que indica cuanto se dispersan o se alejan los valores de un conjunto de datos respecto a su media aritmética. Específicamente, la varianza mide el promedio de las desviaciones al cuadrado de cada valor respecto a la media del conjunto de datos. En este caso la varianza se define como:

$$\sigma_0^2 = \frac{\int_0^{\infty} (r - \mu_0)^2 n(r) dr}{N_0}$$

Una varianza alta indica que los datos están más dispersos respecto a la media, mientras que una varianza baja indica que los datos están más concentrados alrededor de la media.

De la varianza se deduce la desviación estándar (o desviación cuadrática estándar) (σ_0), que es la raíz cuadrada de la varianza.

- **Radio efectivo (r_e)**:

El radio efectivo no hace referencia al radio real de las partículas, sino al radio sobre el que tiene influencia la partícula para desviar la radiación. La definición de radio efectivo tiene mucha importancia sobre las mediciones de las propiedades ópticas. La ventaja de utilizar el radio efectivo es que la energía eliminada en un haz de luz por una partícula es proporcional al área de dicha partícula (siempre que el radio de la partícula sea similar o mayor que la longitud de onda de la luz incidente). Ponderando cada radio por $\pi r^2 n(r)$ nos da el valor del radio efectivo.

$$r_e = \frac{\int_0^{\infty} r \pi r^2 n(r) dr}{\int_0^{\infty} \pi r^2 n(r) dr} = \frac{\int_0^{\infty} r^3 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^2 n(r) dr}$$

- **Varianza efectiva (v_e)**:

De manera análoga al radio efectivo, se define la varianza efectiva como:

$$v_e = \frac{\int_0^{\infty} (r - r_e)^2 \pi r^2 n(r) dr}{r_e^2 \int_0^{\infty} \pi r^2 n(r) dr} = \frac{\int_0^{\infty} (r - r_e)^2 r^2 n(r) dr}{r_e^2 \int_0^{\infty} r^2 n(r) dr}$$

El factor r^2 se introduce en el denominador para hacer que la varianza efectiva (v_e), sea adimensional y por lo tanto una medida relativa.

Calculando las integrales como se ha realizado previamente se obtienen todos estos parámetros para cada una de las muestras. Esos valores aparecen adjuntos en el apartado dedicado a la parte de resultados.

6.3 FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN

Con la intención de poder calcular más fácilmente los parámetros previamente nombrados y tratar de modelar los resultados obtenidos, se introducen las funciones de distribución.

La distribución normal, también conocida como distribución gaussiana, es una de las distribuciones de probabilidad más importantes. Se caracteriza por su forma de campana simétrica y se utiliza para modelar y analizar datos que tienden a agruparse alrededor de un valor medio central con una variabilidad simétrica. La distribución normal se calcula como:

$$n_l(l) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_0} \exp \left[-\frac{(r - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2} \right]$$

Sin embargo, esta distribución no se ajusta correctamente a la distribución del tamaño de partículas. La distribución que realmente sí se ajusta correctamente a los resultados obtenidos de la distribución del tamaño de partículas es la distribución log-normal. La distribución log-normal es una distribución de probabilidad de una variable cuyo logaritmo está distribuido normalmente. Está comprobado que esta distribución se adapta correctamente a los resultados obtenidos de la distribución del tamaño de las partículas.

Siendo $l = \ln r$, la distribución log-normal se deriva de la normal como:

$$n_l(l) = \frac{dN(l)}{dl} = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_l} \exp \left[-\frac{(l - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2} \right]$$

donde $N(l)$ representa el número de partículas se encuentra entre l y $l + dl$ por unidad de volumen, mientras que μ_l y σ_l son la media y la varianza de l respectivamente. Para tener la distribución log-normal en términos del radio, en vez de la variable l , se hace el cambio de variable teniendo en cuenta que:

$$l = \ln(r)$$

$$\frac{dl}{dr} = \frac{1}{r}$$

Y por lo tanto, la distribución log-normal en términos del radio se expresa como:

$$n(r) = \frac{dN(l)}{dl} = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_l} \exp \left[-\frac{(l - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2} \right] = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_l r} \exp \left[-\frac{(\ln r - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2} \right]$$

Por último, para dejar todo en función del radio, debemos definir μ_l y σ_l en función del radio:

- **Media logarítmica (μ_l):**

Se define la media logarítmica como:

$$\mu_l = \ln r_m$$

Donde en este caso r_m coincide con el radio geométrico tal que:

$$r_m = \mu_g = \exp \left[\frac{\int_0^\infty \ln r n(r) dr}{\int_0^\infty n(r) dr} \right] = \exp \left[\frac{\int_0^\infty \ln r n(r) dr}{N_0} \right]$$

Y por lo tanto:

$$\mu_l = \ln r_m = \frac{\int_0^{\infty} \ln r n(r) dr}{N_0}$$

- **Varianza logarítmica (σ_l^2):**

Análogamente a como se definió la varianza, la varianza logarítmica se define como:

$$\sigma_l^2 = \frac{\int_0^{\infty} (\ln r - \mu_l)^2 n(r) dr}{N_0}$$

Y por lo tanto:

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (\ln r - \mu_l)^2 n(r) dr}{N_0}}$$

Realizando las sustituciones oportunas se tiene la distribución log-normal en función de una única variable (el radio de las partículas). A continuación, vamos a estudiar cómo se ha elaborado la distribución log-normal para la “**Muestra 243**” y cómo se adapta a los resultados experimentales. De manera análoga se realizaría para el resto de muestras con sus respectivos datos y resultados.

Primero se calculan los parámetros μ_l y σ_l :

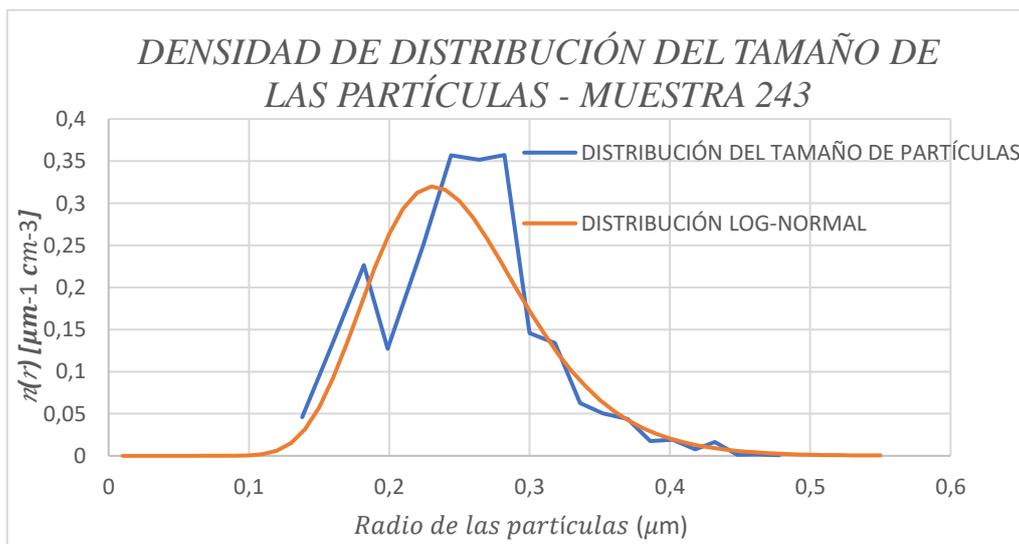
$$\mu_l = \ln r_m = \ln \mu_g \approx -1,4$$

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (\ln r - \mu_l)^2 n(r) dr}{N_0}} = \sqrt{0,05} \approx 0,2$$

Sustituyendo en la ecuación de la distribución log-normal:

$$n(r) \approx \frac{N_0}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_l r} \exp \left[-\frac{(\ln r - (-1,4))^2}{2 \times (0,2)^2} \right]$$

Y representando la función de distribución log-normal frente al radio y comparándola con la distribución del tamaño de partículas calculada previamente con los datos dados:



Gráfica 4: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 243

Al igual que hemos hecho antes con la distribución del tamaño de las partículas, podemos calcular los parámetros del número total de partículas (N_0), el área total de la distribución (A_0) y el volumen total (V_0) para la distribución log-normal. El proceso de cálculo de estas magnitudes es el mismo que el realizado previamente (cálculo del área bajo las curvas utilizando el método de los rectángulos). En concreto N_0 se corresponde con el valor del área bajo la curva de la distribución log-normal mostrada en la **Gráfica 4**.

En el apartado de resultados se adjuntan las tablas en las que se comparan los valores obtenidos para estas magnitudes utilizando los valores experimentales o la distribución log-normal.

6.4 PROBABILIDAD DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS

Uno de los puntos más interesantes del estudio de los aerosoles generados por una erupción volcánica, es cómo evoluciona la distribución del tamaño de las partículas durante la erupción. Para ello, en este apartado se van a estudiar las probabilidades de que una partícula se encuentre acotada entre unos valores concretos del radio. Estos valores se han seleccionado de manera cuidadosa para obtener unos resultados que nos arrojen la máxima información posible, como se explica a continuación:

Por un lado, se diferencia entre partículas Aitken y partículas de gran tamaño. Como se ha comentado previamente, las partículas Aitken son aquellas que tienen un radio inferior a $0,1 \mu m$ y las partículas de gran tamaño son las que tienen un radio superior a $1 \mu m$. Para realizar subdivisiones entre el tramo en que se encuentran entre estas dos clasificaciones se realiza una división logarítmica. El motivo de esta división es porque al estar representando una distribución log-normal, la agrupación de los valores también sigue una escala logarítmica. A continuación, se detallan los pasos para realizar esta división y calcular las probabilidades oportunas para 5 intervalos y 2 intervalos:

• DIVISIÓN EN 5 TRAMOS

Los pasos a seguir son:

1. La resta de los logaritmos de los dos extremos del tramo que se quiere subdividir:

$$\ln(1) - \ln(0,1) \approx 2,3$$

2. La división de ese valor entre los tramos entre los que se quiere subdividir el intervalo (3).

$$\frac{\ln(1) - \ln(0,1)}{3} = \frac{2,3}{3} \approx 0,77$$

3. Se multiplica este valor por la división del tramo que se busca y se le suma el logaritmo del valor inicial:

Subdivisión log. 1: $\left[\frac{\ln(1)-\ln(0,1)}{3}\right] \times 1 + \ln(0,1) = 0,77 + \ln(0,1) = -1,54$

Subdivisión log. 2: $\left[\frac{\ln(1)-\ln(0,1)}{3}\right] \times 2 + \ln(0,1) = 1,54 + \ln(0,1) = -0,77$

4. Se aplican antilogaritmos:

Subdivisión 1: $e^{(-1,54)} \approx 0,22$

Subdivisión 2: $e^{(-0,77)} \approx 0,46$

Por lo tanto, los cinco tramos en los que se divide el estudio del radio de las partículas son:

- **Tramo 1:** Partículas Aitken, con un radio menor a $r_1 = 0,1 \mu m$
- **Tramo 2:** Partículas con un radio entre $r_1 = 0,1 \mu m$ y $r_2 = 0,22 \mu m$
- **Tramo 3:** Partículas con un radio entre $r_2 = 0,22 \mu m$ y $r_3 = 0,46 \mu m$
- **Tramo 4:** Partículas con un radio entre $r_4 = 0,46 \mu m$ y $r_5 = 1 \mu m$
- **Tramo 5:** Partículas gigantes, con un radio mayor a $r_5 = 1 \mu m$

Utilizando esta división se procede a calcular la probabilidad de encontrar partículas para cada tramo. Para obtener dichas probabilidades se calcula como el área bajo la curva de la función log-normal en el tramo buscado entre el área total (para normalizar), todo ello por 100 para obtenerlo en forma porcentual.

En concreto para la “*Muestra 243*”, los valores de las probabilidades de encontrar partículas con un radio en cada uno de los tramos acotados son:

$$Probabilidad_{tramo\ 1} = \frac{\int_0^{r_1} n(r) dr}{N_0} \times 100 \approx 1,4 \times 10^{-2}$$

$$Probabilidad_{tramo\ 2} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} n(r) dr}{N_0} \times 100 \approx 36,2$$

$$Probabilidad_{tramo\ 3} = \frac{\int_{r_2}^{r_3} n(r) dr}{N_0} \times 100 \approx 63,5$$

$$Probabilidad_{tramo\ 4} = \frac{\int_{r_3}^{r_4} n(r) dr}{N_0} \times 100 \approx 0,3$$

$$Probabilidad_{tramo\ 5} = \frac{\int_{r_4}^{r_5} n(r) dr}{N_0} \times 100 \approx 0$$

Cabe destacar que, al igual que previamente, se ha utilizado el método de cálculo de áreas utilizando rectángulos para calcular las integrales en los intervalos. Respecto al valor utilizado para N_0 es el obtenido para la distribución log-normal, ya que estos cálculos también se están realizando sobre dicha distribución. Realizando los mismos cálculos para el resto de muestras se obtienen los resultados que se adjuntan en el apartado de resultados.

• DIVISIÓN EN 2 TRAMOS

Se realizan los mismos pasos que para el caso de 5 intervalos, y se obtiene que para una división logarítmica los 2 tramos para dos subdivisiones son:

- **Tramo 1:** Partículas con un radio entre $r_1 = 0 \mu m$ y $r_2 = 0,316 \mu m$
- **Tramo 2:** Partículas con un radio entre $r_2 = 0,316 \mu m$ y $r_3 = 1 \mu m$

En este caso se están despreciando el número de partículas con un radio mayor que $r_3 = 1 \mu m$.

La motivación para repetir los mismos pasos pero haciendo solo dos intervalos es porque de esta forma se aprecian mejor las diferencias en las probabilidades del tamaño de partículas que se producen entre antes y después de la erupción. En concreto para la “*Muestra 243*”, los valores de las probabilidades de encontrar partículas con un radio en cada uno de los tramos acotados son:

$$Probabilidad_{tramo\ 1} = \frac{\int_0^{r_1} n(r) dr}{N_0} \times 100 = 86,5$$

$$Probabilidad_{tramo\ 2} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} n(r) dr}{N_0} \times 100 = 13,5$$

Los datos del resto de muestras, al igual que los de la división en 5 tramos se adjuntan en la parte de resultados.

Este apartado está dedicado para mostrar los resultados que se han detallado en el apartado de metodología. En la parte de metodología se ha explicado el proceso para una muestra concreta (*Muestra 243*). A continuación, se muestran tabulados los datos de cada uno de los apartados para la totalidad de las muestras.

7.1 RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS RELACIONADOS CON EL TAMAÑO DE PARTÍCULAS

En el apartado de metodología se ha explicado el proceso necesario para calcular el número de partículas, área y volumen total (N_0 , A_0 y V_0 respectivamente). A continuación, se adjunta una tabla con todos los resultados obtenidos del número total de partículas, área total y volumen total para todas las muestras. Además, se comparan los valores obtenidos con los teóricos que se presentaban en los documentos del proyecto.

| SAMPLE | $N_0 [cm^{-3}]$ | $A_0 \left[\frac{\mu m^2}{cm^{-3}} \right]$ | $V_0 \left[\frac{\mu m^3}{cm^{-3}} \right]$ | CONC. REAL (N_0) Numb. Conc. | VOLUMEN REAL (V_0) Vol. Conc. |
|--------|----------------------|--|--|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 243 | 4×10^{-2} | 4×10^{-2} | 3×10^{-3} | $4,46 \times 10^{-2}$ | $3,42 \times 10^{-3}$ |
| 244 | $1,2 \times 10^{-2}$ | $1,3 \times 10^{-2}$ | $1,3 \times 10^{-3}$ | $1,24 \times 10^{-2}$ | $1,33 \times 10^{-3}$ |
| 245 | $1,4 \times 10^{-2}$ | $1,6 \times 10^{-2}$ | $1,7 \times 10^{-3}$ | $1,44 \times 10^{-2}$ | $1,69 \times 10^{-3}$ |
| 252 | $1,2 \times 10^{-2}$ | $1,2 \times 10^{-2}$ | $1,3 \times 10^{-3}$ | $1,19 \times 10^{-2}$ | $1,31 \times 10^{-3}$ |
| 254 | 2×10^{-2} | 3×10^{-2} | 3×10^{-3} | $2,22 \times 10^{-2}$ | $2,89 \times 10^{-3}$ |
| 257 | 2×10^{-2} | 2×10^{-2} | 2×10^{-3} | $2,04 \times 10^{-2}$ | $2,42 \times 10^{-3}$ |
| 258 | 7×10^{-2} | 8×10^{-2} | 9×10^{-3} | $6,88 \times 10^{-2}$ | $8,76 \times 10^{-3}$ |
| 259 | 6×10^{-2} | 5×10^{-2} | 5×10^{-3} | $5,85 \times 10^{-2}$ | $4,98 \times 10^{-3}$ |
| 265 | 3×10^{-2} | 5×10^{-2} | 6×10^{-3} | $3,45 \times 10^{-2}$ | $5,93 \times 10^{-3}$ |
| 266 | 2×10^{-1} | 4×10^{-1} | 5×10^{-2} | $2,16 \times 10^{-1}$ | $5,12 \times 10^{-2}$ |
| 268 | 2×10^{-1} | 2×10^{-1} | 3×10^{-2} | $2,29 \times 10^{-1}$ | $2,5 \times 10^{-2}$ |
| 271 | 5×10^{-2} | 6×10^{-2} | 7×10^{-3} | $5,05 \times 10^{-2}$ | $6,76 \times 10^{-3}$ |

Tabla 13: Resultados para todas las muestras

7.2 RESULTADOS DE OTROS PARÁMETROS

En el apartado 6.2, se explican cuáles son las fórmulas y la definición de algunos parámetros que nos pueden resultar de gran utilidad para estudiar los aerosoles de cada muestra. Después de aplicar las fórmulas explicadas en dicho apartado para cada una de las muestras, se obtienen los resultados que se adjuntan en la siguiente tabla (**Tabla 14**).

| SAMPLE | μ_0 | μ_g | σ_0^2 | r_e | v_e |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 243 | $2,51 \times 10^{-1}$ | $2,44 \times 10^{-1}$ | $3,26 \times 10^{-2}$ | $2,77 \times 10^{-1}$ | $4,53 \times 10^{-2}$ |
| 244 | $2,84 \times 10^{-1}$ | $2,78 \times 10^{-1}$ | $3,44 \times 10^{-2}$ | $3,07 \times 10^{-1}$ | $2,75 \times 10^{-2}$ |
| 245 | $2,97 \times 10^{-1}$ | $2,94 \times 10^{-1}$ | $1,99 \times 10^{-2}$ | $3,1 \times 10^{-1}$ | $2,04 \times 10^{-2}$ |
| 252 | $2,6 \times 10^{-1}$ | $2,43 \times 10^{-1}$ | $1,01 \times 10^{-2}$ | $3,4 \times 10^{-1}$ | $1,11 \times 10^{-1}$ |
| 254 | 3×10^{-1} | $2,92 \times 10^{-1}$ | $4,32 \times 10^{-2}$ | $3,26 \times 10^{-1}$ | $2,95 \times 10^{-2}$ |
| 257 | $2,91 \times 10^{-1}$ | $2,85 \times 10^{-1}$ | $3,5 \times 10^{-2}$ | $3,15 \times 10^{-1}$ | $3,52 \times 10^{-2}$ |
| 258 | 3×10^{-1} | $2,94 \times 10^{-1}$ | $3,65 \times 10^{-2}$ | $3,24 \times 10^{-1}$ | $3,95 \times 10^{-2}$ |
| 259 | $2,57 \times 10^{-1}$ | $2,49 \times 10^{-1}$ | $4,19 \times 10^{-2}$ | $2,9 \times 10^{-1}$ | $6,4 \times 10^{-2}$ |
| 265 | $2,34 \times 10^{-1}$ | $3,29 \times 10^{-1}$ | $3,24 \times 10^{-2}$ | $3,54 \times 10^{-1}$ | $3,17 \times 10^{-2}$ |
| 266 | $3,67 \times 10^{-1}$ | $3,6 \times 10^{-1}$ | $3,92 \times 10^{-2}$ | 4×10^{-1} | $4,5 \times 10^{-2}$ |
| 268 | $2,68 \times 10^{-1}$ | $2,56 \times 10^{-1}$ | $7,49 \times 10^{-2}$ | $3,29 \times 10^{-1}$ | $1,11 \times 10^{-1}$ |
| 271 | $3,03 \times 10^{-1}$ | $2,95 \times 10^{-1}$ | $4,53 \times 10^{-2}$ | $3,32 \times 10^{-1}$ | $4,04 \times 10^{-2}$ |

Tabla 14: Recopilación de parámetros de las muestras

7.3 RESULTADOS DE LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN

A continuación se adjuntan las tablas en las que se comparan los valores obtenidos para estas magnitudes utilizando a partir de los datos ("VALORES DE LA MUESTRA") los obtenidos utilizando la distribución log-normal ("DISTRIBUCIÓN LOG. NORMAL") y los que ya venían adjuntos en el documento del proyecto Stardust ("CONC. REAL (N_0) – Numb. Conc.")

| SAMPLE | $N_0 [cm^{-3}]$ VALORES DE LA MUESTRA | $N_0 [cm^{-3}]$ DISTRIBUCIÓN LOG. NORMAL | CONC. REAL (N_0) Numb. Conc. |
|--------|--|---|-------------------------------------|
| 243 | $4,46 \times 10^{-2}$ | $4,46 \times 10^{-2}$ | $4,46 \times 10^{-2}$ |
| 244 | $1,24 \times 10^{-2}$ | $1,24 \times 10^{-2}$ | $1,24 \times 10^{-2}$ |
| 245 | $1,44 \times 10^{-2}$ | $1,44 \times 10^{-2}$ | $1,44 \times 10^{-2}$ |
| 252 | $1,19 \times 10^{-2}$ | $1,19 \times 10^{-2}$ | $1,19 \times 10^{-2}$ |
| 254 | $2,21 \times 10^{-2}$ | $2,21 \times 10^{-2}$ | $2,22 \times 10^{-2}$ |
| 257 | $2,02 \times 10^{-2}$ | $2,02 \times 10^{-2}$ | $2,04 \times 10^{-2}$ |
| 258 | $6,87 \times 10^{-2}$ | $6,87 \times 10^{-2}$ | $6,88 \times 10^{-2}$ |
| 259 | $5,85 \times 10^{-2}$ | $5,85 \times 10^{-2}$ | $5,85 \times 10^{-2}$ |
| 265 | $3,43 \times 10^{-2}$ | $3,43 \times 10^{-2}$ | $3,45 \times 10^{-2}$ |
| 266 | $2,16 \times 10^{-1}$ | $2,16 \times 10^{-1}$ | $2,16 \times 10^{-1}$ |
| 268 | $2,29 \times 10^{-1}$ | $2,29 \times 10^{-1}$ | $2,29 \times 10^{-1}$ |
| 271 | $5,05 \times 10^{-2}$ | $5,05 \times 10^{-2}$ | $5,05 \times 10^{-2}$ |

Tabla 15: Comparación del número total de partículas

Para el caso del área total (A_0), no había unos valores teóricos adjuntos en el documento del proyecto STARDUST, por lo que solo se muestran los valores de la distribución log-normal y los calculados con los datos de la muestra. La comparación entre los valores obtenidos del área total calculado utilizando los datos experimentales y la distribución log-normal son los siguientes:

| <i>SAMPLE</i> | $A_0 \left[\frac{\mu m^2}{cm^{-3}} \right]$ <i>VALORES DE LA MUESTRA</i> | $A_0 \left[\frac{\mu m^2}{cm^{-3}} \right]$ <i>DISTRIBUCIÓN LOG. NORMAL</i> |
|---------------|--|---|
| 243 | $3,71 \times 10^{-2}$ | $3,73 \times 10^{-2}$ |
| 244 | $1,31 \times 10^{-2}$ | $1,33 \times 10^{-2}$ |
| 245 | $1,63 \times 10^{-2}$ | $1,64 \times 10^{-2}$ |
| 252 | $1,16 \times 10^{-2}$ | $1,15 \times 10^{-2}$ |
| 254 | $2,63 \times 10^{-2}$ | $2,68 \times 10^{-2}$ |
| 257 | $2,25 \times 10^{-2}$ | $2,27 \times 10^{-2}$ |
| 258 | $8,08 \times 10^{-2}$ | $8,1 \times 10^{-2}$ |
| 259 | $5,15 \times 10^{-2}$ | $5,17 \times 10^{-2}$ |
| 265 | $4,94 \times 10^{-2}$ | $4,95 \times 10^{-2}$ |
| 266 | $3,81 \times 10^{-1}$ | $3,8 \times 10^{-1}$ |
| 268 | $2,28 \times 10^{-1}$ | $2,24 \times 10^{-1}$ |
| 271 | $6,12 \times 10^{-2}$ | $6,16 \times 10^{-2}$ |

Tabla 16: Comparación del área total

Y para el caso del volumen total (V_0), la comparación entre los datos experimentales, los obtenidos con la distribución log-normal y los facilitados en el documento de origen son:

| <i>SAMPLE</i> | $V_0 \left[\frac{\mu m^3}{cm^{-3}} \right]$ <i>VALORES DE LA MUESTRA</i> | $V_0 \left[\frac{\mu m^3}{cm^{-3}} \right]$ <i>DISTRIBUCIÓN LOG. NORMAL</i> | <i>VOLUMEN REAL (V_0)</i> <i>Vol. Conc.</i> |
|---------------|--|---|---|
| 243 | $3,42 \times 10^{-3}$ | $3,48 \times 10^{-3}$ | $3,42 \times 10^{-3}$ |
| 244 | $1,34 \times 10^{-3}$ | $1,41 \times 10^{-3}$ | $1,33 \times 10^{-3}$ |
| 245 | $1,69 \times 10^{-3}$ | $1,7 \times 10^{-3}$ | $1,69 \times 10^{-3}$ |
| 252 | $1,32 \times 10^{-3}$ | $1,31 \times 10^{-3}$ | $1,31 \times 10^{-3}$ |
| 254 | $2,86 \times 10^{-3}$ | $3,05 \times 10^{-3}$ | $2,89 \times 10^{-3}$ |
| 257 | $2,36 \times 10^{-3}$ | $2,41 \times 10^{-3}$ | $2,42 \times 10^{-3}$ |
| 258 | $8,74 \times 10^{-3}$ | $8,81 \times 10^{-3}$ | $8,76 \times 10^{-3}$ |
| 259 | $4,98 \times 10^{-3}$ | $5,03 \times 10^{-3}$ | $4,98 \times 10^{-3}$ |
| 265 | $5,83 \times 10^{-3}$ | $5,83 \times 10^{-3}$ | $5,93 \times 10^{-3}$ |
| 266 | $5,09 \times 10^{-2}$ | $5,06 \times 10^{-2}$ | $5,12 \times 10^{-2}$ |
| 268 | $2,51 \times 10^{-2}$ | $2,36 \times 10^{-2}$ | $2,5 \times 10^{-2}$ |
| 271 | $6,78 \times 10^{-3}$ | $6,91 \times 10^{-3}$ | $6,76 \times 10^{-3}$ |

Tabla 17: Comparación del volumen total

Como se puede apreciar en estas tablas los resultados obtenidos de una u otra forma coinciden prácticamente en su totalidad. De aquí se deduce que la distribución log-normal es una muy buena distribución que se ajusta a los datos de la distribución del tamaño de las partículas. Por lo tanto, en muchos casos es favorable utilizar dicha distribución para realizar cálculos sin obtener un gran error por ello.

7.4 RESULTADOS DE LA PROBABILIDAD DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS

Los resultados obtenidos de la probabilidad del tamaño de las partículas para cada tramo cuando la división se realiza en **5 intervalos** son los siguientes:

| | SAMPLE | PROBABILIDAD TRAMO 1 (%) | PROBABILIDAD TRAMO 2 (%) | PROBABILIDAD TRAMO 3 (%) | PROBABILIDAD TRAMO 4 (%) | PROBABILIDAD TRAMO 5 (%) |
|------------------------|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ANTES DE LA ERUPCIÓN | 243 | $1,4 \times 10^{-2}$ | 36,2 | 63,5 | 0,3 | 0 |
| | 244 | 1×10^{-3} | 18 | 80,8 | 1,2 | 4×10^{-14} |
| | 245 | 8×10^{-10} | 4,2 | 95,6 | $1,5 \times 10^{-1}$ | 4×10^{-14} |
| | 252 | 1,2 | 40,7 | 54,2 | 3,9 | 0 |
| | 254 | $1,8 \times 10^{-3}$ | 14,8 | 82,1 | 3,1 | $1,4 \times 10^{-14}$ |
| | 257 | $1,3 \times 10^{-4}$ | 13,4 | 85,5 | 1,1 | 0 |
| | 258 | $1,7 \times 10^{-5}$ | 9,5 | 89,3 | 1,2 | 4×10^{-14} |
| | 259 | 3×10^{-2} | 34,7 | 64,6 | 0,7 | 2×10^{-14} |
| INTERMEDIO | 265 | 6×10^{-10} | 1,3 | 96,6 | 2,1 | 4×10^{-14} |
| DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN | 266 | 5×10^{-8} | 1 | 88,7 | 10,3 | 0 |
| | 268 | 1×10^{-1} | 32,7 | 65,2 | 2 | 7×10^{-15} |
| | 271 | 3×10^{-4} | 11,7 | 85,9 | 2,4 | 0 |

Tabla 18: Probabilidades del tamaño de las partículas en 5 intervalos

Y los datos cuando la división se realiza en solo **2 intervalos** son:

| | SAMPLE | PROBABILIDAD TRAMO 1 (%) | PROBABILIDAD TRAMO 2 (%) |
|------------------------|--------|--------------------------|--------------------------|
| ANTES DE LA ERUPCIÓN | 243 | 86,5 | 13,5 |
| | 244 | 71,5 | 28,5 |
| | 245 | 68,4 | 31,6 |
| | 252 | 75,4 | 23,7 |
| | 254 | 62,6 | 37,4 |
| | 257 | 61,1 | 38,9 |
| | 258 | 64 | 36 |
| | 259 | 82,8 | 17,2 |
| INTERMEDIO | 265 | 40,9 | 59,1 |
| DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN | 266 | 26,3 | 73,7 |
| | 268 | 76,5 | 23,4 |
| | 271 | 61,6 | 38,4 |

Tabla 19: Probabilidades del tamaño de las partículas en 2 intervalos

En concreto, el estudio de estas probabilidades y la comparación entre los resultados obtenidos antes y después de la erupción nos van a resultar de gran ayuda para ver posteriormente los efectos de dicha erupción sobre las mediciones en los aerosoles.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación, se procede a realizar un análisis detallado de los resultados obtenidos que nos permita estudiar cómo una erupción volcánica afecta a las mediciones realizadas sobre los aerosoles estratosféricos.

Se comparan los resultados de los parámetros obtenidos antes de que se produjera la erupción, en el intervalo en el que se produjo hasta que terminaron de ser detectados los aerosoles (“INTERMEDIO”) y el intervalo posterior a la erupción. Para realizar una comparación adecuada, lo que se van a comparar son los promedios. Para obtener los valores promedios antes de la erupción, se han promediado las muestras 243, 244, 245, 252, 254, 257, 258, y 259. Los valores promedios posteriores a la erupción se han realizado promediando las muestras 266, 268 y 271. El valor intermedio se corresponde con el de la muestra 265, que se estudia a parte porque pertenece a un periodo de tiempo en el que la erupción ya había comenzado, pero los aerosoles estaban en proceso de llegar a las latitudes en las que operaban los aparatos de medida.

A continuación se adjuntan las tablas con los promedios de todos los parámetros calculados previamente para los distintos intervalos temporales. En estas tablas, de nuevo, se adjuntan los datos obtenidos con los valores de las muestras, los datos obtenidos a través de la distribución log-normal y los datos facilitados por el propio documento del proyecto Stardust.

| | $N_0 [cm^{-3}]$ VALORES DE LA MUESTRA | $N_0 [cm^{-3}]$ DISTRIBUCIÓN LOG. NORMAL | CONC. REAL (N_0) Numb. Conc. |
|--|---|--|--|
| PROMEDIO ANTES DE LA ERUPCIÓN | $3,16 \times 10^{-2}$ | $3,16 \times 10^{-2}$ | $3,165 \times 10^{-2}$ |
| PROMEDIO INTERMEDIO | $3,43 \times 10^{-2}$ | $3,43 \times 10^{-2}$ | $3,45 \times 10^{-2}$ |
| PROMEDIO DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN | $1,65 \times 10^{-1}$ | $1,65 \times 10^{-1}$ | $1,65166667 \times 10^{-1}$ |

Tabla 20: Promedios del número total de partículas

| | $A_0 \left[\frac{\mu m^2}{cm^{-3}} \right]$ VALORES DE LA MUESTRA | $A_0 \left[\frac{\mu m^2}{cm^{-3}} \right]$ DISTRIBUCIÓN LOG. NORMAL |
|--|--|---|
| PROMEDIO ANTES DE LA ERUPCIÓN | $3,24 \times 10^{-2}$ | $3,26 \times 10^{-2}$ |
| PROMEDIO INTERMEDIO | $4,94 \times 10^{-2}$ | $4,95 \times 10^{-2}$ |
| PROMEDIO DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN | $2,24 \times 10^{-1}$ | $2,22 \times 10^{-1}$ |

Tabla 21: Promedios del área total

| | $V_0 \left[\frac{\mu m^3}{cm^{-3}} \right]$ VALORES DE LA MUESTRA | $V_0 \left[\frac{\mu m^3}{cm^{-3}} \right]$ DISTRIBUCIÓN LOG. NORMAL | VOLUMEN REAL (V_0) Vol. Conc. |
|--|--|---|---|
| PROMEDIO ANTES DE LA ERUPCIÓN | $3,34 \times 10^{-3}$ | $3,4 \times 10^{-3}$ | $3,35 \times 10^{-3}$ |
| PROMEDIO INTERMEDIO | $5,83 \times 10^{-3}$ | $5,83 \times 10^{-3}$ | $5,93 \times 10^{-3}$ |
| PROMEDIO DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN | $2,76 \times 10^{-2}$ | $2,7 \times 10^{-2}$ | $2,7653333 \times 10^{-2}$ |

Tabla 22: Promedios del volumen total

Utilizando los promedios de la distribución log-normal, para el caso del **número total de partículas** (N_0), los aumentos porcentuales son:

$$\left[\frac{\text{PROMEDIO INTERMEDIO} - \text{PROMEDIO ANTES DE LA ERUPCIÓN}}{\text{PROMEDIO ANTES DE LA ERUPCIÓN}} \right] \times 100 =$$

$$= \left[\frac{0,0343 - 0,0316}{0,0316} \right] \times 100 \approx \mathbf{8,6\%}$$

Del 8,6 % en la medida de la muestra 265 (muestra intermedia) respecto de las de antes de la erupción.

$$\left[\frac{\text{PROMEDIO DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN} - \text{PROMEDIO ANTES DE LA ERUPCIÓN}}{\text{PROMEDIO ANTES DE LA ERUPCIÓN}} \right] \times 100 =$$

$$= \left[\frac{0,165 - 0,0316}{0,0316} \right] \times 100 \approx \mathbf{422,5\%}$$

Y del 422,5% en las medidas de las muestras después de la erupción respecto de las de antes de la erupción.

Haciendo lo análogo para el **área total** (A_0), se tiene que los aumentos porcentuales son del **5,2 %** en la medida de la muestra 265 (muestra intermedia) respecto de las de antes de la erupción y del **581 %** en las medidas de las muestras después de la erupción respecto de las de antes de la erupción.

En el caso del **volumen total** (V_0), los aumentos porcentuales son del **71.5 %** en la medida de la muestra 265 (muestra intermedia) respecto de las de antes de la erupción y del **694,7 %** en las medidas de las muestras después de la erupción respecto de las de antes de la erupción.

Por lo tanto, se aprecia cómo hay un aumento sustancial del número total de partículas, del área total y del volumen total en cualquiera de las formas en las que hayan sido medidos. Además, estas medidas son realmente significativas, porque muestran cómo para la medida intermedia (muestra 265) los valores ya han aumentado, pero no tanto como lo hacen para mediciones posteriores (después de la erupción) donde todo el número de aerosoles ya ha sido registrado porque han llegado a las latitudes de detección. También se realiza una tabla (**Tabla 23**) con los promedios para el resto de parámetros calculados previamente, como son la media (μ_0), la media geométrica (μ_g), la varianza (σ_0^2), el radio efectivo (r_e) y la varianza efectiva (v_e).

| | μ_0 | μ_g | σ_0^2 | r_e | v_e |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| PROMEDIO ANTES DE LA ERUPCIÓN | $2,8 \times 10^{-1}$ | $2,72 \times 10^{-1}$ | $4,31 \times 10^{-3}$ | $3,11 \times 10^{-1}$ | $4,65 \times 10^{-2}$ |
| PROMEDIO INTERMEDIO | $3,34 \times 10^{-1}$ | $3,29 \times 10^{-1}$ | $3,24 \times 10^{-3}$ | $3,54 \times 10^{-1}$ | $3,17 \times 10^{-2}$ |
| PROMEDIO DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN | $3,13 \times 10^{-1}$ | $3,04 \times 10^{-1}$ | $5,98 \times 10^{-3}$ | $3,54 \times 10^{-1}$ | $6,55 \times 10^{-2}$ |

Tabla 23: Promedios de otros parámetros

Sin embargo, para estos otros parámetros (La media (μ_0), la media geométrica (μ_g), la varianza (σ_0^2), el radio efectivo (r_e) y la varianza efectiva (v_e)) no hay una diferencia tan

sustancial. Puede deducirse que hay un aumento pero que es ligero, a diferencia de lo que ocurría con el número total de partículas el área total y el volumen total.

Y por último, se estudia el cambio en las probabilidades de encontrar partículas con diferente radio. Este análisis se hace por separado para los dos casos planteados, cuando la división se hace en 5 intervalos y para cuando se hace en 2 intervalos.

- **DIVISIÓN EN 5 TRAMOS**

A continuación, se adjunta una tabla (**Tabla 24**) donde se puede apreciar cómo hay un cambio sustancial entre las probabilidades de encontrar una partícula con un determinado radio antes y después de la erupción. En concreto se aprecia cómo disminuye el número de partículas detectadas en el “TRAMO 1” y “TRAMO 2” mientras que hay un aumento sustancial en las probabilidades para el “TRAMO 3” y “TRAMO 4”.

También cabe destacar que los valores obtenidos para la muestra intermedia, muestra 265, muestran cómo se produjo un gran aumento inicial en las probabilidades del “TRAMO 3”, que posteriormente resultó ser más significativo en el “TRAMO 4”.

| | TRAMO 1 | TRAMO 2 | TRAMO 3 | TRAMO 4 | TRAMO 5 |
|--|----------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|
| PROMEDIO ANTES DE LA ERUPCIÓN (%) | $1,5 \times 10^{-1}$ | 21,4 | 77 | 1,5 | 2×10^{-14} |
| PROMEDIO INTERMEDIO (%) | 6×10^{-10} | 1,3 | 96,6 | 2,1 | 4×10^{-14} |
| PROMEDIO DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN (%) | 3×10^{-2} | 15,1 | 79,9 | 4,9 | 2×10^{-15} |

Tabla 24: Promedios de las probabilidades del radio de las partículas para 5 intervalos

Se aprecia cómo disminuye el número de partículas detectadas en el “TRAMO 1” y “TRAMO 2” mientras que hay un aumento sustancial en las probabilidades para el “TRAMO 3” y “TRAMO 4”.

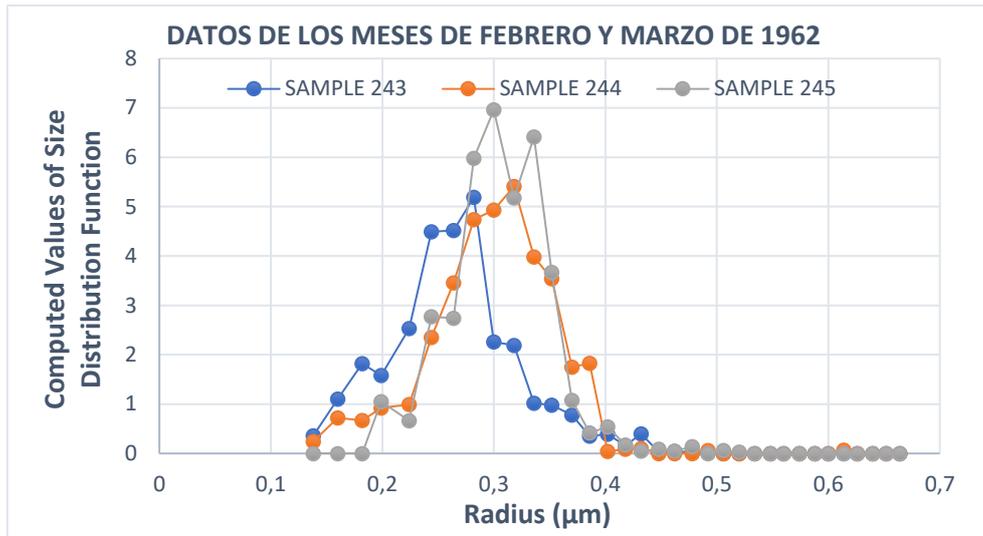
- **DIVISIÓN EN 2 TRAMOS**

| | TRAMO 1 | TRAMO 2 |
|--|----------------|----------------|
| PROMEDIO ANTES DE LA ERUPCIÓN (%) | 71,5 | 28,4 |
| PROMEDIO INTERMEDIO (%) | 40,9 | 59,1 |
| PROMEDIO DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN (%) | 54,8 | 45,2 |

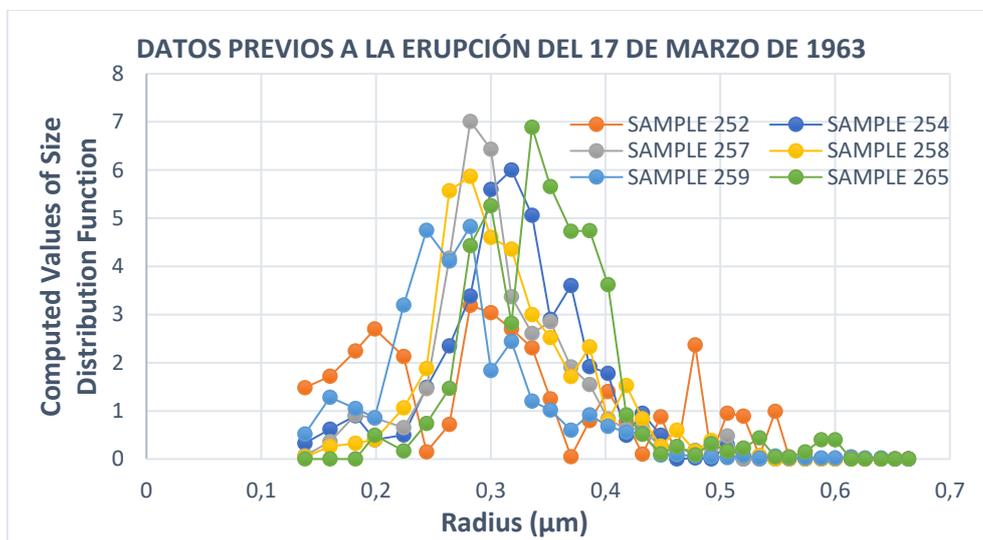
Tabla 25: Promedios de las probabilidades del radio de las partículas para 2 intervalos

En este caso no se han considerado las partículas con radios menores a $0,1 \mu m$ o superiores a $1 \mu m$ porque apenas hay partículas con esas dimensiones. De manera análoga a lo realizado en el caso de 5 intervalos se comparan las probabilidades promedio entre antes y después de la erupción, con la ventaja de que cuando se eligen dos intervalos las diferencias se hacen aún más significativas. Se aprecia como disminuye el número de partículas en el “TRAMO 1”, mientras que aumenta notablemente el número de partículas en el “TRAMO 2” después de la erupción.

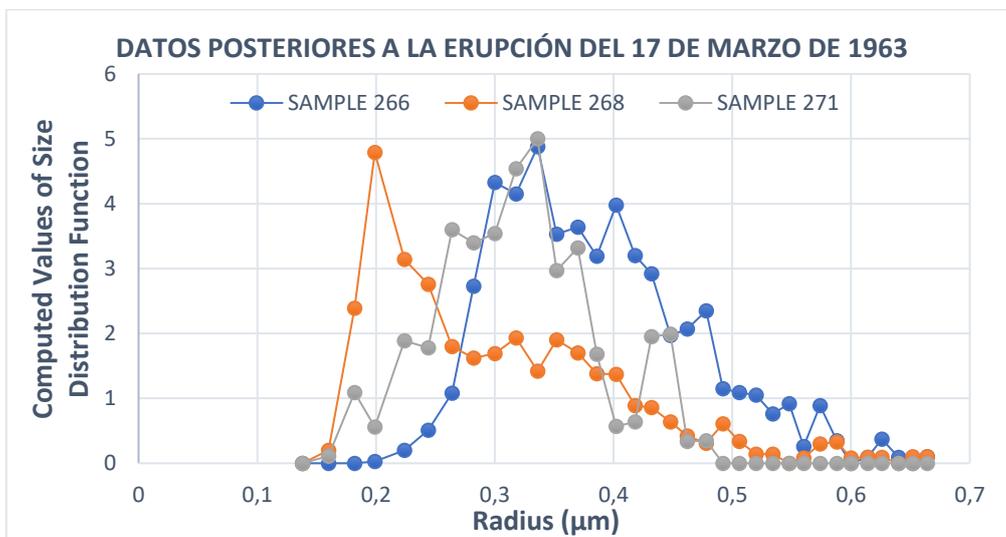
Este aumento también se hace notable si se comparan las gráficas (**Gráfica 5, Gráfica 6 y Gráfica 7**) antes de la erupción y las posteriores, donde se ve que es evidente que tras la erupción las partículas detectadas tenían mayores radios en promedio:



Gráfica 5: Funciones de distribución de tamaños previas a la erupción (1962)



Gráfica 6: Funciones de distribución de tamaños previas a la erupción (1963)



Gráfica 7: Funciones de distribución de tamaños posteriores a la erupción (1963)

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES

La principal conclusión que se puede extraer de los resultados obtenidos es que tras una erupción volcánica la función de distribución del tamaño de las partículas, al igual que los parámetros relacionados con ella, varían. Como se ha visto en el apartado dedicado a la discusión de los resultados, la concentración de aerosoles con un radio superior a los $0,3 \mu m$ fue mayor en las mediciones posteriores a la erupción que en las previas a la misma. El resultado anterior permitió establecer que el transporte de los aerosoles estratosféricos del Agung ($8^{\circ}S$) a los $32^{\circ}N$ se produjo en un intervalo de tiempo del orden de aproximadamente un mes. Se determinó también que el número de rangos de los tamaños de partículas más apropiado para caracterizar la presencia de los aerosoles estratosféricos en el intervalo $0,1$ a $0,7 \mu m$ es de dos.

[Friend et al., 1961]: Friend, J. P., Feely, H.W., Krey, P.W., Spar, J, and Walton. A., The High-Altitude Sampling Program, Vol. 5, U.S. Defense Atomic Support Agency report, DASA 1300, AD267495, 313 pp., 1961, <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0267495.pdf>.

[Feely et al., 1967]: Feely, H. W., Katzman, D., Seitz, H., Davidson, B., and Friend, J.P., Final Report Project STARDUST, Vol. 1, Chapter 1-6, DASA-2166-1, AD0850378, 223 pp., 1967, <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0850378.pdf>

[INSMET]: Estevan, R., Antuña, J. C. y Barja, B., 2010, Propuesta a la Defensa Civil de la República de Cuba de una nueva categoría de desastre natural: Disminución prolongada de la radiación solar que alcanza la superficie terrestre. Reporte CientíficoTécnico, GOAC-INSMET, 14 págs., DOI: 10.13140/RG.2.2.10003.09760

[Instituto Nacional]: Instituto Nacional de Prevención Sísmica-INPRES.

[Spark and Self et al., 2005]: Sparks, S. & Self. S. et al., 2005, Super-eruptions: global effects and future threats. Report of a Geological Society of London Working Group (2nd (print) Edn.).

[McGuire, 2006]: McGuire, W. J., 2006, Global risk from extreme geophysical events: threat identification and assessment, Phil. Trans. R. Soc. A, 364, pp. 1889-1909, doi:10.1098/rsta.2006.1804.

[Chapman, 2004]: Chapman, C. R., 2004, The hazard of the near-Earth asteroid impacts on Earth, Earth and Planetary Sciences, 222, pp. 1-15.

[Sagan, 1985]: Sagan, C., 1985, Nuclear Winter: A report from the World Scientific Community. Environment, 27,pp. 12-39.

[Robock, 1989]: Robock, A., 1989, Policy implications of nuclear winter and ideas for solutions, Ambio, 18, pp. 360 -366.14

[Robock et al.,2006]: Robock, A., L. Oman, G. L. Stenchikov, O. B. Toon, C. Bardeen, and R. P. Turco, 2006, Climatic consequences of regional nuclear conflicts. Atmos. Chem. Phys. Discuss.,6, pp. 11817-11843.

[Marshall et al., 2022]: Lauren R. Marshall, Elena C. Maters, Anja Schmidt, Claudia Timmreck, Alan Robock and Matthew Toohey, Volcanic effects on climate: recent advances and future avenues, 2022

[Stebbins]: Stebbins, A.K. III ed. HASP--SPECIAL REPORT ON HIGH ALTITUDE SAMPLING PROGRAM ,report, June 1, 1960 (<https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc869165/> : accessed March 31, 2024) University of North Texas Libraries, UNT Digital Library, <https://digital.library.unt.edu>; crediting UNT Libraries Government Documents Department.

[Link 1]: https://es.wikipedia.org/wiki/Guerra_Fr%C3%ADa
(Último acceso 31 de Marzo 2024)

[Link 2]: https://es.wikipedia.org/wiki/Atm%C3%B3sfera_terrestre
(Último acceso 16 de Junio 2024)

[Link 3]: https://www.educaplus.org/climatic/01_atm_capas.html
(Último acceso 13 de Junio 2024)

[Link 4]: <https://volcano.si.edu>
(Último acceso 31 de Marzo 2024)

[Link 5]: <https://www.nps.gov>
(Último acceso 13 de Junio 2024)

[Link 6]: https://es.wikipedia.org/wiki/Cintur%C3%B3n_de_fuego_del_Pac%C3%ADfico
(Último acceso 31 de Marzo 2024)

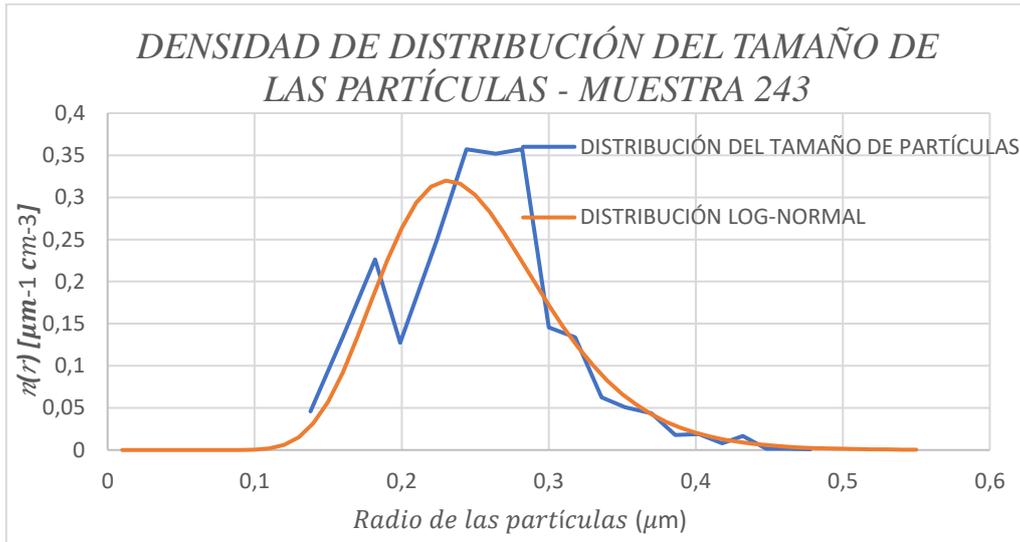
[Link 7]: <https://www.nationalgeographic.com/es/ciencia/mapa-volcanes-mas-activos-mundo>
(Último acceso 13 de Junio 2024)

[Link 8]: <https://geologicalmanblog.wordpress.com>
(Último acceso 13 de Junio 2024)

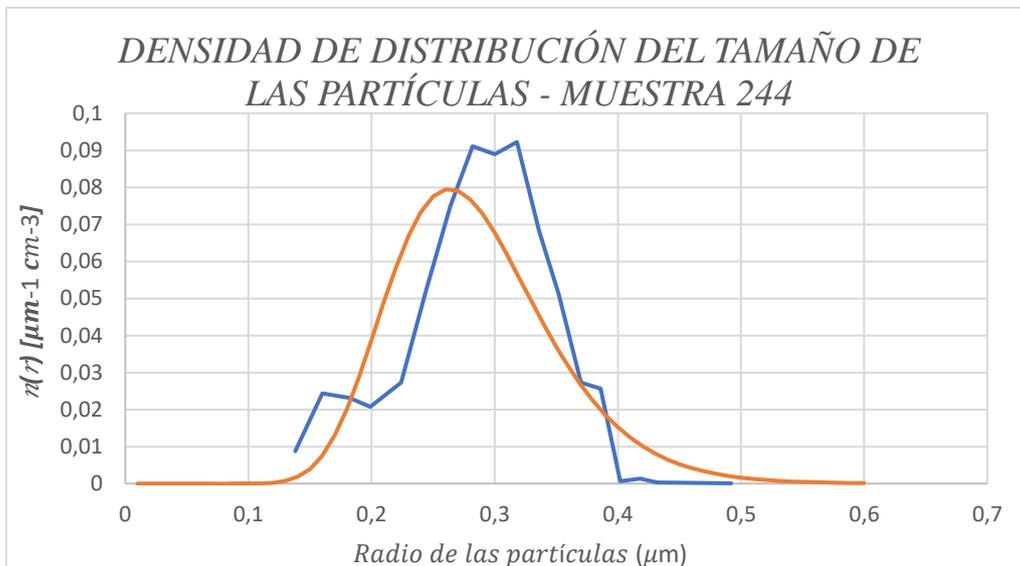
[Link 9]: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Depositos-piroclasticos-y-rocas.html>
(Último acceso 31 de Marzo 2024)

A continuación, se adjuntan las tablas de la distribución del tamaño de partículas para los valores dados (azul) y la correspondiente distribución log-normal (naranja), al igual que se ha hecho con la de la muestra 243 durante el desarrollo:

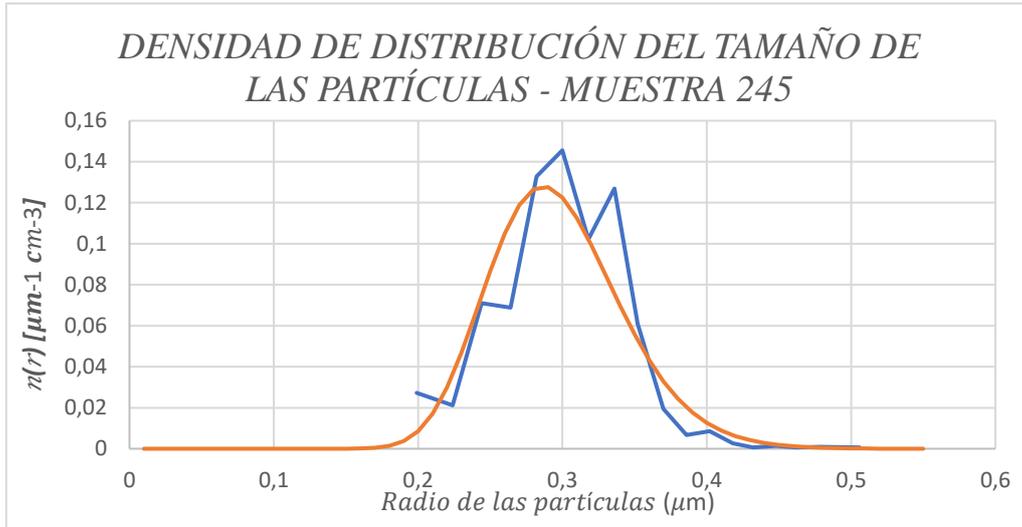
GRÁFICAS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS



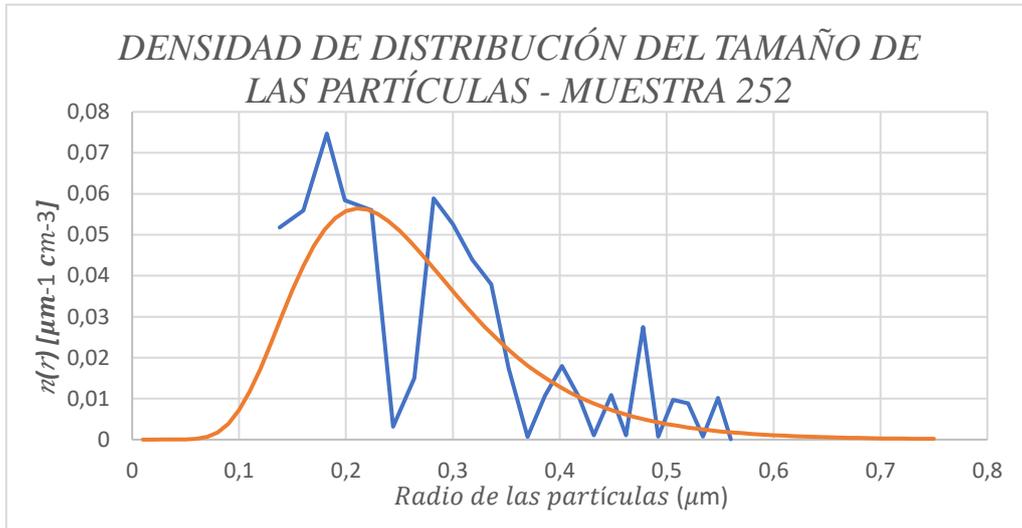
A.1: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 243



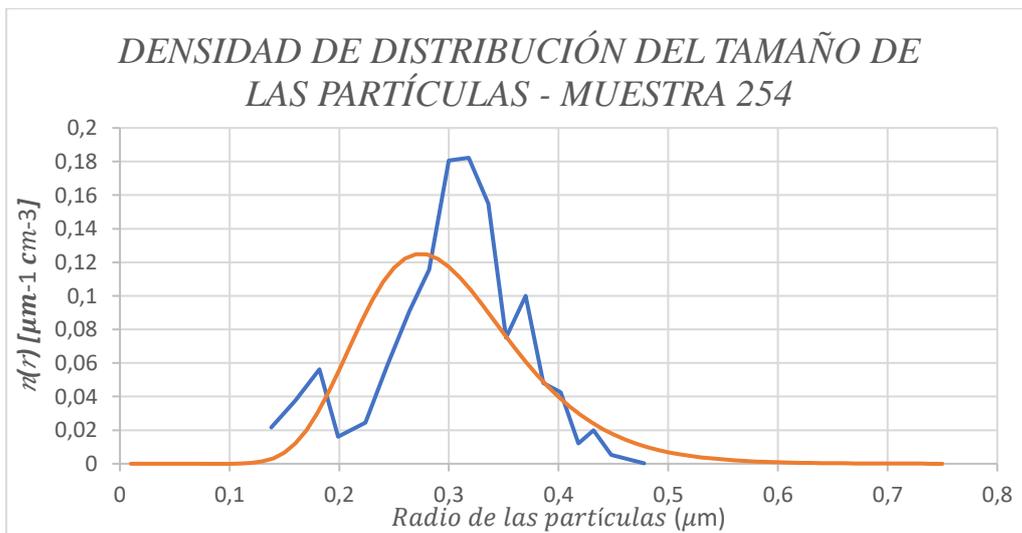
A.2: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 244



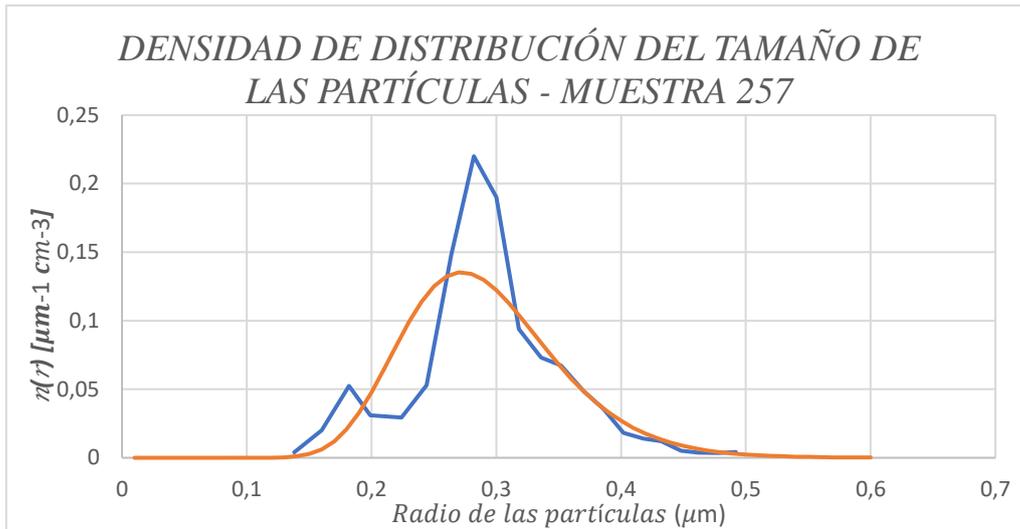
A.3: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 245



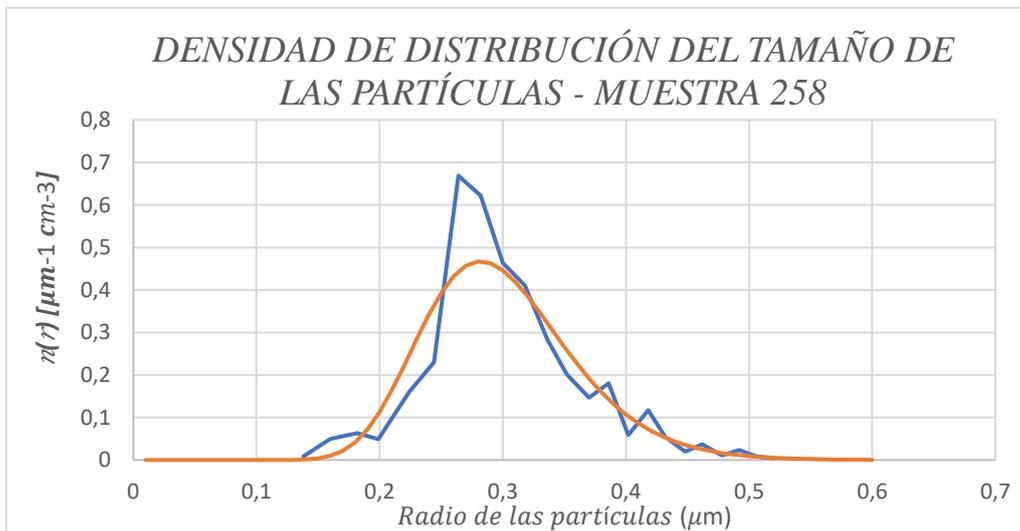
A.4: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 252



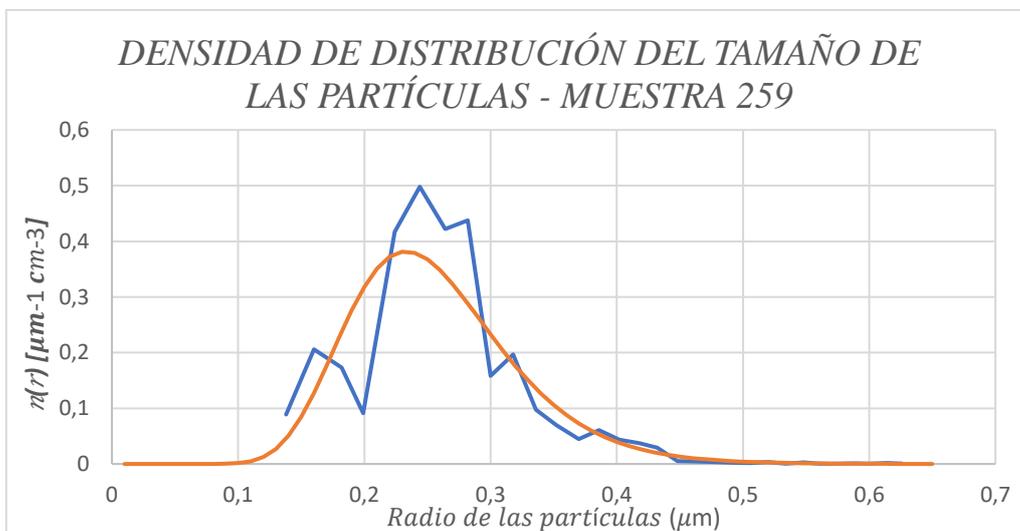
A.5: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 254



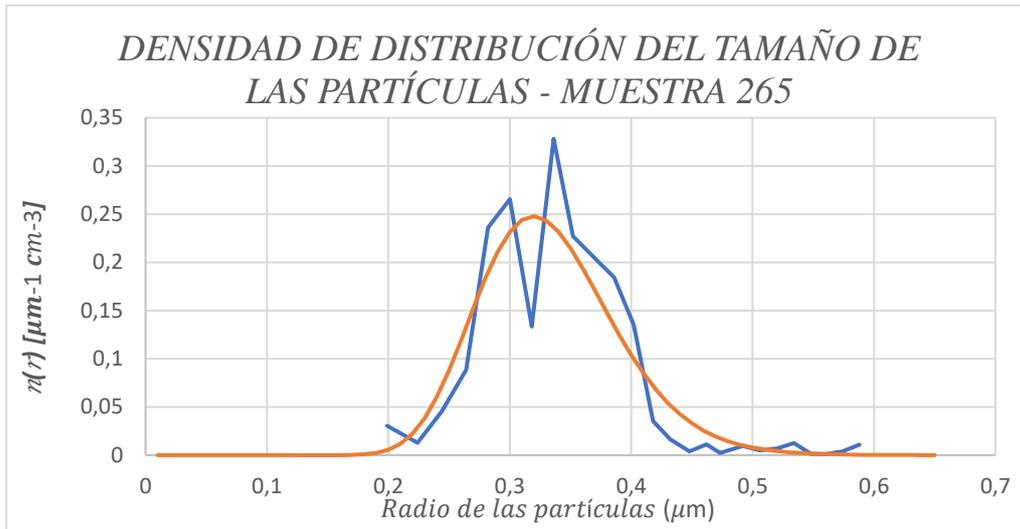
A.6: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 257



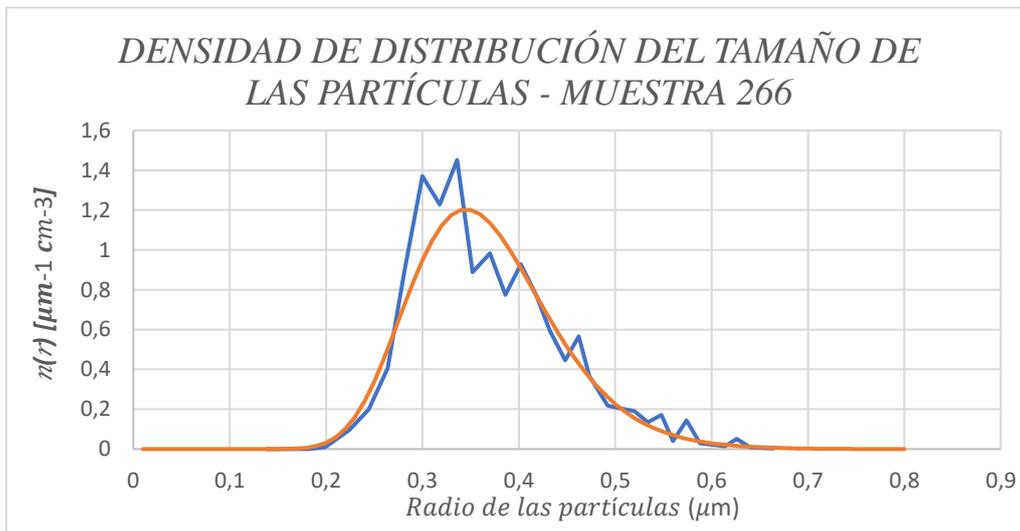
A.7: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 258



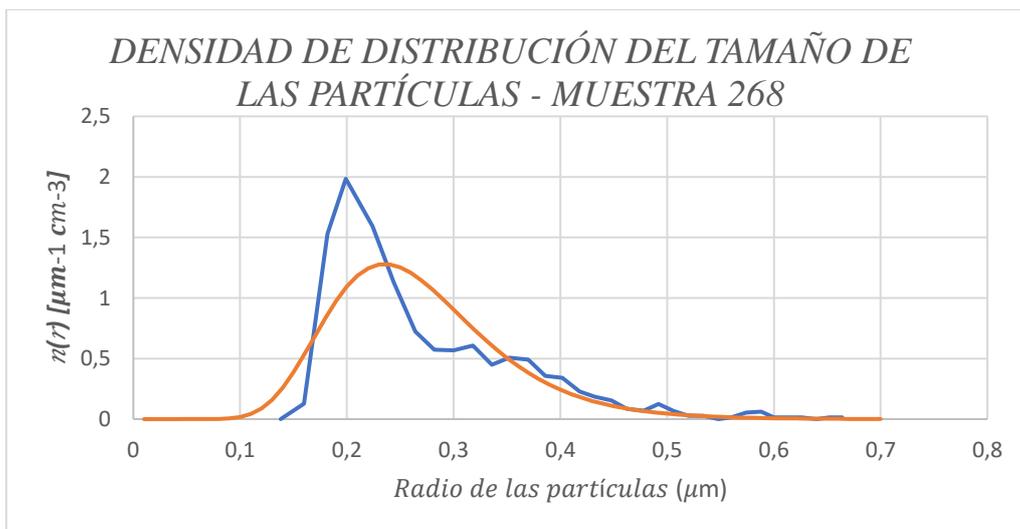
A.8: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 259



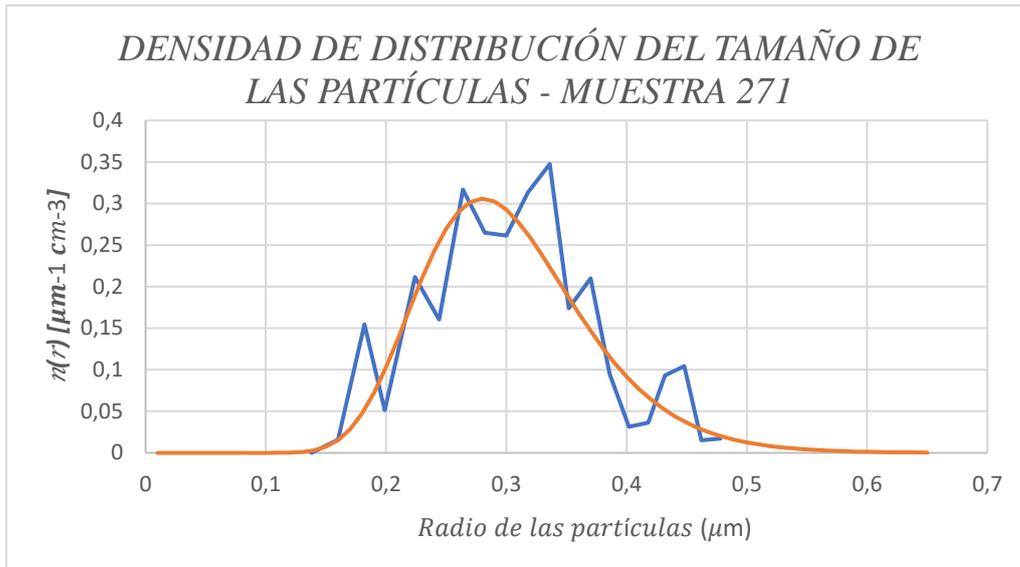
A.9: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 265



A.10: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 266



A.11: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 268



A.12: Comparación de la distribución del tamaño de partículas y la log-normal para la muestra 271