

COMPARACIÓN CORTICAL BASADA EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS MEDIAS DE LAS CIUDADES DE CUMANÁ Y CUMANACOA, ESTADO SUCRE, VENEZUELA

FRANCISCO BONIVE, LUIS BEAUPERTHUY, AMÉRICO MONTILLA Y JORGE ROJAS

Universidad de Oriente, Vicerrectorado Académico, Centro de Sismología (CSUDO)
fbonive@udo.edu.ve

Recibido: octubre de 2009

Recibido en forma final revisado: julio de 2011

RESUMEN

En este trabajo se evalúan las estructuras corticales derivadas de las propiedades dinámicas de los suelos de las ciudades Cumaná y Cumanacoa, estado Sucre, Venezuela. Se obtuvieron curvas de espectros de frecuencias (H/V) en registros de ruido ambiental. Estas curvas se compararon usando mínimos cuadrados con las que se obtienen aplicando el modelo propuesto por la técnica especializada de dos capas, para las microtrepidaciones del suelo. La ecuación usada fue una expresión corregida de multireflección de ondas S en capas paralelas, que depende de los parámetros del modelo de corteza somera (espesor del sedimento, velocidades de onda S en el sedimento y basamento, relación entre las densidades del sustrato y basamento, frecuencia, ruido de fondo y extinción para altas frecuencias). Las familias de curvas vinculables con los distintos modelos someros de corteza, se obtuvieron mediante aproximaciones aleatorias con algoritmos genéticos denominados fenotípicos. Las soluciones tienen dos rangos de profundidad posibles, una superficial y la otra profunda, y esto parece depender del rango de frecuencias en el cual se hallan los picos de resonancia. Basados en los resultados, se puede concluir que el espesor sedimentario es significativamente menor en Cumanacoa que en Cumaná. Aspecto que se puede apreciar tanto en el promedio de ambos regímenes, como en la cantidad de soluciones someras en función de las profundas: 95% a 35% en Cumanacoa y 86% a 82% en Cumaná. Por otro lado, la extinción y el ruido de fondo son menores en Cumanacoa que en Cumaná. Son prácticamente iguales en ambas ciudades las velocidades de S, tanto en el sedimento como en el basamento, así como también la relación de las densidades.

Palabras clave: Efecto de sitio, Microtremores, Microzonificación sísmica, Algoritmos Genéticos fenotípicos.

A COMPARISON OF THE CORTICAL STRUCTURE USING DYNAMIC MEAN PROPERTIES OF CUMANÁ AND CUMANACOA CITIES, SUCRE STATE, VENEZUELA

ABSTRACT

In this work we evaluate the cortical structure derived of dynamical properties of the cities Cumaná and Cumanacoa, Sucre state, Venezuela. With this goal, spectral curves of frequency (H/V) were obtained using the JSESAME (ECU. 2000) program in the plots of environmental noise. We tried to fit with method of least squares, these curves to those obtained by applying the Nakamura model for ground microtremors, and the used equation was a corrected expression for S wave multireflection in parallel layers, which depends on the shallow crust model parameters (silt thickness, silt and basement S wave velocities, substrate and basement densities quotient, frequency, background noise, and high frequencies extinction). The families of curves linked to the different shallow crust models were obtained by a random approach, the phenotypic genetic algorithms. The solutions have two possible ranks of depth, a shallow one and a deep one, and this fact looks to depend on the frequency rank where the resonance picks appear. According to the results, we can state that the substrate thickness is significantly smaller at Cumanacoa than at Cumaná, which can be appreciated in both regimes average as the quantity of shallow solutions confronted with the deep ones: 95% to 35% in Cumanacoa and 86% to 82% in Cumaná. On the other hand, the extinction and the background noise are smaller at Cumanacoa than at Cumaná. The S velocities at the silt and at the basement, as well as the quotient between the respective densities are practically the same in both cities.

Keywords: Site Effect, microtremor, Nakamura's Method, Seismic microzonation, Phenotypic Genetic Algorithms.

INTRODUCCIÓN

El efecto de sitio es una característica dinámica representativa de los suelos sedimentarios blandos y profundos (Field *et al.* 1995), mediante la cual se origina una resonancia que tiende a aumentar las señales sísmicas de períodos determinados según el tipo de suelo (Lachet *et al.* 1996); pero la señal amplificada puede originarse de cualquier fuente, no sólo las sísmicas (Bonilla *et al.* 1997), lo cual sirve de base a los procedimientos de caracterización del suelo en las centros poblados y poblaciones para la obtención de sus propiedades dinámicas (espesor de sedimento, velocidades de onda S, densidad, entre otras) usando mediciones de ruido ambiental.

Para conseguir la explicación de este fenómeno se requiere no perder de vista el comportamiento de las ondas sísmicas en las cercanías de la superficie en un sitio determinado. El viaje de las ondas sísmicas refractadas por la corteza profunda va desde las rocas consolidadas, a kilómetros de profundidad, a la poca cohesión y consistencia de la corteza somera o suelo sedimentario. En los últimos cientos de metros de la trayectoria de una señal sísmica, es donde se producen los mayores cambios en la señal, allí las variaciones importantes de rigidez y densidad, entre otros parámetros, producen una caída abrupta de la velocidad de fase en el estrato sedimentario, a costa de un aumento importante de la amplitud de las ondas, las cuales pueden hacer resonar la estructura cortical (Udwadia & Trifunac, 1973; Espinoza, 1999).

Es así como las condiciones de la estructura cortical somera que definen el suelo limitan al final el así llamado efecto de sitio, y a la par que aquellas, el mencionado efecto puede cambiar abruptamente con la posición, haciendo que sea característico de porciones pequeñas de terrenos. En pocas palabras, dos efectos de sitios, registrados en zonas vecinas, pueden ser muy diferentes entre sí con un evento sísmico específico, mientras que diferentes eventos sísmicos producen, normalmente, el mismo efecto en un sitio dado.

Consecuencia de esto ha sido el estudio del efecto de sitio, el cual en un principio requería las técnicas convencionales, SPT y refracción sísmica, y en la actualidad se basa en técnicas relacionadas con aspectos más vinculados con fenómenos de resonancias, los cuales al final se relacionan con las curvas de respuestas, con las frecuencias o los períodos predominantes y fundamentales.

Estas técnicas geofísicas tradicionales no fueron diseñadas para obtener el efecto de sitio directamente, sino para determinar características geotécnicas y geofísicas como son las velocidades de fases, tanto de P (onda primaria o de pre-

sión) como de S (onda secundaria o de cizalla), espesores sedimentarios y algunos parámetros como la rigidez y la densidad, entre otros. El efecto es calculado a partir de estos parámetros. Así se obtiene un modelo estratigráfico, y a partir de allí una curva de respuesta del suelo y, por lo tanto, el efecto de sitio.

Las técnicas nuevas y modernas determinan directamente el efecto de sitio a partir de dos interpretaciones físicas del fenómeno, que en la actualidad no son excluyentes, sino complementarias. La primera de ellas está basada en la multireflección de onda S entre la superficie y el basamento (Nakamura, 1989) y la segunda, se fundamenta en patrones de dispersión de onda Rayleigh en medios estratificados (Arai & Tokimatsu, 2004). La tesis de Nakamura ha sido puesta en duda por varios investigadores, como Finn (1991), Kudo (1995), quienes consideran que las hipótesis sobre la posibilidad de la simplificación de las contribuciones de las ondas Rayleigh (ondas superficiales) son débiles así que la curva H/V no sería, necesariamente, la curva de respuesta del suelo.

Los experimentos teóricos de Lachet & Bard (1994) sugirieron que las frecuencias del pico halladas en H/V a partir de microtemores simulados en varias condiciones geológicas, correspondían tanto a las de ondas S incidentes como a las de ondas Rayleigh.

El uso de los microtemores empieza a tener una metodología aplicable y práctica con el trabajo de Nakamura (1989), el autor demuestra que la componente vertical (V) en la superficie se puede utilizar como reemplazo de la señal horizontal (H) del basamento rocoso.

Las ecuaciones involucradas en la evaluación de los parámetros que caracterizan el efecto de sitio, son en general ecuaciones no lineales. La técnica tradicional ha sido la del ajuste iterativo por inversión de matrices que relacionan los parámetros buscados con la data, pero estas técnicas introducen serios problemas de convergencia o de falsos “atractores locales”.

Recientemente una herramienta numérica, que ha evolucionado para enfrentar el reto de manejar ecuaciones no lineales (Cadena, 2006) son los algoritmos genéticos (AG) y han demostrado tener una buena tasa de convergencia a soluciones estables, probables y verosímiles. En algunos casos la convergencia es muy rápida, lo que suele denominarse convergencia prematura, en la cual el algoritmo converge hacia óptimos locales. Los AGF puede evitar este exceso de aptitud, codificando una relación entre el genotipo y su expresión fenotípica.

DATA Y MÉTODOS

Para este estudio se utilizaron registros de ruido ambiental de tres componentes de 30 minutos de duración y una tasa de muestreo de 100 Hz, usándose 24 y 59 registros para la población de Cumanacoa y la ciudad de Cumaná (figura 1), respectivamente. El método para la obtención de las propiedades dinámicas se basó en aproximaciones aleatorias con el uso de algoritmos genéticos, para obtener curvas de respuestas vinculables a modelos someros de cortezas. Estas se aproximaron a los resultados de curvas de espectros de frecuencias (conocidos como H/V) obtenidas con el uso del programa JSESAME (ECU, 2000) en datos de registros de ruido ambiental recogido en ambas localidades. A pesar de que existe una evolución del JSESAME llamada GEOPSY (GEOPSY, 2011a), programa extenso y complejo que realiza una multitud de análisis, entre ellos el cálculo de la curva H/V realizada por el JSESAME, se decidió proseguir con su uso porque los programas que permiten el empleo de los AGF están diseñados para leer las curvas a partir de los resultados de JSESAME. El uso de cualquiera de los programas no afecta los resultados porque los desarrolladores del GEOPSY sostienen que el tratamiento que realiza el programa sobre el cálculo de H/V es idéntico al JSESAME (GEOPSY, 2011b). El modelaje se basó en el esquema propuesto por Nakamura (1989), para explicar las microtrepidaciones del suelo (Lermo & Chávez-García, 1994). Para realizar esto se usó un procedimiento alternativo basado en los algoritmos genéticos llamado Algoritmos Genéticos Fenotípicos (Bonive, 2009), orientado hacia la consecución con precisión de los modelos corticales someros basados en medidas de ruido ambiental.



Figura 1. En la parte superior, ubicación de las poblaciones de Cumaná y Cumanacoa en relación con el territorio venezolano. En la parte inferior, la posición de los sitios donde los registros de ruido en cada localidad.

En principio se tenía pautado usar la expresión básica para la multireflección de onda S basado en una ecuación derivada en el estudio de estructura canónicas

$$|H/V(\omega)| = \left[\frac{2}{\sqrt{\cos^2(\omega h / \beta_1) + (\beta_1 \rho_1 / \beta_2 \rho_2)^2 \sin^2(\omega h / \beta_1)}} \right] \dots (1)$$

y la ecuación usada fue la expresión corregida de multireflección de capas paralelas para la onda S (Bonive, 2009):

$$|H/V(\omega)| = \left[\frac{2}{\sqrt{\cos^2(\omega h / \beta_1) + (\beta_1 \rho_1 / \beta_2 \rho_2)^2 \sin^2(\omega h / \beta_1)}} \right] * e^{-\text{ext1} * \omega} + \text{RF} (2)$$

Donde: $h(m)$ es el espesor del sedimento, β_1 y β_2 (m/s) son las velocidades de onda S en el sedimento y basamento respectivamente, ρ_1/ρ_2 (gr/cm³) es la relación entre las densidades del sustrato y basamento, ω la frecuencia angular, y finalmente la extinción (ext1) y el ruido de fondo (RF), son variables que parecen estar relacionadas con la rigidez del material y el ruido ambiental respectivamente.

Este trabajo tuvo como finalidad estimar las propiedades dinámicas promedio de los suelos de dos ciudades del estado Sucre: Cumaná y Cumanacoa. Estas ciudades se encuentran en la región de influencia de la zona de fallas de El Pilar, activas sísmicamente (CSUDO, 1995-2008).

En la figura 1 se puede observar un ejemplo de ajuste representativo para Cumaná y Cumanacoa, cercano a las medidas promedio y el modelo de corteza vinculable a estas medidas. En la tabla 1 se han colocado las medidas promedio, con sus respectivos errores absolutos, derivados de los cálculos. Se ha demostrado (Bonive, 2009) que las soluciones tienen dos rangos posibles de profundidad, una superficial y otra profunda, y esto parece depender del rango de frecuencias donde se hallan los picos de resonancia (figura 3). Se usó este criterio en el tratamiento de los resultados. La primera serie de gráficos son las soluciones aproximadas, la curva de color negro es la solución promedio y la roja es la curva H/V obtenida en el JSESAME; y la segunda columna de gráficos muestra la relación entre β_1 y h , donde se aprecian los dos regímenes, el somero y el profundo. Hay que señalar los umbrales admisibles de las soluciones someras y profundas son calculados directamente en los ALG sobre la posible existencia de un grupo de soluciones probables.

RESULTADOS

Los resultados son presentados en la figura 2 y en la tabla 1, y muestran estructuras corticales con diferencias y similitudes específicas. En primer lugar la proporción entre el grupo de soluciones someras y profundas son diferentes en ambas ciudades y se nota claramente que el número de las soluciones someras en la población de Cumanacoa es sobradamente superior a las soluciones profundas: 95% a 35% en Cumanacoa y 86% a 82% en Cumaná respectivamente. Esto significa que es más probable, en proporción de 3 a 1, conseguir soluciones someras en Cumanacoa que en Cumaná, lo que demuestra decisivamente el poco espesor calculado para las estructuras corticales del suelo en esta población. Además los valores promedio de los espesores (tabla 1), tanto en los regímenes someros como profundos, son también menores en la población de Cumanacoa.

Las velocidades de S, tanto en el sedimento como en el basamento, así como la relación de las densidades son prácti-

camente iguales en ambas ciudades. Que una ciudad costera tenga las características corticales parecidas a las de una población ubicada a 230 m de altura, podría ser difícil de explicar si no se tuvieran las siguientes consideraciones. La primera es que son valores promedios tomados en zonas con extensiones superiores a los 10 kilómetros cuadrados así que los valores están dentro del dominio de la geología de la región, la cual es común a ambas zonas por estar asociada al mismo sistema montañoso y a la misma historia geológica. La segunda es que ambas localidades están asociadas a la misma cuenca hidrográfica y son atravesadas por el mismo río, El Manzanares, así que los depósitos sedimentarios han sido acarreados del mismo sitio.

En consecuencia, las estructuras corticales que hacen posible la resonancia en los microtemores, al ser representada por modelos de una capa (figura 2), evidencian que Cumaná y Cumanacoa tiene una estructura cortical parecida que se diferencia fundamentalmente en el espesor sedimentario, siendo las demás constantes en promedio, como rigidez y

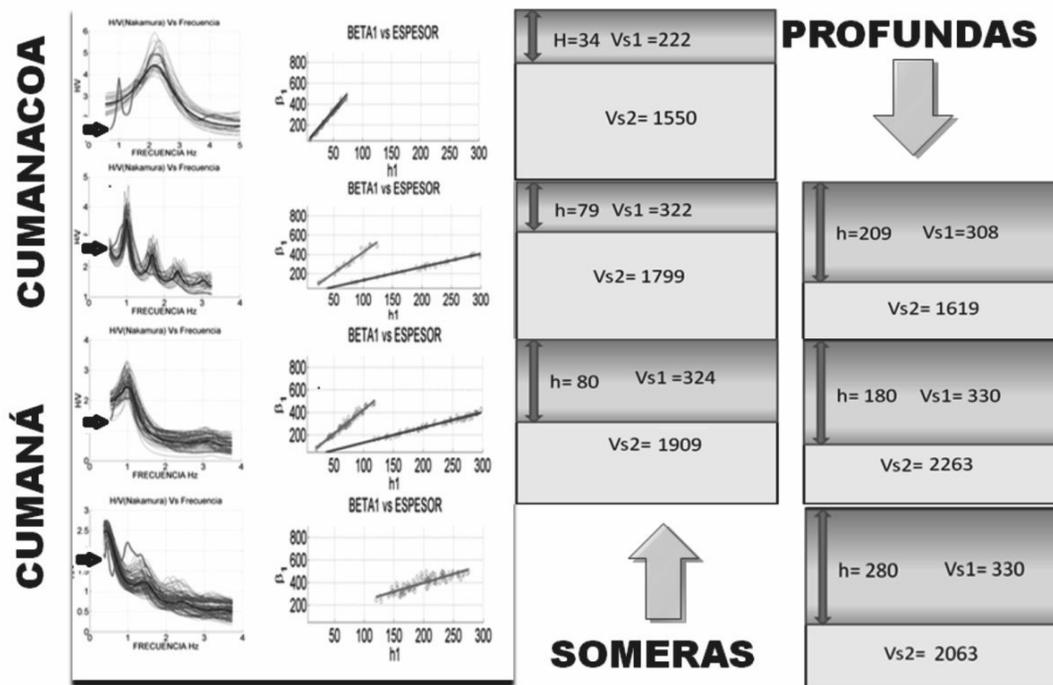


Figura 2. Ejemplo de los resultados, por familia de soluciones calculadas, usando el método de Algoritmos Genéticos Fenotípicos (ALG), a la izquierda, la flecha marca el inicio de la curva calculada con el programa Sesame en color gris claro la cual se ve algo diferente a las demás en su forma, en gris muy claro y de formas muy parecidas, la familia de soluciones posibles para un registro dado, normalmente entre 100 y 200 de 1500 soluciones posibles, y en negro la solución más probable para ese registro. En la parte derecha de esta primera columna, las posibles soluciones para el registro dado, solo solución somera en el primero, en el último solo solución profunda y ambas en el segundo y tercero, una somera y una profunda. La columna derecha muestra los modelos para los regímenes someros y profundos mostrados en unidades de m y m/s para espesores y velocidades. Hay que señalar los umbrales admisibles de las soluciones someras y profundas son calculados directamente en los ALG sobre la posible existencia de un grupo de soluciones probables. En esta gráfica se muestran dos de las 24 soluciones calculadas para Cumanacoa y dos de las 59 de Cumaná.

Tabla 1. Propiedades de las estructuras estratigráficas promedio calculadas; porcentaje de N N/Ntotal, espesor en sedimento h (m), velocidad S en sedimento β_1 (m/s), velocidad S en basamento β_2 (m/s), velocidad S en basamento β_2 (m/s), extinción ext1 (adimensional) relación de densidades dp (adimensional), ruido de fondo RF().

Ciudad	Cumanacoa		Cumaná	
	somero	profundo	somero	profundo
%N/Ntotal	95%	35%	89%	86%
h (m)*10	5 ± 1	17 ± 4	8 ± 2	20 ± 3
β_1 (m/s)*10	32 ± 8	31 ± 6	32 ± 8	34 ± 5
β_2 (m/s)*100	18 ± 3	17 ± 3	18 ± 3	17 ± 2
ext1 ()*10 ⁻¹	-6 ± 2	-9 ± 3	-10 ± 3	-9 ± 2
dp ()	2.0 ± 0.2	2.0 ± 0.2	2.0 ± 0.2	2.0 ± 0.2
RF()	0.9 ± 0.3	1.1 ± 0.2	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.1

densidad. Esto permite sugerir un mismo tipo de sedimento porque, si la diferencia fuera diferente al espesor de los sedimentos, para el mismo tipo de régimen sea somero o profundo entre las dos localidades, podría representar una historia geológica diferente con elementos geológicos diferentes.

Se observa claramente que la extinción (ext1) y el ruido de fondo (RF) son menores en Cumanacoa que en Cumaná, aspecto que parece caracterizar la diferencia promedio de los suelos; razón que hace suponer que estos parámetros estén asociados a la forma y distribución de los sedimentos más que a la característica de los materiales que los conforma.

CONCLUSIONES

Basados en los resultados presentados, se puede concluir:

1. La estructura cortical de la zona donde se asienta la población de Cumanacoa tiene espesores menores que las asociadas al sitio donde se ubica la ciudad de Cumaná.
2. Ambas estructuras corticales parece estar básicamente constituida por el mismo tipo de depósitos sedimentarios, que deben ser en su mayoría fluviales, dada por la cercanía a un río de gran caudal como es el río Manzanares, el cual se sabe que ha moldeado los sitios donde existen estas locaciones.
3. Porque, fundamentalmente, la diferencia es el espesor de sedimentos, se puede concluir que Cumaná tiene una historia de sedimentación más extensa que la de Cumanacoa, tal vez por una posibilidad de acumulación mayor dada por la diferencia de altura de 210m.
4. Debido a que ambas locaciones se hallan en la misma

cuenca hidrográfica, el origen de ambos depósitos debería ser el mismo como presentan las mismas velocidades de onda S se podría sugerir que están, en promedio, constituidos por los mismos materiales.

AGRADECIMIENTO

Quisiera dejar testimonio de nuestro más absoluto agradecimiento y reconocimiento al personal del Centro de Sismología de La Universidad de Oriente, que de una y otra forma siempre estuvo presente, en especial a Claudio Marchan, que prestó su colaboración desinteresada en la realización de la imagen de Cumanacoa.

REFERENCIAS

- ARAI H. & K. TOKIMATSU. (2004). *S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V*. Spectrum. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 94, No. 1, pp. 53–63.
- BONILLA L. F., J. H. STEIDL, G.T. LINDLEY, A.G. TUMARKIN R., J. ARCHULETA. (1997). *Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods*. Bull. Seism. Soc. Am., 87-3, 710-730.
- BONIVE, F. A. (2009). *Desarrollo de Metodología de Inversión para la obtención de modelos corticales 1D de la ciudad de Cumaná, basadas en relaciones H/V, obtenidos a partir de registro de microtremores*. Ms. Thesis, Postgrado de Física, Universidad de Oriente, Venezuela.
- CADENA, C. (2006). *Identificación de modelos dinámicos no lineales con algoritmos genéticos*. Tesis de Maestría En Ingeniería. Universidad Los Andes, ULA, Colombia.

- CSUDO. (1995-2008). *Boletines del Centro de Sismología de la UDO*, Boletines sobre la actividad Sísmica, Universidad de Oriente.
- ECU. 2000. *SESAME Project*, European Commission – Research General Directorate, Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
- ESPINOZA, F. (1999). “*Determinación de características dinámicas de estructuras*”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- FIELD E. H., A.C. CLEMENT, K. H. JACOB, V. AHARONIAN, S. E. HOUGH, P. A. FRIBERG, T. O. BABAIAN, S. S. KARAPETIAN, S. M. HOVANESSIAN, H. A. ABRAMIAN. (1995). *Earthquake site response in Giumri (formerly Leninakan), Armenia using ambient noise observations*. Bull. seism. Soc. Am., 85, 349-353.
- GEOPSY PROYECT(A). PROYECTO GEOPSY < <http://www.geopsy.org/index.html>> (citado: el 24 de mayo de 2011).
- GEOPSY PROYEC(B). Manual del modulo de H/V <http://www.geopsy.org/wiki/index.php/H/V_spectral_ratio#cite_note-2> (citado: el 24 de mayo de 2011).
- KUDO, K. (1995). *Practical Estimates of Site Response*. State-of-art Report. Proc. 5th Int. Conf. on Seismic Zonation, Nice, France, 1878-1907.
- LACHET C., D. HATZFELD, P.-Y. BARD, N. THEODULIDIS, C. PAPAIOANNOU AND A. SAVVAIDIS. (1996). *Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece): comparison of different aproaches*. Bull. Seism. Soc. Am. 86, 1692-1703.
- LERMO, J. & F. J. CHÁVEZ-GARCÍA. (1994). *Are microtremors useful in site response evaluation?* Bull. Seism. Soc. Am. 84, 1350-1364.
- NAKAMURA, Y. (1989). *A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface*. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No.1.
- RUDOLPH G. (1994). *Convergence analysis of canonical genetic algoritms*. IEEE Transactionson Neural Networks, 96-101.
- UDWADIA, F. E. & M. D. TRIFUNAC (1973). *Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California*, Bull. Seism. Soc. Am., 63, 1227-1253.