

PATRONES DE VIENTO EN LA REGION DEL VOLCAN POPOCATEPETL Y CIUDAD DE MEXICO

H. Delgado¹, G. Carrasco², P. Cervantes³, R. Cortés³. y R. Molinero³

RESUMEN

Los patrones de viento juegan un papel muy importante en la distribución de los productos piroclásticos de un volcán. La información sobre dirección y velocidad de vientos, desde superficiales hasta más de 20,000 m.s.n.m., obtenida para doce años en el Servicio Meteorológico Nacional, fue ordenada y analizada por capas (vientos bajos y altos), por estratos (ocho) y por niveles (seis niveles seleccionados). Los vientos superficiales (abajo de los 3,000 m) tienen una fuerte tendencia N-S que no rebasa los 5 m/s de velocidad promedio, en algunos meses, los vientos entre 3,000 y 5,800 m muestran las mismas tendencias que los vientos superiores (>5,800 m), mientras que otros meses presentan una distribución dispersa pero transicional entre los vientos superficiales y los vientos superiores con velocidades entre 5 y 10 m/s. Los vientos superiores (hasta 20,000 m) soplan de noviembre a abril del W y WSW; y de junio a septiembre del E (ENE, E y ESE). Los meses de mayo y octubre son de transición. Entre abril y mayo los vientos guardan el mismo patrón W y WSW hasta los 16,500 y de esta altitud hasta los 20,600 m, las direcciones son del E y ENE con velocidades de 10 a 15 m/s. A partir de los 20,600 m los vientos provienen preferentemente del E (80°-100°) de abril a noviembre y de diciembre a marzo, también se observan vientos del W de hasta 20-30 m/s, particularmente entre julio y septiembre.

La información disponible indica que la topografía tiene una gran influencia sobre los vientos a menos de 5,800 m, observándose patrones de viento más definidos arriba de esta cota.

En caso de una erupción estromboliana del Popocatepetl, entre octubre y mayo, las tefras expulsadas se distribuirían hacia el oriente del volcán, mientras que en los meses de junio a septiembre, se distribuirían hacia el occidente. Durante una erupción de tipo vulcaniano o pliniano, los vientos transportarían las cenizas predominantemente hacia el sector occidental del volcán, excepto durante los meses de enero a marzo, en que la distribución de tefras sería hacia el flanco oriental. El Estado de Morelos podría recibir lluvia de cenizas del volcán de acuerdo a patrones de viento bajos (superficiales), mientras que el Estado de Tlaxcala recibiría cenizas finas sólo en caso de una erupción estromboliana durante los meses de octubre a diciembre. La porción meridional de la Ciudad de México tendría lluvias de cenizas durante una erupción de cualquier tamaño, en los meses de junio a septiembre; o de octubre a marzo si se trata de una columna subpliniana a pliniana.

1. INTRODUCCION

El volcán Popocatepetl, ubicado a 40 km al este de la Cd. de México y 40 km al oeste de la Cd. de Puebla (Figura 1), permaneció en estado fumarólico, sin cambios significativos en la tasa de emisión de gases, desde el final del último período eruptivo (1920 ~ 1927) hasta aproximadamente el otoño de 1990, época en que comenzó a observarse un volumen mayor de gases en su fumarola y, alpinistas de la Asociación de Montañismo y Exploración de la U.N.A.M., reportaron la presencia de un nuevo campo de fumarolas en el flanco oriental del volcán, cerca del cráter pero en su parte externa. Esta actividad fumarólica aumentó gradualmente hasta que el 21 de diciembre

¹ Instituto de Geofísica, U.N.A.M., Circuito Exterior, C. U., Coyoacán 04510, México, D. F.

² Instituto de Geofísica, U.N.A.M., Circuito Exterior, C. U., Coyoacán 04510, México, D. F.

³ Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., Circuito Escolar, C. U., Coyoacán 04510, México, D.F.

de 1994, se verificó un evento caracterizado por explosiones consecutivas debidas a la salida violenta de gases magmáticos acompañados de cenizas no juveniles, que provocaron la apertura del viejo conducto en la parte central del cráter y la creación de una nueva boca en la parte oriental del interior del cráter, por donde actualmente emana la mayor parte de los gases volcánicos. Durante este evento, grandes bloques de roca (productos balísticos) que formaban parte del antiguo domo central fueron expulsados y distribuidos en las cercanías del cráter, y una columna de cenizas producto de la erosión y agrandamiento del conducto, se observo elevándose por encima del cráter por espacio de varias semanas. Las cenizas se distribuyeron principalmente en áreas del sector oriental del volcán, en el estado de Puebla, e incluso cayeron en la capital del estado. Durante los meses de marzo y abril de 1995, se ha observado que las emisiones de cenizas han disminuído notablemente tanto en frecuencia como en volumen.

Las primeras preguntas que surgen en la población y entre las autoridades son: ¿las cenizas tenderán siempre a caer en la región oriental, es decir, en el estado de Puebla? ¿existe alguna posibilidad de que las cenizas caigan en la ciudad de México?. Estas y otras preguntas relacionadas, son las que tratamos de contestar con este trabajo, ya que la dispersión de las tefras estará gobernada por los patrones de viento regionales y, la importancia de reconocer tales patrones radica en su utilidad para la planeación de programas de contingencia (evacuación, salud, urbanismo, etc.). Este trabajo entonces, tiene la finalidad de mostrar las variaciones que ocurren a diferentes niveles atmosféricos en la región del volcán Popocatepetl, así como los cambios que se manifiestan durante las diferentes épocas del año y las implicaciones de tales variaciones en la evaluación de los peligros que representa el volcán.

2. IMPORTANCIA DE RECONOCER PATRONES DE VIENTO

Este es un trabajo que describe los patrones de viento en la región circunvecina al volcán Popocatepetl, mostrando fundamentalmente, la dirección y velocidad del viento en la región, con el fin de hacer resaltar las áreas en donde preferentemente se depositarían cenizas del volcán, en caso de presentarse una erupción mayor. Sin embargo, antes de abundar sobre la importancia de reconocer los patrones de viento en el Popocatepetl y adentrarse en la descripción de los mismos, es necesario revisar algunos aspectos relacionados con las erupciones volcánicas, ya que este estudio está dirigido no sólo a vulcanólogos, sino también a las autoridades y al público en general que pueda hacer uso de la información, para lo cual es necesario mencionar las características de las erupciones volcánicas y su relación con el viento

LLuvia de Productos Piroclásticos. La actividad eruptiva de un volcán genera gases y material fragmentado producto de la súbita expansión de los primeros, al ascender hacia la superficie desde zonas más profundas a través de conductos volcánicos (Cas y Wright, 1990; Fischer y Schmincke, 1989) El material fragmentado, conocido también como piroclastos o tefra (fragmentos de roca y lava), es expulsado hacia la atmósfera cayendo nuevamente sobre la superficie de la tierra en forma de productos balísticos o de lluvia de piroclastos.

Los productos piroclásticos pueden variar en tamaño desde cenizas (<2 mm), lapilli (2 a 64 mm), hasta bloques y bombas (> 64 mm) con diámetros de hasta varios metros (Fisher, 1961), con densidades bajas (pómez y escorias que son vesiculares) a muy densas (cristales y fragmentos líticos) y pueden ser material juvenil (originado a partir del magma involucrado en la erupción) o material accidental (rocas preexistentes acarreadas durante la erupción). La ceniza volcánica está compuesta generalmente, de una mezcla de fragmentos agudos y angulares de vidrio volcánico enfriado súbitamente, así como de fragmentos de minerales (típicamente feldespatos, cuarzo y piroxenos), y rocas.

Los productos balísticos son expelidos desde el cráter a gran velocidad (decenas a centenas de metros por segundo) con trayectorias que son afectadas en forma mínima por la columna eruptiva o por el viento debido a su alta densidad (Waitt et al., 1994) Estos productos se distribuyen normalmente en un radio de 5 km del centro de emisión (Blong, 1984).

La mayor parte de los productos piroclásticos son transportados verticalmente en columnas eruptivas consistentes de una zona inferior de empuje por gases (Figura 2), y una zona superior convectiva (Sparks y Wilson, 1976, Wilson, 1980, Carey y Sparks, 1986) El ascenso convectivo de una columna eruptiva es continua, hasta que su densidad se iguala con la de la atmósfera circundante, que es cuando la columna sufre una expansión lateral sin dejar

de ascender debido a la inercia y forma una amplia nube en forma de paraguas (Sparks, 1986), que juega un papel importante en el transporte de piroclastos (Carey y Sparks, 1986). La altura de una columna eruptiva (también denominada pluma eruptiva) y la distribución de la tefra, dependen de la temperatura del material expulsado, de su tasa de emisión y de la dirección y fuerza del viento. A partir de la columna eruptiva, las tefras caen a la superficie de la tierra por acción de la gravedad, llamándosele a esto la lluvia de piroclastos.

Los volcanes activos pueden producir columnas eruptivas o plumas, y nubes de cenizas. Las plumas pasivas consisten de vapor de agua y gases con escasas o sin partículas de roca, que rara vez alcanzan los 6,000 – 7,000 metros de altitud y que generalmente se dispersan a decenas de kilómetros del volcán (Casadevall, 1991). Las columnas eruptivas pueden definirse como violentos pilares de cenizas y gas en forma de coliflor, generados por encima de una boca durante una erupción explosiva, que en decenas de minutos pueden alcanzar altitudes de 10,000 m a 30,000 m. Estas columnas, que rara vez duran más de unas horas, contienen grandes bloques de roca, y grandes concentraciones de cenizas y gases. Las nubes de cenizas consisten de cenizas finas y gases acarreados por los vientos a partir de una columna eruptiva. Las erupciones volcánicas de gran magnitud, producen nubes que entran a la estratósfera y pueden ser acarreadas por las corrientes de chorro por miles de kilómetros. En cuestión de semanas, estas nubes pueden dar la vuelta al mundo, pero depositan la mayor parte de la ceniza en períodos que van de unas cuantas horas hasta varios días.

Peligros Asociados a la Caída de Piroclastos. Los productos balísticos son una amenaza para la seguridad de las personas y animales que se encuentran cerca de una boca eruptiva, debido a la fuerza del impacto de los fragmentos al caer. La lluvia de piroclastos es, sin embargo, el peligro volcánico de mayor alcance, ya que afecta a áreas extensas que se ubican en la dirección hacia donde sopla el viento. Tanto más fuerte sopla el viento y tanto más alta sea la columna, tanto más lejos llegarán los productos piroclásticos, particularmente las cenizas. La lluvia de cenizas puede causar serios daños a la agricultura, a las obras construídas por el hombre, a la aeronavegación y a la salud pública en áreas extensas de hasta 10^3 y 10^4 km² (Tilling, 1993).

Los daños que pueden sufrir la agricultura, la vegetación y los bosques de una región, debido a la caída de piroclastos, pueden perdurar por mucho tiempo dependiendo del volumen de materiales emitidos por el volcán (Rees, 1979; Blong, 1982). Asimismo, la afectación ambiental puede ser tan grande, que puede provocar la impotabilidad del agua en grandes extensiones debido a la infiltración de sustancias ricas en azufre, cloro y flúor a partir de la lixiviación de las cenizas por acción de la lluvia.

El cubrimiento y o sepultamiento de estructuras y edificios puede provocar el colapso de techos de casas y edificios, y destruir líneas de transmisión eléctrica y comunicaciones. La carga que representa una capa de tefras de 10 cm de espesor puede variar entre 40-70 kg/m² (tefras secas) y 100-125 kg/m² (tefras húmedas) (Tilling, 1993). Por esta razón techos de lamina, techos planos o techos no construídos para soportar este tipo de cargas, son propensos a colapsarse durante erupciones volcánicas mayores.

Las erupciones volcánicas explosivas suelen inyectar grandes cantidades de cenizas y gases corrosivos a la tropósfera superior y a la estratósfera baja, que son desafortunadamente, las altitudes de crucero del tráfico aéreo. En los últimos 12 años, más de 60 aeronaves se han visto dañadas por nubes errantes de cenizas que han contaminado rutas aéreas e instalaciones aeroportuarias (Casadevall, 1991). Las plumas pasivas no representan una amenaza significativa para la aviación, mientras que las columnas eruptivas deben ser evitadas.

Las nubes de cenizas poseen la mayor amenaza a la aviación. La mitigación de este tipo de amenazas es muy difícil debido a que estas nubes no pueden ser detectadas por radares convencionales ni visualmente desde un avión, menos aún durante la noche ya que pueden ser oscurecidas por nubes climáticas. Los encuentros de aeronaves con nubes errantes de cenizas han producido incidentes muy serios en los que las turbinas de aviones Boeing 747 principalmente, se han apagado totalmente debido a la fusión de cenizas dentro de las mismas, provocando la caída de las aeronaves. Afortunadamente, en ningún incidente se han tenido pérdidas humanas, ya que en todos los casos se han logrado recuperar las turbinas de nuevo. Sin embargo, el costo de reparaciones a dichas aeronaves ha llegado a alcanzar los 80 millones de dólares americanos (Casadevall, 1991). Este tipo de incidentes se han presentado durante las erupciones del Galunggung (Indonesia) en 1982 (Smith, 1983; Gourgaud et al., 1989), Redoubt (E.U.A.) en 1989-1990 (Casadevall, 1994), Pinatubo (Filipinas) en 1991 (Casadevall et al., en prensa). Además, las operaciones aeroportuarias han sido interrumpidas y numerosos vuelos cancelados durante las erupciones de Mount

St. Helens (E.U.A.) en 1980, Mount Spurr (E.U.A.) en 1992, y el volcán Láscar (Chile) por ejemplo, en las que no sólo las operaciones aeroportuarias locales se vieron alteradas, sino además, otros estados y aún, otros países, se vieron afectados (Casadevall, 1993). El aeropuerto de Kagoshima (Japón) guarda ciertas similitudes con el aeropuerto de la ciudad de Puebla, dada su cercanía al volcán Sakurajima (el volcán más activo del Japón) y donde las medidas de seguridad han impedido que ningún incidente se haya verificado aún durante días de gran actividad del volcán.

Los daños que los productos piroclásticos causan a la salud de la población y de los animales en la región aledaña a un volcán, puede verse afectada por la presencia de gases y partículas suspendidas en el aire. En la región vecina al volcán Sakurajima (Japón), los estudios realizados en la población indican que, más del 50 % de ella muestra síntomas de irritación en los ojos (Koizumi et al., 1988). Estudios experimentales adicionales, relacionados con las cenizas del Sakurajima, demuestran la ocurrencia de neumoconiosis acompañada de bronquitis, enfisema, atelectasis, degeneración de vasos sanguíneos, nódulos de polvo y focos de polvo fibrótico (Shirakawa, 1988). La ceniza volcánica es un irritante de los ojos cuyos efectos son completamente reversibles si se evita la exposición a ellas, según estudios llevados a cabo durante y después de la erupción del Mount St. Helens en 1980 (Buist, 1988). Es además, un irritante del tracto respiratorio superior e inferior que lleva a una hipersecreción de mucosa y a una broncocontracción que posiblemente sean reversibles al evitar la exposición al medio contaminado por cenizas (Bernstein y Buist (1986). Los gases volcánicos por su parte, pueden ser asfixiantes (CO_2 , CO), irritantes (SO_2 , HCl, NO_2) o ambos (H_2S). Las emanaciones de CO_2 son producto frecuente en volcanes, aunque sólo en algunos casos han ocasionado la muerte como en los volcanes Sinila (Indonesia) en 1979 (Le Guern et al., 1982; Allard et al., 1989) y en los lagos de Camerún Monoun en 1984 (Sigurdsson et al., 1987) y Nyos en 1986 (Sigvaldson, 1989; Bastar y Kabila, 1989). Los gases irritantes pueden llegar a causar la muerte por enema pulmonar y son altamente irritantes de los ojos y del tracto respiratorio superior (Bastar et al., 1988). Los accidentes relacionados con emanaciones de gases volcánicos han afectado la vida humana y animal en distancias hasta de 14 km de su fuente (Tazieff, 1989).

Importancia de los patrones de viento. Esta revisión acerca de los procesos volcánicos muestra que los vientos juegan un papel preponderante en la distribución de cenizas y gases de volcanes que, como el Popocatepetl arrojan materiales a la atmósfera de una manera continua. La mitigación de los problemas asociados a las partículas piroclásticas y los gases arrojados por este volcán, puede ser afrontada de manera efectiva conociendo los patrones de viento que afectan la región y con ello se determinan las áreas de mayor vulnerabilidad.

3. PROCEDENCIA DE LOS DATOS Y METODOLOGIA

El presente trabajo está basado en los datos de viento obtenidos en la estación de radio-sondeos localizada en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México para los años 1976 a 1982 y de 1990 a 1994. Esta información fue obtenida a través del Servicio Meteorológico Nacional, proporcionada de la siguiente manera: los sondeos de los primeros años (1976-1982) fueron proporcionados en forma de listado, indicando por una parte los niveles equipotenciales en milibares y por otra parte, la dirección y velocidad del viento; en los sondeos de 1990, 1991 y parte de 1992 (enero-marzo), los datos se encuentran dispuestos en forma codificada (mensaje tipo TEMP) en tanto que el resto de la información (1992-1994) se encuentra de en código ASCII. Para acceder los datos codificados se utilizó un programa de computadora en lenguaje Fortran diseñado por personal del Instituto de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (M.en C. Ismael Pérez García)

Para el análisis estadístico, se llevaron a cabo las siguientes acciones:

a) Parte de la información (1976-1982) se agrupó en "vientos bajos" y "vientos altos", con el fin de poder distinguir las variaciones en dirección de viento debajo y arriba de la cima del volcán Popocatepetl tomando como cota de separación los 550 mb (para vientos bajos) y 500 mb (para vientos altos), es decir aproximadamente a los 5,500 metros sobre el nivel del mar (a partir de este momento m). Se construyeron rosetas (histogramas circulares) mensuales, donde cada barra apunta en la dirección de donde proviene el viento, e indicando los porcentajes de frecuencia para cada dirección de viento (Figura 3 y 4). Aún cuando en meteorología se usan frecuentemente las cotas

en mb, en este trabajo por razones prácticas se anotan las cotas aproximadas en metros sobre el nivel del mar

b) Esta misma información se agrupo en ocho estratos. A saber: vientos en la zona de más de 750 mb (aproximadamente menos de 3,000 m), entre 550 y 750 mb (~ 3,000 a 5,800 m), entre 400 y 550 mb (~ 5,800 a 7,600 m), entre 300 y 400 mb (~ 7.600 a 9.500 m), entre 200 y 300 mb (~ 9,500 a 12,400 m), entre 100 y 200 mb (~ 12,400 a 16 000 m), entre 50 y 100 mb (~ 16.500 a 20 600 m) y menos de 50 mb (aproximadamente más de 20,600 m)(Figuras 5A, 5B, 5C y 5D). Esta agrupación se hizo con el fin de estudiar los diferentes patrones de viento por estrato, mencionando las direcciones preferenciales, así como las velocidades de viento más abundantes en por ciento, dispuestas en orden vertical, para visualizar su distribución vertical. Las velocidades de viento se dan en metros por segundo ($1 \text{ m/s} = 1.92 \text{ nudos}$).

c) La información de 1990-1994 fue ordenada y procesada estadísticamente para obtener los datos de algunos niveles representativos de la atmósfera superior, para determinar las variaciones espacio-temporales que caracterizan el comportamiento del viento en la atmósfera superior de la Cuenca de México. Los resultados se agruparon y graficaron en niveles representativos (500, 250, 100, 50, 30 y 20 milibars, que corresponden aproximadamente a 5,850, 10,900, 16,500, 20,600, 23,700 y 26,300 m) para cada mes del año, representando así la información estadística de los últimos cinco años. Este análisis se inicio a partir de los 500 mb, considerando la altitud del volcán, a fin de evitar la posible influencia de la topografía en el comportamiento de los vientos (Figura 6A, 6B, 6C y 6D)

d) En base a la información de vientos entre México y Veracruz para el año de 1993, se realizó en el Servicio Meteorológico Nacional, un corte transversal de vientos mensual entre ambas ciudades, con el fin de mostrar los patrones de viento entre ellas, a través de las montañas a diferentes niveles

4. COMPORTAMIENTO DE LOS VIENTOS EN LA REGION

La Figura 3 muestra los vientos a altitudes menores a los 5,500 m aproximadamente, de enero a diciembre. Las rosetas de esta figura muestran que los vientos en esta parte son prácticamente aleatorios, aunque existen patrones de vientos incipientes: uno es persistentemente del W ($250^\circ \sim 300^\circ$) de enero a abril y en el otro, de junio hasta diciembre, los vientos provienen predominantemente del NE ($20^\circ \sim 60^\circ$), aunque en noviembre y diciembre vuelven a aparecer los vientos provenientes del SW y W. Entonces, los vientos soplan del W de enero a abril y del NE de junio a octubre. Mayo, noviembre y diciembre son los meses con mayor dispersión de vientos.

Los vientos que soplan arriba de los 5,500 m (Figura 4) muestran una mayor regularidad. De enero a mayo, los vientos provienen del W ($250^\circ \sim 270^\circ$), aunque en mayo también se observan vientos provenientes del oriente ($90^\circ \sim 100^\circ$), pero con menor frecuencia. De junio a octubre los vientos que predominan son del oriente ($80^\circ \sim 100^\circ$), aún cuando se tienen máximos relativos del W y del N. Los vientos en noviembre y diciembre soplan de nuevo del W (250°). Entonces, los vientos altos soplan de noviembre a abril del W y de junio a septiembre del E, los meses de mayo y octubre son de transición.

La Figura 5 (A, B, C y D) muestra en mayor detalle lo que sucede con los vientos en ocho estratos verticales definidos arbitrariamente. Los vientos superficiales (abajo de los 3,000 m) tienen comúnmente, una fuerte tendencia N-S, mientras que los vientos arriba de esta cota muestran en ocasiones las mismas tendencias que los vientos superiores (enero-abril), y en otras, una distribución dispersa pero transicional entre los vientos superficiales y los vientos superiores (junio-diciembre). En general, estas gráficas muestran las mismas tendencias descritas anteriormente para los vientos altos, sin embargo, a partir de los 20,000 m los vientos se comportan de manera diferente ya que los vientos provienen preferentemente del E ($80^\circ\text{-}100^\circ$) de abril a noviembre y aunque esta dirección persiste de diciembre a marzo, los vientos del W también se presentan. El régimen de vientos a esta altitud, suele ser contrario a la dirección de los vientos en niveles inferiores (notoriamente en marzo, abril y noviembre. Figura 5A, 5B y 5D).

Los vientos superficiales generalmente no rebasan los 5 m/s de velocidad promedio, y entre los 3,000 y 5,800 m, los vientos no soplan muy fuertemente, siendo enero el mes en que sopla con mayor fuerza (hasta 10 m/s en promedio, Figura 5A). Los vientos superiores soplan a mayor velocidad, típicamente 10 m/s y hasta 15 m/s a principios del año (noviembre-abril), aunque de mayo a octubre los vientos son menos fuertes (típicamente no más

de 5 m/s) hasta los 16,500 m. Los vientos entre 16,500 m y 20,600 m suelen ser más constantes durante e año (de 5 a 15 m/s) y arriba de los 20,600 m los vientos pueden ser más fuertes, particularmente entre julio y septiembre (Figura 5C).

Los vientos entonces, arriba de los 20,600 m se comportan más estables (provenientes persistentemente del E), aunque de dirección comúnmente opuesta a los vientos inmediatos inferiores, con velocidades que también suelen ser diferentes, típicamente más fuertes

Las Figuras 6A, 6B, 6C y 6D. muestran la información de vientos de niveles seleccionados y no en forma de estratos como las anteriores. En ellas, se puede observar la gran variabilidad que presentan los vientos, tanto en función de la época del año como de acuerdo con los diferentes niveles atmosféricos. A pesar de la complejidad que se observa en los patrones de vientos para la Cuenca de México, algunas orientaciones muestran tendencias bien definidas.

Durante el período enero-abril, se observa un patrón de vientos dominantes del WSW para los niveles troposféricos (hasta 16,500 m) Aunque para los vientos superiores (20,600 y 23,700 m), en enero y febrero. los vientos dominantes se ven acompañados por vientos del W y ocasionalmente de dirección opuesta, esto es evidente especialmente para el nivel de 26,300 m del mes de febrero. En marzo dominan además los vientos del WNW, sin embargo, un cambio radical ocurre en abril para los mismos niveles, por lo cual puede considerarse este mes como de tipo transicional, donde estadísticamente el nivel de 20,600 m muestra una dirección media del SE, en tanto que en los niveles superiores es francamente opuesta con vientos dominantes del ENE.

En mayo, el cambio en la dirección de los vientos ocurre sin transiciones entre los niveles de 16,500 y 20,600 m, pasando a ser WNW, W y WSW en los niveles inferiores (troposféricos), en tanto que en los superiores (estratosféricos) las direcciones preferenciales son E y ENE.

A partir del mes de junio y hasta septiembre se observa un patrón sistemático ENE, E y ESE, que es opuesto al de los meses anteriores y que se aplica para todos los niveles (excepto para el de 10,900 m, en donde se encuentran distribuciones muy erráticas pero con cierta dominancia de los vientos del NW, principalmente en el mes de junio). Cabe resaltar que a diferencia de lo anterior, en julio se puede apreciar una cierta bimodalidad direccional para el nivel de 26,300 m), en donde se presentan direcciones diametralmente opuestas (E-W)

En octubre el nivel de 5,800 m se considera transicional, ya que su comportamiento direccional es muy errático aunque con una componente media del SSE, sin embargo, en los niveles de 10,900 y 16,500 m muestran direcciones preferenciales del WSW y WNW, en tanto que en los niveles superiores ésta es del E, opuesta a las superiores. En noviembre ocurre algo muy similar al mes anterior, con la diferencia de que a los 5,800 m el comportamiento es menos errático, con una dirección media del WSW que es congruente con los niveles inmediatos superiores, en tanto que en los niveles superiores continua el dominio de los vientos del ENE.

En diciembre se observan cambios altitudinales, ya que apesar de que se observan direcciones preferenciales al SW a 5,800 m y WSW para 10,900 y 16,500 m, en los niveles estratosféricos el comportamiento es bipolar con direcciones E-W, aproximadamente.

Los vientos estratosféricos muestran el siguiente comportamiento

a) Nivel de 26,300 m Se tiene una información de sólo algunos meses del año (febrero, abril, mayo, junio, julio y octubre), los cuales indican vientos predominantes del E, pero con ciertos cambios, particularmente en el mes de julio, cuando se presentan algunas direcciones opuestas.

b) Nivel de 23,700 m De enero a marzo dominan los vientos del WSW y W, mientras que de mayo a noviembre del E, siendo transicionales en los meses de abril y diciembre

c) Nivel de 20,600 m. De enero a marzo dominan los vientos del WSW y W, mientras que de mayo a noviembre del E, siendo transicionales en los meses de abril y diciembre.

Los vientos troposféricos muestran el siguiente comportamiento:

d) Nivel de 16,500 m. Desde noviembre hasta mayo se presentan vientos del WSW, cambiando de junio a septiembre por vientos del ENE, con una notoria transición en octubre aunque dominando los vientos del WNW.

e) Nivel de 10,900 m. Vientos del WSW dominan desde diciembre hasta mayo, observando una gran variabilidad desde junio hasta septiembre, con excepción del mes de agosto que muestra una componente dominante del NW y NNW. De octubre a noviembre el viento también varía mucho, pero muestra tendencias más definidas del WSW.

f) Nivel de 5,800 m De enero a abril los vientos dominantes son del WSW, cambiando en mayo en forma

transicional, con una componente media del NW. De junio a septiembre se presentan vientos opuestos con direcciones dominantes que varían desde ENE hasta ESE, aunque en agosto y septiembre dominan claramente los vientos del E. En octubre se presenta un comportamiento variable, mientras que noviembre y diciembre, aunque también variables, muestran cierto dominio de los vientos procedentes del SW.

La Figura 7 muestra un corte transversal de vientos entre México y Veracruz para el año de 1993. Aún cuando esta figura sólo muestra datos de solo un año, esquematiza el comportamiento del viento en la región del Popocatepetl durante todo el año. Es notoria la influencia de las montañas sobre los vientos a menos de 5,800 m y la relativa homogeneidad de los vientos arriba de esta cota. Para este año en particular, se observa un patrón definido de vientos provenientes del W en general, de octubre a mayo para los niveles troposféricos superiores. El cambio de dirección del W al E se da en junio y julio de manera transicional, comenzando a darse en niveles hasta cerca de los 10,000 m, invirtiéndose en agosto de la misma manera a niveles cercanos a los 11,000 m y en septiembre los vientos soplan hacia el W casi en todos los niveles. El cambio de patrón en octubre se da en forma abrupta de vientos del E a vientos del W.

5. PATRONES DE VIENTO Y DISTRIBUCION DE PIROCLASTOS EN LA REGION CIRCUNVECINA AL POPOCATEPETL

La identificación de patrones definidos que caracterizan el comportamiento de los vientos en la atmósfera es de gran importancia para pronosticar las tendencias probables que estos seguirán en el futuro. Asumiendo que tales patrones de vientos no se verán modificados por perturbaciones atmosféricas ajenas, que suelen ocurrir en forma eventual, es posible poder aplicar estos resultados en la evaluación de peligros asociados a una futura erupción del volcán Popocatepetl. Las áreas de posible afectación asociadas con la dispersión de los materiales piroclásticos de caída que serían expulsados en una erupción, de acuerdo con los resultados reportados en este trabajo, deben considerar tanto la época en la ocurra del evento volcánico como el tipo de erupción esperado, ya que de ello dependiera la altura de la columna eruptiva y, por lo tanto, la influencia de los patrones de vientos troposféricos y estratosféricos.

El Popocatepetl ha tenido en el pasado erupciones de todo tipo, desde muy pequeñas (estrombolianas) hasta altamente explosivas (vulcanianas-plinianas) (Delgado et al., 1988; Delgado et al., 1994; Siebe et al., 1995). En la Tabla 1 se muestra una clasificación de eventos volcánicos de acuerdo a su índice de explosividad (VEI) (Newhall y Self, 1982), en donde se pueden notar los rangos en altitud de la columna eruptiva asociada a erupciones de tipo estromboliano (máximo 5 kilómetros arriba del cráter), vulcaniano (hasta 25,000 m.s.n.m.) o pliniano-ultrapliniano (más de 25,000 m.s.n.m.). Conociendo los rangos de actividad eruptiva del volcán Popocatepetl y las altitudes típicas que alcanzan las columnas eruptivas de acuerdo al tipo de erupción (Tabla 1), se puede proceder a hacer una estimación de la posible distribución de tefras en la vecindad del volcán. Cabe señalar que un trabajo más completo sobre modelado de distribución de tefras está en proceso, y en este trabajo se muestran sólo interpretaciones preliminares basadas en la información eólica.

La figura 8 muestra en forma sintética las direcciones preferenciales de los vientos a diferentes elevaciones encima del cráter del Popocatepetl, de acuerdo con la época del año. Si se presentara una erupción de tipo estromboliano, entre octubre y mayo, las áreas de afectación serían preferencialmente las ubicadas en el sector oriental del volcán, mientras que en los meses de junio a septiembre, las áreas afectadas estarían en el sector opuesto. De acuerdo a las velocidades de viento a estas altitudes, la distribución de las tefras podrían alcanzar hasta 100 km respecto a la fuente.

Por otra parte, si se considera una erupción de moderada a alta explosividad, es decir, de tipo vulcaniano a pliniano los vientos dominantes transportarían el material piroclástico correspondiente a la parte alta de la columna eruptiva (región de paraguas, Figura 3) hacia el sector occidental del volcán, excepto durante los meses de enero a marzo, en que se tienen vientos del W y WSW.

El pronóstico que se presenta aquí puede variar significativamente, de acuerdo a cambios en los patrones de viento debido a modificaciones temporales como la presencia de nortes y eventos "El Niño" fuera de temporada, sin embargo, en base al análisis estadístico mencionado en este trabajo, se pueden observar los patrones generales que seguirían las tefras de manera que se puedan ubicar las poblaciones de mayor vulnerabilidad.

6. CONCLUSIONES

Los vientos superficiales (abajo de los 3,000 m) tienen una fuerte tendencia N-S sin rebasar los 5 m/s de velocidad promedio, mientras que los vientos entre 3,000 y 5,800 m muestran de enero a abril las mismas tendencias que los vientos superiores (> 5,800 m), y de junio a diciembre, una distribución dispersa pero transicional entre los vientos superficiales y los vientos superiores (junio-diciembre) con velocidades entre 5 y 10 m/s.

Los vientos superiores (hasta 20,000 m) soplan de noviembre a abril del W y WSW; y de junio a septiembre del E (ENE, E y ESE) excepto en abril a los 10,900 m cuyo comportamiento es sumamente irregular. Los meses de mayo y octubre son de transición. Entre abril y mayo los vientos guardan el mismo patrón W y WSW hasta los 16,500 y de esta altitud hasta los 20,600 m, las direcciones son diametralmente opuestas (E y ENE) Estos vientos soplan a mayor velocidad, típicamente 10 a 15 m/s.

A partir de los 20,600 m los vientos provienen preferentemente del E (80°-100°) de abril a noviembre y aunque esta dirección persiste de diciembre a marzo, también se presentan vientos del W en estos últimos meses, que suelen ser más fuertes (hasta 20-30 m/s), particularmente entre julio y septiembre

La topografía montañosa ejerce una gran influencia sobre los vientos a menos de 5,800 m, observándose una relativa homogeneidad en los patrones de viento arriba de esta cota.

Si se presentara una erupción de tipo estromboliano, entre octubre y mayo, las tefras se distribuirían preferentemente hacia el oriente del volcán (Estado de Puebla), mientras que en los meses de junio a septiembre, se distribuirían hacia el occidente (Estado de México). De acuerdo a las velocidades de viento a estas altitudes, la distribución de las tefras más finas podrían alcanzar hasta 100 km respecto a la fuente.

Por otra parte, si se considera una erupción de moderada a alta explosividad, es decir, de tipo vulcaniano a pliniano los vientos dominantes transportarían el material piroclástico correspondiente a la parte alta de la columna eruptiva hacia el sector occidental del volcán (Estado de México), excepto durante los meses de enero a marzo, en que se tienen vientos del W y WSW y entonces la distribución sería hacia el oriente (Estado de Puebla). El Estado de Morelos podría recibir lluvia de cenizas del volcán de acuerdo a patrones de viento bajos (superficiales), mientras que el Estado de Tlaxcala recibiría cenizas (muy finas) sólo en caso de una erupción estromboliana durante los meses de octubre a diciembre, debido a la dirección y velocidades de viento en esta época a 10,000 m de altitud. La Ciudad de México experimentaría lluvias de cenizas durante una erupción en los meses de junio a septiembre independientemente del tamaño de la erupción o de octubre a marzo si se trata de una columna subpliniana a pliniana.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la valiosa colaboración del personal del Servicio Meteorológico Nacional bajo la dirección del Ing. Guillermo Enrique Ortega Gil, a quien extendemos nuestra gratitud por su decidido apoyo, lo mismo que al Ing. Alfonso Medina. Nuestro agradecimiento al Ing. Victor Ramos, la M. en C. Gloria Herrera, los Sres. Guadalupe Rosales Huerta y los hermanos Jesus y Elías Martínez Osuna. Asimismo, damos las gracias al M. en C. Ismael Pérez García (Centro de Ciencias Atmosféricas, U.N.A.M.), por su apoyo en la descodificación de parte de los archivos. Esther Romero Terán y Luis Enrique Rayón Torres amablemente ayudaron en la labor de digitalizar parte de la información.