

### 1.3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Entre 1989 y 1991, período asociado probablemente a limpieza de conductos volcánicos e inicio de ascenso de magma, gradualmente se obtuvieron valores altos de  $b$ , que pueden explicarse como resultado de alta heterogeneidad en la estructura, la roca tiende a ser débil y heterogénea, ocasionando que tensiones y esfuerzos se concentren en regiones débiles, facilitando el fracturamiento y liberación de esfuerzos en estas zonas, lo que originaría gran actividad sísmica de menor tamaño y valores bajos en las magnitudes sísmicas esperadas.

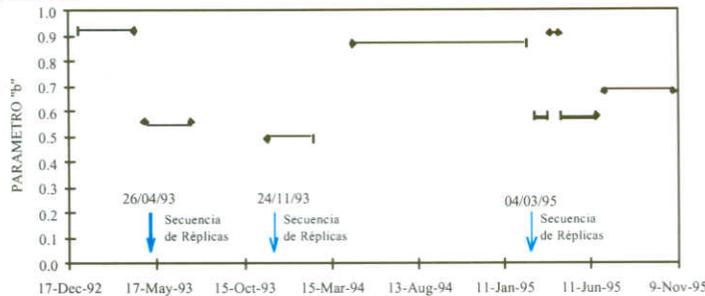


Figura 4. Evolución del parámetro  $b$ , para la sismicidad localizada al N y NE de Galeras, entre 1993 y 1995.

Tabla 3. Resumen de los valores del parámetro  $b$ , obtenidos por dos métodos para las diferentes fuentes sísmogénicas localizadas en la zona de influencia del Volcán Galeras y las magnitudes máximas esperadas.

Fuente Sísmica	Parámetro $b$		Magnitud Máxima Esperada
	Mínimos Cuadrados	Máxima Probabilidad	
CG	0,90	0,95	3,1
NEG	0,75	0,64	4,4
NG	0,70	0,51	5,5
NN	0,60	0,52	3,8
NP	0,70	0,61	4,7
OG	0,97	1,02	2,9
S	0,74	0,60	3,7
SE	0,71	0,62	3,8

De 1992 a 1995 los valores de  $b$  disminuyeron, asociándose con actividad sísmica de mayor tamaño. El estado de esfuerzos en la región fue alto, el medio moderada heterogéneo y distribución de esfuerzos uniforme, con mayor resistencia a las tensiones, haciendo difícil un proceso continuo de relajación de esfuerzos. A partir de 1996, la sismicidad mantuvo ocurrencia baja, asociada a incrementos en el parámetro  $b$ . En el 2000,  $b$  disminuye por la ocurrencia de un episodio sísmico importante en julio. Los resultados de  $b$  para la sismicidad del Norte muestran, en su evolución anual y mensual, valores mínimos durante las secuencias sísmicas, siendo el más bajo, el de noviembre de 1993, e incrementos para períodos intermedios, previos o posteriores a las secuencias sísmicas (Figura 4).

## 2. VALORES DE LA RELACION VP/VS

### 2.1 MARCO TEÓRICO Y METODOLOGICO

Los métodos estándar para localización de sismos, asumen relaciones constantes para las velocidades de propagación de las ondas P y S; sin embargo, existen cambios significativos de esa relación en diferentes regiones, tanto en áreas geotérmicas (Chatterjee et al., 1985 en Jiménez y García-Fenández, 1996), como en regiones de islas volcánicas (Dawson et al., 1989 en Jiménez y García-Fenández, 1996). Variaciones de  $V_p/V_s$  pueden originarse, entre otras razones, por presencia de fluidos en los poros de la roca o por vapores que llenan fracturas de reservorios geotermales (Jiménez y García-Fenández, 1996).

Las relaciones  $V_p/V_s$  pueden obtenerse a partir de sismos individuales, usando el método original propuesto por Wadatti, que parte de un evento que tiene un número adecuado de buenas lecturas para tiempos de arribo de las ondas P y S en diferentes estaciones. El proceso se repite tomando los sismos individuales disponibles. En el otro caso, se puede contar con tiempos de viaje de las ondas para un número importante de eventos sísmicos en varias estaciones, trabajar el Diagrama de Wadatti Modificado y obtener un valor promedio de  $V_p/V_s$  para la región de interés, graficando los tiempos de viaje de las ondas P ( $T_p$ ) y las ondas S ( $T_s$ ) en las diferentes estaciones donde se registraron las señales sísmicas y el cálculo posterior de la curva de ajuste de los datos así como su pendiente (Figura 5).

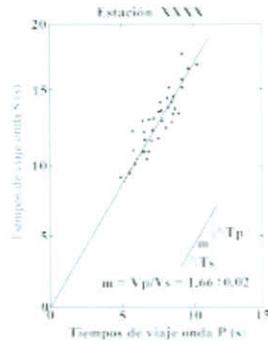


Figura 5. Ejemplo de diagrama de tiempos de viaje para ondas P y S de sismos hipotéticos utilizados en una estación sismológica dada, para la aplicación del Diagrama de Wadatti Modificado y la posterior obtención de la relación  $V_p/V_s$ .

Para determinar la relación  $V_p/V_s$  con el procedimiento de Wadatti Modificado, se parte de la curva de ajuste de los datos, que en este caso es lineal y del hecho que en el origen del sismo se tiene que:  $S = (T_p) \times (V_p) = (T_s) \times (V_s)$ , ya que las ondas P y S se generan simultáneamente en el foco. Donde S representa la distancia recorrida por las ondas desde el foco en un tiempo y a una velocidad dadas, que depende del tipo de onda (P o S).

De la expresión en función de la distancia S se tiene que:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{T_s}{T_p}$$

La pendiente de la recta de ajuste (m) se da por los incrementos en los tiempos de viaje sobre los ejes X y Y (Figura 5) así:

$$m = \frac{(T_{s2} - T_{s1})}{(T_{p2} - T_{p1})} = \frac{\Delta T_s}{\Delta T_p} \equiv \frac{T_s}{T_p}$$

Por otra parte, las relaciones obtenidas de  $V_p/V_s$  para cada estación y con diversas fuentes sismogénicas, se emplearon para calcular parámetros elásticos del medio como: Relación de Poisson, Módulo de Young, Rigidez, Módulo Volumétrico y Constante de Lamé. Se tomaron los valores de densidad ( $\rho$  en  $\text{g/cm}^3$ ) y velocidad de la onda P ( $V_p$  en  $\text{cm/s}$ ) del modelo de corteza establecido para el volcán Galeras (INGEOMINAS, 1996) de acuerdo con la localización de las estaciones y de las fuentes sismogénicas. Los parámetros elásticos mencionados se obtuvieron de acuerdo a las expresiones de Oertel, 1996.

Se calculó la Relación de Poisson ( $\nu$ ) como:

$$\nu = \frac{2 - \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2\right]}$$

También la Rigidez ( $\mu$  en  $\text{dn/cm}^2$ ) como:

$$\mu = V_s^2 \rho \text{ donde: } V_s = V_p / (V_p/V_s) \text{ (en cm/s)}$$

Se calculó el Módulo de Young  $E$  en  $\text{dn/cm}^2$  como:

$$E = \frac{(\rho V_p^2)}{\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2\right]} \left[ \frac{3 \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 4}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \right] \text{ ó } E = (2\mu)(1 + \nu)$$

Se determinó el Módulo Volumétrico ( $K$  en  $\text{dn/cm}^2$ ) como:

$$K = \frac{E(1+\nu)}{[3(1-\nu)(1-2\nu)]} \quad \text{ó} \quad K = \frac{(\rho V_p^2)}{\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - \frac{4}{3}\right]}$$

Se determinó la Constante de Lamé ( $\lambda$  en  $\text{dn/cm}^2$ ) como:

$$\lambda = K - \left(\frac{2\mu}{3}\right) \quad \text{ó} \quad \lambda = \left[\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}\right] - 2\mu$$

Valores típicos de Constantes Elásticas para ciertos tipos de rocas se presentan en la Tabla 4, de acuerdo con Guéguen and Palciasuskas, 1994, que pueden servir como marco de referencia o comparación, con los obtenidos para el Volcán Galeras. Los valores promedio para la Litósfera son de:  $7 \times 10^{11}$   $\text{dn/cm}^2$  para el Módulo de Young, 0.25 para la relación de Poisson y entre  $1.5 \times 10^{11}$  y  $2.4 \times 10^{11}$   $\text{dn/cm}^2$  (Lesne et. al., 1998) para la rigidez.

Tabla 4. Valores típicos de Constantes Elásticas para algunos tipos de rocas Guéguen and Palciasuskas, 1994.

Tipo de roca	Relación de Poisson	Módulo de Young ( $\text{dn/cm}^2$ )	Rigidez ( $\text{dn/cm}^2$ )	Módulo Volumétrico ( $\text{dn/cm}^2$ )
Basaltos	0.19	$6.24 \times 10^{11}$	$2.38 \times 10^{11}$	$3.35 \times 10^{11}$
Granito	0.10	$3.04 \times 10^{11}$	$1.38 \times 10^{11}$	$1.26 \times 10^{11}$
Piedra arenizca	0.10	$3.99 \times 10^{11}$	$1.81 \times 10^{11}$	$1.66 \times 10^{11}$

## 2.2. MANEJO Y ANÁLISIS DE DATOS

Se calcularon los Diagramas de Wadatti Modificados para la sismicidad entre 1989 y 1997, tanto con la información total como para la localizada hacia el Norte, Suroccidente y en inmediaciones del cráter de Galeras (Figura 6).

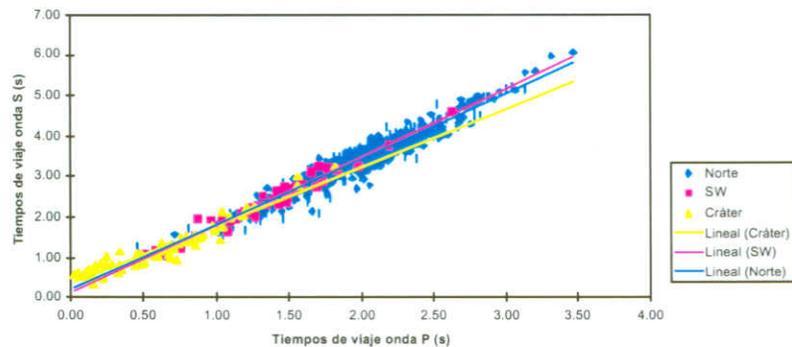


Figura 6. Ejemplo del Diagrama de Wadatti Modificado para la estación sismológica Olga. La relación de tiempos de viaje para las ondas P y S y las líneas de ajuste de los datos para las fuentes sismogénicas consideradas se representan en la figura.

Se obtuvieron valores de  $V_p/V_s$  entre 1,66 y 1,86 con un valor promedio cercano a 1,74. Jiménez y García-Fernández, 1996, encontraron valores de 1,66 en Tenerife que también se han observado en experimentos locales de sismicidad para zonas geotérmicas. El comportamiento de las relaciones  $V_p/V_s$  para las diferentes estaciones sísmicas consideradas y para las distintas zonas sismogénicas trabajadas, sugiere la posibilidad de existencia de anomalías en inmediaciones del cráter activo, hacia el Occidente del mismo y un poco más lejos hacia el sector Nororiente, reflejadas en incremento de las relaciones de  $V_p/V_s$  que podría atribuirse al aumento en la velocidad de las ondas S asociado posiblemente a la presencia de un material más fluido que sólido, particularmente cuando se trabaja con la fuente localizada en inmediaciones del cono activo. La Figura 7 y la Tabla 5 resumen los resultados obtenidos para las diferentes estaciones consideradas, para toda la sismicidad y para las tres regiones sismogénicas analizadas.

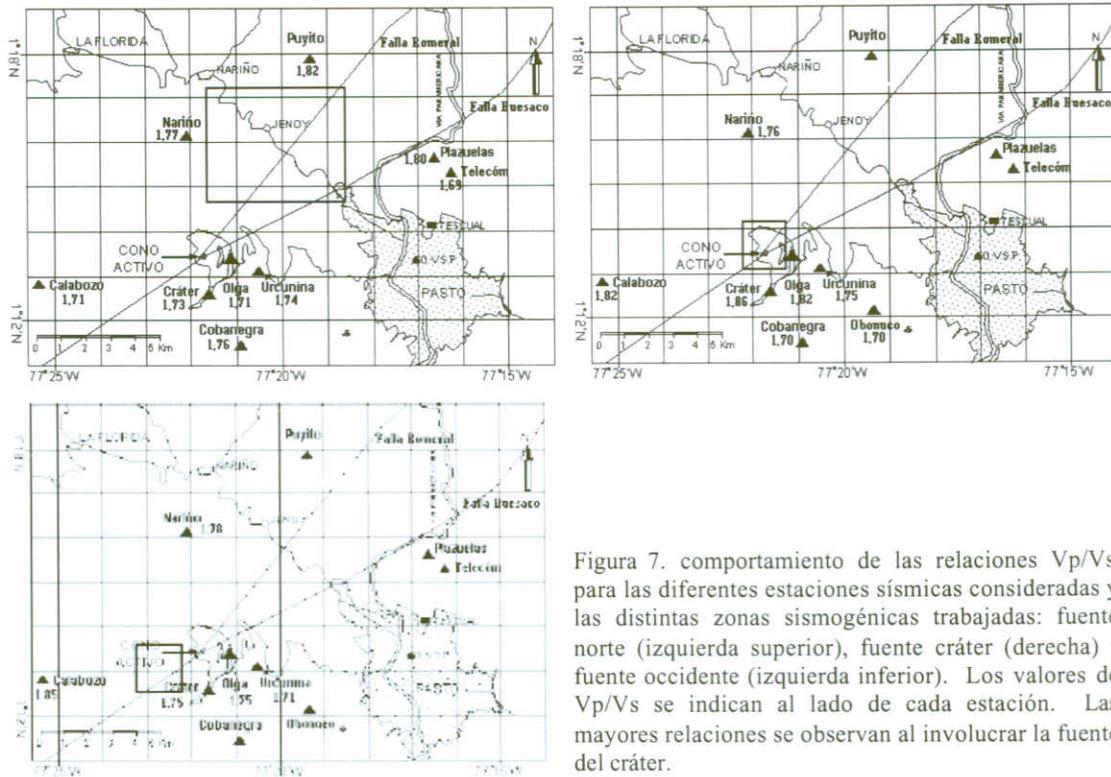


Figura 7. comportamiento de las relaciones  $V_p/V_s$  para las diferentes estaciones sísmicas consideradas y las distintas zonas sismogénicas trabajadas: fuente norte (izquierda superior), fuente cráter (derecha) y fuente occidente (izquierda inferior). Los valores de  $V_p/V_s$  se indican al lado de cada estación. Las mayores relaciones se observan al involucrar la fuente del cráter.

A partir de los datos de  $V_p/V_s$  obtenidos, se relocizó la sismicidad, empleando las siguientes relaciones en el archivo de control del Hypo71pc:  $V_p/V_s = 1.66$  (mínimo encontrado),  $V_p/V_s = 1.74$  (valor promedio encontrado),  $V_p/V_s = 1.78$  (valor asumido para Galeras por defecto) y  $V_p/V_s = 1.86$  (máximo encontrado). A medida que aumenta el valor de la relación, los sismos tienen a localizarse a niveles relativamente más superficiales; los errores, principalmente epicentrales tienden a disminuir y sin ser un aspecto muy claro, se registra reducción en los valores de los errores rms (root square mean). Sin embargo, puede decirse que la tendencia general de las localizaciones al compararlas con el valor de 1.78, no muestra globalmente cambios significativos en la ubicación de las fuentes. Para estudios en detalle, es necesario tener en cuenta que las localizaciones dependen de un modelo apropiado de velocidades y de una conveniente configuración geométrica de la red instrumental.

Tabla 5. Valores de  $V_p/V_s$  y coeficientes de correlación de las curvas de ajuste, para algunas estaciones sísmológicas de la red de Galeras y las fuentes sismogénicas consideradas.

Estación	Distancia al Cráter (Km)	$V_p/V_s$ total	$V_p/V_s$ Fnorte	$V_p/V_s$ Fsw	$V_p/V_s$ Fcráter	Coeficientes correlación			
						total	Fnorte	Fsw	Fcráter
OLGA	0.90	1.719	1.713	1.753	1.819	0.98	0.96	0.98	0.91
CRATER-2	1.60	1.754	1.730	1.749	1.860	0.98	0.93	0.95	0.84
URCUNINA	2.04	1.745	1.737	1.708	1.748	0.99	0.95	0.95	0.91
COBANEGRA	3.97	1.733	1.762	1.720	1.701	0.99	0.85	0.90	0.77
OBONUCO	4.99	1.731			1.702	0.99			0.75
NARIÑO-2	5.30	1.771	1.769	1.777	1.756	0.98	0.93	0.90	0.79
CALABOZO	6.90	1.720	1.713	1.846	1.823	0.96	0.86	0.92	0.50
CONSACA	9.00	1.751	1.745	1.759	1.783	0.99	0.90	0.92	0.41
PUYITO	9.20	1.799	1.820			0.98	0.89		
PLAZUELAS	10.00	1.770	1.797			0.97	0.90		
TELECOM	10.10	1.656	1.689			0.94	0.83		