

EVALUACIÓN DE EMISIONES DE SO₂ DEL VOLCÁN TUNGURAHUA MEDIANTE EL MODELO ARIMAX DE PRECIPITACIÓN EN EL RÍO AMBATO

Iván-Alfredo Ríos-García¹, Benito-Guillermo Mendoza-Trujillo²

^{1,2}Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH).

Email: irios@unach.edu.ec

Email: bengui64@hotmail.com

R esumen

El alto potencial de riesgo por la presencia de volcanes activos en varias regiones del planeta y sus efectos en la modificación del clima exige investigaciones profundas para determinar, entre otras, la relación entre procesos eruptivos y otros fenómenos naturales como la precipitación a nivel local. El presente documento plantea identificar el impacto de la concentración de SO₂ en los patrones de precipitación a través de una metodología desarrollada en dos fases. En la primera fase, se aplica un análisis exploratorio y pruebas estadísticas robustas que permiten identificar cambios significativos de los montos pluviométricos mensuales relacionados con la concentración de SO₂ durante los principales eventos eruptivos de un volcán. La segunda fase explica la cointegración entre las series de precipitación y concentración de SO₂. A través de un modelo de mínimos cuadrado ordinarios se calcula el valor de la componente exógena Y_v, y mediante un modelo ARIMAX la componente estocástica Y_t. Las componentes estimadas son integradas en el modelo estocástico ARIMAX de precipitación que incorpora los efectos de una erupción volcánica. Este trabajo demuestra técnicamente las modificaciones en los patrones de precipitación en el corto plazo y a nivel de cuenca hidrográfica, por efecto de las emisiones de SO₂ del proceso eruptivo de un volcán.

Palabras claves: SO₂, erupción volcánica, variabilidad precipitación, Tungurahua.

A bstract

The high potential risk due to active volcanos in different regions in the world, and their effects in climate change, guarantee the need for research in different fields. One of them is precisely the relationship between volcanic eruptions and other natural phenomena like the local precipitation level. This document aims to identify the impact of SO₂ concentration on precipitation trends by applying a 2-step methodology. The first step consist of conducting an exploratory analysis along with robust statistical tests which allow for identifying significant changes in the monthly rainfall volumes related to the SO₂ concentration during the main eruptive events of a volcano. The second step, on the other and, explains the co-integration between precipitation series and SO₂ concentration. By using the least square method the exogenous component value, Y_v, can be calculated. Then, using an ARIMAX model the stochastic component, Y_t, is determined, both the exogenous and stochastic components are then integrated into a stochastic precipitation ARIMAX model which includes the effects of a volcanic eruption. This work shows changes in precipitation patterns in the short term, and watershed level, this effect of SO₂ emissions from a volcano eruptive process.

Keywords: SO₂, volcanic eruption, precipitation variability, Tungurahua.

INTRODUCCION

En el Ecuador, existen cuencas y micro-cuencas hidrográficas con alto grado de vulnerabilidad y riesgo debido a la presencia de volcanes con diferentes niveles de actividad eruptiva.

La provincia de Tungurahua presenta un alto grado de vulnerabilidad y riesgo de-

bido a la presencia del volcán del mismo nombre, el más activo del Ecuador continental en este momento. Desde su reactivación en 1999 hasta la presenta fecha se han registrado erupciones con índices de explosividad volcánica que han llegado a valores de hasta tres, VEI= 3; índice que corresponde a erupciones explosivas de tamaño moderado a grande (1). Durante el período de reactivación del volcán en el año 1999 se registraron pérdidas agrícolas que se estiman en diecisiete millones seis cientos

mil dólares y las pérdidas de la industria turística en doce millones de dólares. Además treinta y dos personas perdieron la vida y veinte y cinco mil fueron evacuadas (2). Sin embargo poco o nada se conoce de los impactos que provocó la actividad volcánica en el cambio y la variabilidad climática a nivel local, o sobre los cambios provocados en los regímenes de precipitación en términos de espacio y tiempo a nivel de microcuenca hidrográfica.

La variabilidad climática natural y en particular la modificación de las variables climáticas temperatura y precipitación a nivel de microcuenca hidrográfica en períodos cortos y relacionados a las emisiones de SO_2 de una erupción volcánica, es un tema de investigación que concita un creciente interés en la ingeniería ambiental e hídrica. En el Intergovernmental Panel on Climate Change, se planteó como medida urgente establecer políticas que promuevan la reducción de las emisiones de carbono a través del aumento de la eficiencia energética y el cambio de combustibles fósiles por fuentes renovables de energía, como la eólica, solar, geotérmica y los biocombustibles, posiblemente complementando con el uso a gran escala de la energía nuclear (3).

A falta de progresos visibles en la disminución de las emisiones, los científicos discuten enfoques de emergencia para mitigar el calentamiento planetario. Por esta razón, se desarrollan técnicas que se fundamentan en aplicar los efectos provocados por los aerosoles de SO_2 de las erupciones volcánicas con el objetivo de incrementar los niveles naturales de aerosoles de sulfato de manera artificial causando un aumento en el albedo planetario, reduciendo la entrada de radiación solar y logrando la disminución de la temperatura media.

Precisamente esta investigación, pretende convertirse en un aporte en el debate y análisis científico sobre el impacto de la actividad volcánica en la variación de la precipitación y por tanto en el clima a través de resultados cuantitativos que demuestran técnicamente la presencia de posibles modificaciones en los patrones de temperatura y precipitación, así como los impactos positivos y negativos relacionados a las emisiones de aerosoles de SO_2 de la erupción de un volcán a nivel de microcuenca hidrográfica.

Las conclusiones son el resultado de una exhaustiva investigación en torno al período de actividad volcánica del Tungurahua en Ecuador, que presenta un proceso continuo de emisiones de ceniza y recurrentes erupciones explosivas a partir de 1993, con graves consecuencias económicas y sociales para la población, además con efectos

importantes en el ambiente.

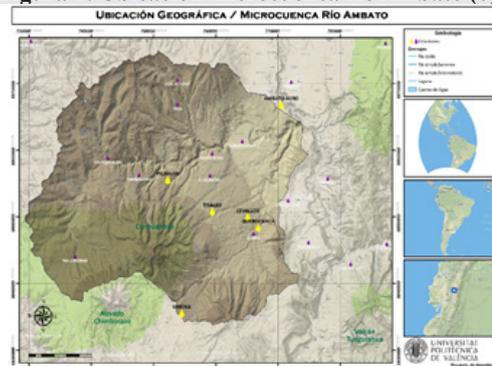
MATERIAL Y MÉTODOS

La investigación se desarrolla en la microcuenca del río Ambato ubicada en la provincia de Tungurahua (Figura 1), con una extensión de 1.370 km². Uno de los problemas más críticos en la microcuenca es la ausencia de un manejo adecuado y sustentable del recurso hídrico que presenta un déficit de agua de 903,35 hm³/año, acentuado durante 7 a 9 meses secos al año (4).

En la microcuenca se ubica el volcán Tungurahua de 5.023 msnm. El actual proceso eruptivo del volcán se inicia en enero de 1993, con una vibración interna del volcán y una explosión freática. A partir del mes de agosto de 1999 se registraron eventos volcano-tectónicos de largo período y de carácter profundo (5). La actividad eruptiva del volcán Tungurahua se caracteriza por la presencia de dos estilos de actividad eruptiva:

- Eventos explosivos en la parte superior del volcán acompañados por la caída de bombas cerca del cráter y de ceniza en las zonas de influencia como los ocurridos entre los años 1999-2014.
- Eventos explosivos mayores con la producción de flujos piroclásticos, acompañados de importantes caídas de ceniza y pómez sobre la región.

Figura 1: Ubicación microcuenca río Ambato (6)



El período de estudio considerado aceptable para analizar la variabilidad en los patrones de precipitación y los eventos atípicos de lluvia es de por lo menos 30

años (7). La presente investigación examina un período de estudio corresponde entre los años 1966 y 2013, con un total de 48 años de registros mensuales obtenidos en cinco estaciones meteorológicas Ambato, Cevallos, Tisaleo, Pilahuin y Urbina. Además se establecen dos sub-períodos hidrológicos, el primero entre 1966 a 1989 sin la presencia del fenómeno eruptivo del volcán Tungurahua y un segundo sub-período, entre los años 1990 a 2013 con presencia permanente de actividad volcánica, lo que permite obtener conclusiones particulares respecto del impacto del fenómeno volcánico.

Identificada la zona de estudio, las estaciones meteorológicas y el período de análisis, se construyen las series temporales de precipitación mensual y las series temporales de concentración de SO_2 . Se determina la concentración de SO_2 en el aire por una erupción volcánica, mediante un modelo determinístico Euleriano (8),(9). El modelo de simulación de tiempo variable aplicado toma datos del período de estudio que es afectado por la erupción volcánica (Ecuación 1).

$$C_{i+1} = C_i + [(t_{i+1} - t_i)] * \left[\frac{W_t}{V} - \left(K_a + \frac{v_v * A_c * F_{dw}}{V} + \frac{v_d * A_c * F_{dw}}{V} + K_{ab} \right) \right]$$

Donde, la variación del período t_i considerado es un mes, en una W_t carga puntual de SO_2 , V volumen constante, A_c Área de la cuenca hidrográfica, y c_i concentración de SO_2 .

El parámetro de decaimiento $[K_a]$, es una reacción de primer orden que se le añade al modelo está relacionado al wash out, para su cálculo tomamos el valor de permanencia media de las partículas de SO_2 en la atmósfera. El parámetro de volatilización $\left[\frac{v_v * A_c * F_{dw}}{V} \right]$ es una reacción de primer orden que se le añade al modelo, es considerado como el proceso de transferencia del SO_2 siendo v_v la velocidad de volatilización y F_{dw} la fracción contaminante disuelto. El parámetro de difusión $\left[\frac{v_d * A_c * F_{dw}}{V} \right]$, se refiere a la velocidad con que el SO_2 se disuelve en la masa de aire dispersando sus moléculas siendo v_d velocidad de difusión y el parámetro de absorción

$[K_{ab}]$, relacionado con la permanencia media del SO_2 y el proceso de rain out.

Se identifica un modelo ARIMAX (Ecuación 2), constituido por dos componentes: El primero un componente exógeno determinista Y_v que representa la perturbación debido a la concentración de SO_2 provocada por los eventos eruptivos del volcán y el segundo, un componente estocástico Y_t que sigue un modelo ARIMAX (10), (11).

$$Z_t = Y_t + Y_v$$

Para el componente exógeno Y_v se aplica la prueba de cointegración de Engle-Granger con el objetivo de establecer la existencia o no, de una cointegración de las series temporales de precipitación y concentración de SO_2 en la microcuenca, y se aplican regresiones mediante modelos de mínimos cuadrados (Ecuación 3).

$$Y_v = a * C_{vSO_2} + b$$

La componente Y_t es el resultado de un proceso estocástico modelo ARIMAX, de orden (p,d,q), con parámetros autorregresivos y de media móvil. Una vez que se han estimado los valores de la componente determinista Y_v y estocástica Y_t , se obtiene los datos de precipitación de un modelo que incorpora los efectos del proceso eruptivo de un volcán, en un microcuenca.

RESULTADOS Y DISCUSION

Se construyen las series de precipitación mensual para los dos sub-períodos de estudio considerando las características específicas de tres zonas de la microcuenca hidrográfica del río Ambato. La zona Nor-Este en donde se ubica la estación Ambato, la zona Centro en donde se encuentran las estaciones Pilahuin, Cevallos y Tisaleo y la zona Sur en donde se ubica la estación Urbina.

Con los datos de carga del SO_2 de las erupciones del volcán Tungurahua que son proporcionados por el Instituto Geofísico del Ecuador, y aplicando la (Ecuación 1), se procede a realizar la estimación de la concentración mensuales de SO_2 para cada una de las cuatro zonas de la microcuenca del río Ambato, entre los años 1999 y 2013 que corresponde al proceso eruptivo explosivo del volcán Tungurahua.

Tabla 1: Parámetros cálculo concentración de SO_2

Zonas microcuenca	Estación	Parámetro			
		Decaimiento K_a (l/mes)	Volatilización K_v (l/mes)	Difusión K_f (l/mes)	Absorción K_a (l/mes)
Nor-este	Ambato	1,4853	0,000117	0,07745	0,3465
	Pilahuin	1,3862	0,000115	0,07745	0,3465
Centro	Cevallos	1,3862	0,000115	0,07745	0,3465
	Tisaleo	1,3862	0,000115	0,07745	0,3465
Sur	Urbina	1,2232	0,000149	0,07745	0,3465

En la Tabla 1, podemos observar un resumen de los pa-

rámetros calculados y que son utilizados en el modelo para determinar la concentración de óxido de azufre SO₂ (Ecuación 1) producto de las erupciones del volcán Tungurahua. El óxido de azufre tiene un tiempo de residencia en la atmósfera de 6 a 11 días (12). El parámetro de dispersión de decaimiento adoptado está en función de la permanencia del óxido de azufre en la atmósfera este parámetro varía entre 1,4853 (1/mes) para el nor-este de la microcuenca y 1,2232 (1/mes) para el sur de la microcuenca. El parámetro de volatilización que considera la velocidad del viento 3,06 m/s en el nor-este, 2,99 m/s en el centro-este, 3,89 m/s en el sur de la microcuenca, y coeficiente de transferencia del SO₂ se encuentra entre valores de 0,000117 (1/mes) para el nor-este de la microcuenca y 0,000149 (1/mes) para el sur de la microcuenca. El parámetro de difusión 0,07745 (1/mes) para toda la microcuenca considerado del análisis granulométrico de la ceniza valores de porosidad entre 47,9 % y 53,6%. El parámetro de absorción de 0,3465 (1/mes) para toda la microcuenca, se considera un tiempo de permanencia de 60 días para partículas menores de 2mm en la atmósfera (12).

Tabla 2: Concentración SO₂ - Valores atípicos de precipitación Microcuenca río Ambato

FECHA	CONCENTRACION SO ₂ (mg/m ³)			PRECIPITACION (mm)		
	NOR-ESTE	CENTRO	SUR	NOR-ESTE	CENTRO	SUR
Septiembre 1999	88,69	92,05	93,43	96,50	107,10	162,40
Diciembre 1999	68,54	69,72	72,09	125,80	135,00	208,50
Mayo 2000	96,16	108,34	112,08	215,60	220,50	349,70
Diciembre 2005	44,28	46,23	41,90	127,20	118,70	148,05
Agosto 2006		41,76			96,30	
Junio 2007		68,58			166,50	
Febrero 2008		52,21			106,80	
Junio 2010		42,06			110,50	
Abril 2011	42,78	47,49		145,60	148,34	
Diciembre 2011		37,79			116,00	
Abril 2012		43,51			144,70	

En la Tabla 2, se resume los valores atípicos de precipitación registrados y las concentraciones de SO₂ durante los principales eventos eruptivos en el nor-este, centro y sur de la microcuenca. A partir de septiembre de 1999 se evidencia una modificación en el comportamiento de la precipitación en la microcuenca que coincide con la reactivación del proceso eruptivo del volcán Tungurahua.

En la microcuenca del río Ambato se identifican cambios en los patrones de precipitación en todos los meses, sin embargo son los meses de septiembre y diciembre los que registran cambios estructurales significativos estadísticamente con un $\alpha=0,10$. Estos cambios se producen en toda la microcuenca del río Ambato para el segundo sub-período de estudio entre los años 1990 – 2013 en este sub-período de estudio existe la presencia del proceso eruptivo del volcán Tungurahua, los cambios significativos en las series de precipitación y los valores atípicos de lluvia Tabla 2 ocurren particularmente entre los años

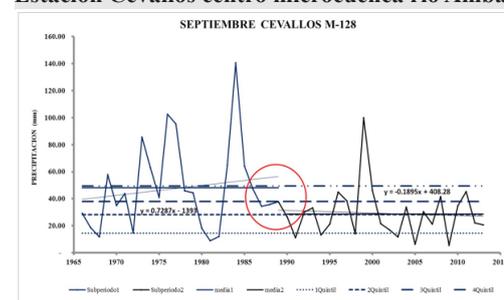
1999-2013 que coincide con los principales eventos eruptivos explosivos del volcán.

Tabla 3: Estadísticos precipitación mes de septiembre

Sector	Estación	Periodo	Tendencia	Media	Mediana
			Test Z	Test W	Test z
Nor-este	Ambato	1966-2013	-1.253	1.997	1.619
		1966-1989	0.740	1.720	-0.087
		1990-2013	-0.347	1.242	1.068
Centro	Cevallos	1966-2013	-1.742	2.605	2.361
		1966-1989	0.670	1.822	0.202
		1990-2013	0.099	3.211*	0.779
	Tisaleo	1966-2013	-1.387	2.090	1.784
		1966-1989	0.967	1.461	0.202
		1990-2013	-0.496	3.529*	1.241
Pilahuin	1966-2013	-1.351	2.310	1.495	
	1966-1989	-0.571	1.338	1.472	
	1990-2013	0.422	2.095	0.375	
Sur	Urbina	1966-2013	-1.555	2.203	1.681
		1966-1989	-0.571	1.643	0.664
		1990-2013	0.273	1.805	0.087

* Significativos

Figura 2: Tendencias precipitación septiembre. Estación Cevallos centro microcuenca río Ambato



En el mes de septiembre los cambios en los patrones de precipitación muestran estadísticos significativos con un nivel de confianza del 90% en media de precipitación en el centro de la microcuenca para el segundo sub-período (Tabla 3).

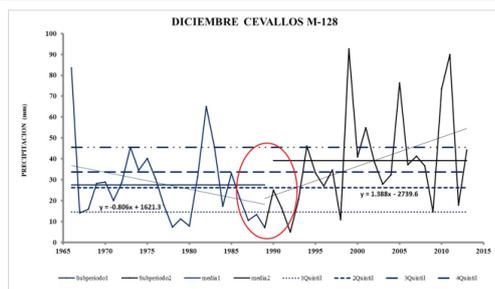
En el segundo sub-período todas las estaciones meteorológicas de la microcuenca detectan decrementos en la precipitación en el mes de septiembre (Figura 2), en el nor-este las tendencias presentan valores que llegan a -0,25 mm/año, en el centro las tendencias marcan reducciones con registros que llegan a -0,45 mm/año. Los valores de precipitación corresponden a etapas secas y se concentran en el primer y segundo cuartil.

Tabla 4: Estadísticos precipitación mes de diciembre

Sector	Estación	Periodo	Tendencia	Media	Mediana
			Test Z	Test W	Test z
Nor-este	Ambato	1966-2013	2.231*	3.234*	-2.175*
		1966-1989	-0.571	2.481	0.491
		1990-2013	1.97*	2.084	-1.81*
Centro	Cevallos	1966-2013	1.96*	3.481*	-2.01*
		1966-1989	-1.215	1.12	1.63
		1990-2013	1.97*	3.26*	-1.18
	Tisaleo	1966-2013	0.356	2.12	-1.186
		1966-1989	-1.439	2.199	0.722
		1990-2013	-0.322	3.279*	0.202
Pilahuin	1966-2013	1.609	3.17*	-2.423*	
	1966-1989	-1.257	2.686	1.45	
	1990-2013	0.967	2.332	-0.26	
Sur	Urbina	1966-2013	1.98*	3.17*	-2.97*
		1966-1989	-1.067	2.269	0.722
		1990-2013	1.96*	3.136*	-2.915*

* Significativos

Figura 3: Tendencias precipitación diciembre. Estación Cevallos centro microcuenca río Ambato



En diciembre las modificaciones en los patrones de precipitación asociadas al SO_2 del proceso eruptivo del volcán Tungurahua, se evidencian en toda la microcuenca, las estaciones seleccionadas registran para el segundo sub-período tendencias positivas significativas con un nivel de confianza del 90% (Tabla 4). En el año 1998 se producen rupturas en las series de precipitación, la media de 1990-2001 que corresponde a la fase explosiva del volcán, es significativamente mayor a la media 2002-2013.

En el centro de la microcuenca las tendencias en diciembre son positivas significativas $\alpha=0,10$ con valor de 1,44 mm/año para el segundo sub-período. En el nor-este el incremento de la precipitación media presenta un valor de 50,19% en el segundo sub-período con respecto al primero, la estación Ambato registra valores atípicos de precipitación de 125,80 mm y 127,20 mm anotados en diciembre de los años 1999 y 2005 respectivamente, que coinciden con la etapa de actividad eruptiva alta, caracterizada principalmente por emisiones de vapor gases y contenidos variables de ceniza volcánica (Figura 3).

En el centro de la microcuenca los incrementos de la precipitación media reflejan un valor de 40,40% en el segundo sub-período con respecto al primero. La estación Pilahuin ubicada en este sector registra, al igual que para el nor-este, valores atípicos de lluvia en diciembre de los años 1999, 2005 y 2011.

Tabla 5: Correlación precipitación y concentración de SO_2 erupción volcán Tungurahua

		PRECIPITACIÓN					
		Ambato	Cevallos	Tisaleo	Pilahuin	Urbina	SO_2
Nor-este	Ambato	1,0000	0,7532	0,6915	0,7978	0,7883	0,6860
	Cevallos		1,0000	0,7067	0,8071	0,6839	0,6728
Centro	Tisaleo			1,0000	0,7603	0,6961	0,6855
	Pilahuin				1,0000	0,7379	0,6805
Sur	Urbina					1,0000	0,6838
	SO_2						1,0000

La correlación entre los valores de la serie de precipitación y la serie de concentración de SO_2 presentan valores significativos con un 95% de confianza (Tabla 5).

Tabla 6: Estadísticos de cointegración de precipitación y concentración de SO_2

Zonas microcuenca	Estadístico t	p valor	Test Durbin Watson
Nor-este	-4,970	1,72e-06	2,13
Centro	-4,885	2,51e-06	2,14
Sur	-4,712	5,33e-06	2,15

Se establece la cointegración de las series temporales de precipitación y las series temporales de concentración de SO_2 , mediante la prueba de Engle-Granger (Tabla 6).

Tabla 7: Ecuaciones Modelos Mínimo Cuadrados Ordinarios

Zonas microcuenca	Ecuación	R^2	Normalidad residuos		Especificación del modelo	
			Jarque-Bera	p-valor	Reset	p-valor
Nor-este	$Y_t = 0.5268 \text{ SO}_2 - 3.1266$	0.740488	0.2256	0.8933	0.0195	0.981
Centro	$Y_t = 0.4849 \text{ SO}_2 - 9.8376$	0.710573	2.2465	0.3252	0.1534	0.858
Sur	$Y_t = 0.4663 \text{ SO}_2 - 6.0881$	0.736664	5.6831	0.0538	0.4082	0.660

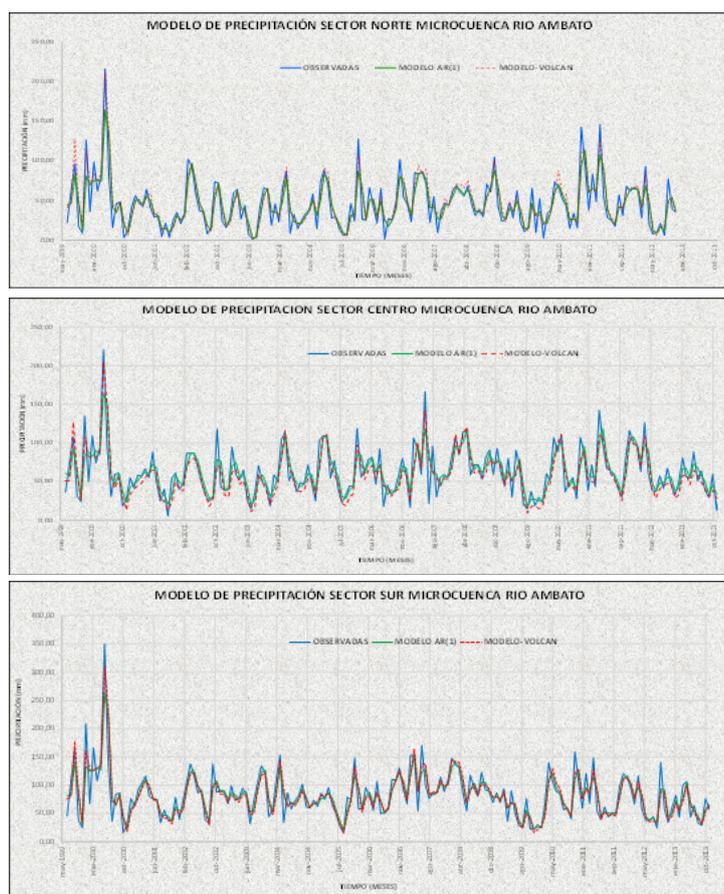
Las ecuaciones estimadas de la componente Y_t (Tabla 7) se obtienen mediante modelos de mínimos cuadrados ordinarios. Los modelos cumplen con las pruebas establecidas, los residuos son consistentes con una distribución normal. Los residuales no muestra heteroscedasticidad y de acuerdo a la prueba de Reset el modelo está bien especificado.

Tabla 8: Estimación modelo ARIMAX (1,1,0) series de precipitación

Zonas microcuenca		Coficiente	Estadístico z	p valor
Nor-este	const	-0,027850	-0,01890	0,6849
	ϕ_1	-0,389079	-7,161	7,99e-013
Centro	const	-0,0261642	-0,01888	0,4849
	ϕ_1	-0,452585	-8,600	7,98e-018
Sur	const	-0,008696	-0,004184	0,6967
	ϕ_1	-0,417098	-7,781	7,91e-015

Para el cálculo de la componente estocástica Y_t , normalizamos la serie de precipitación y obtenemos de un modelo ARIMAX (1,1,0) (Tabla 8) los coeficientes estimados el parámetro ϕ_1 para todas las zonas de la microcuenca.

Figura 4: Modelos de precipitación que incorporan los efectos del SO₂ del proceso eruptivo del volcán Tungurahua en la microcuenca del río Ambato



En la Figura 4 podemos observar tres series de precipitación, en negro las observaciones, en verde un modelo AR(1) y en rojo el modelo con efectos del volcán Tungurahua. En la Tabla 9 encontramos los estadísticos de Nash-Sutcliffe que permiten cuantificar la eficiencia del modelo.

Tabla 9. Estadísticos de Nash-Sutcliffe modelación microcuenca río Ambato

Zonas microcuenca	Estadístico NSE		Ajuste
	MODELO AR(1)	MODELO VOLCÁN	
NOR-ESTE	0,7632	0,8006	Muy Bueno
CENTRO	0,6599	0,7193	Muy Bueno
SUR	0,7031	0,7631	Muy Bueno

En el caso de estudio, para el modelo que incorpora los efectos de una erupción volcánica podemos observar que el coeficiente de Nash-Sutcliffe se encuentra entre 0,7193 en el centro de la microcuenca y 0,8006 para el nor-este de la microcuenca. En todas las zonas de la microcuenca los resultados de ajuste en las series modeladas son muy buenas, por tanto el modelo es validado. Si comparamos los resultados obtenidos del modelo que incorpora

efectos de una erupción volcánica con el modelo AR(1) apreciamos que los coeficientes de Nash-Sutcliffe del modelo propuesto presenta mayor eficiencia. Los resultados del modelo proporcionan datos relevantes para la construcción de políticas y estrategias locales que prevén en el corto plazo la modificación de los patrones de precipitación en la microcuenca del río Ambato ante un posible evento eruptivo del volcán Tungurahua.

CONCLUSIONES Y FUTURAS PERSPECTIVAS

En la microcuenca del río Ambato se producen modificaciones en los patrones de precipitación por efecto del SO₂ del proceso eruptivo del volcán Tungurahua. Estos cambios están relacionados con la concentración de SO₂ y la orientación de la pluma de ceniza.

En el mes de diciembre se registran las mayores modificaciones con incrementos de montos pluviométricos ocurridos para el segundo sub-período con respecto al primer sub-período con valores que llegan a 50,19%, en tanto que en septiembre se registran decrementos importantes con valores de -40,03%.

La mayor parte de SO₂ emanado por el volcán Tungurahua se encuentra en alturas menores a los 7.000 m.s.n.m y concentraciones de hasta 50 ppb en el aire. Entre septiembre de 1999 y mayo de 2000, inicio del proceso eruptivo explosivo, las emisiones de SO₂ llegan a 10.000 m.s.n.m y las concentraciones calculadas fueron de 112 ppb.

Las series de precipitación y las concentraciones de monóxido de sulfato cointegran estableciendo una relación entre las dos variables, cuyos efectos se visualizan en la alteración del balance de radiación solar y en las propiedades microfísicas de las nubes.

Los resultados de la investigación de-

muestran técnicamente las modificaciones en los patrones de precipitación en el corto plazo y a nivel de cuenca hidrográfica, por efecto de las emisiones de SO₂ del proceso eruptivo de un volcán. El modelo ARIMAX planteado en esta investigación incorpora de forma aceptable los efectos del SO₂ del proceso eruptivo del volcán Tungurahua en los patrones de precipitación a nivel de la microcuenca del río Ambato en la provincia de Tungurahua. Pero es necesario ampliar este tipo de estudios en toda la zona de influencia del volcán Tungura-

hua, para mejorar el modelo y el estudio de la variabilidad de la precipitación por erupción del volcán Tungurahua ya que se produce únicamente a nivel local y si las afectaciones son homogéneas en microcuencas de la región o si llegan a afectar a nivel global.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Abel Solera Solera, de la Universidad Politécnica de Valencia por sus valiosos aportes al estudio.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no demuestran conflicto de intereses

R eferencias

1. Troncoso L, Pennec J, Jaya D, Valle A, Mothes P. Depósitos de caída de ceniza producidos durante las erupciones del volcán Tungurahua, 14 de julio y 16 de agosto de 2006. 6tas Jornadas en Ciencias de la Tierra. Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Geología, Quito. 2006. pp. 181-184.
2. Demoraes F, Dercole R. Cartografía de las amenazas de origen natural por cantón en el Ecuador. Oxfam Internacional GB, 8-11. ISBN 9978-42-972-7, Quito, 2003. pp. 19-20.
3. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (Eds). Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, Ny, USA. 2007. pp.103-111.
4. Consejo Provincial de Tungurahua. (2007). Manejo Ecológicamente Compatible de las Cuencas del Tungurahua, Ambato. 2007. pp.110-115.
5. Samaniego, P., Le Pennec, J., Eissen, J., Hall, M., Molina, I., Robin, C., Egred, J. Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua. Corporación Editora Nacional, ISBN: 9978-84-402-3. 2005. pp 63-84.
6. Ríos I, Solera A. Variations in the patterns of precipitation in the watershed of the Ambato River associated with the eruptive process of the Tungurahua volcano in Ecuador. Open Journal of Modern Hydrology, 5, DOI: 10.4236. 2015. pp.121-139.
7. Boshell J, León G. Metodologías para generar y utilizar información meteorológica. Perú, Programa AACC, Serie Manuales, Manual No.4. 2011. pp. 65-77.
8. Sportisse B. A review of current issues in air pollution modeling and simulation. Computational Geosciences, Volume 11, Issue 2. 2007. pp.159-181.
9. Hall M, Robin C, Beate B, Mothes P, Monzier M. Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 91.1999. pp. 1-21.
10. Seinfeld J, Pandis S. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. Wiley, New York. ISBN:978-0-471-72018-8.1998. pp. 1025-1326.
11. Ikewelugo A, Godday U. Modified Wilcoxon Signed-Rank Test, Journal of Statistics.doi.org/10.4236/ojs. 2012. pp.172-176.
12. PNUMA. Perspectivas del Medio Ambiente Mundial GEO4 medio ambiente para el desarrollo. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, ISBN 978-92-807-2838-5 DEW/0964/NA. 2007. pp. 46-58.