



MÉTODO DE ENERGÍA LIBERADA (SERRA/MEL)

Seismic Energy Release Risk Assessment

*Un Marco de Referencia Basado en Energía Física para la Caracterización del Comportamiento Sísmico,
Identificación de Etapas de Reactivación, Estimación de Amenaza, y Construcción de Mapas de Riesgo Sísmico a Escala Nacional y Cantonal*

Marcelo Moncayo Theurer, MSc

THEK Research Institute — Think Tank | CEO y Director de Investigación

Universidad de Guayaquil — Profesor Titular

Guayaquil, Ecuador

solugran@gmail.com

Versión 3.0 | 2025 | Fecha de prioridad de divulgación pública: octubre 2001

RESUMEN

El Método de Energía Liberada (SERRA/MEL) es un framework original de evaluación de amenaza sísmica desarrollado en la Universidad de Tokio entre 1999 y 2000, desarrollo realizado en el laboratorio de estructuras de acero que era liderado por el Profesor Kenichi Ohi [2], y presentado por primera vez en la 6ª Conferencia Internacional de Zonificación Sísmica (Oakland, EE.UU., 2000) [2].

SERRA/MEL realiza la transformación inversa de catálogos sísmicos históricos desde el dominio de la magnitud Richter hacia el dominio de la energía física

mediante la relación de Gutenberg-Richter (1956) [1], recuperando información sobre la acumulación y liberación de energía tectónica que queda sistemáticamente oculta por la compresión logarítmica de la escala de magnitud.

El framework produce tres clases de resultados analíticos: (1) curvas de liberación de energía sísmica — energía versus tiempo a resolución de lustro y década — que revelan niveles de energía, identifican etapas discretas de reactivación sísmica, documentan patrones de recurrencia cíclica y permiten la construcción de mapas de riesgo sísmico a escala nacional, regional y cantonal; (2) curvas de profundidad hipocentral — número de sismos superficiales, intermedios y profundos versus tiempo — que demuestran que durante los períodos de intensa actividad sísmica los hipocentros migran hacia la superficie mientras que en los períodos de tranquilidad se profundizan, siendo la combinación de alta energía sísmica con hipocentros superficiales la condición más destructiva para las estructuras; y (3) mapas de energía focalizada con SIG (Sistemas de información geográfico) que identifican fuentes de amenaza sísmica y las clasifican en un esquema vinculado a la Magnitud Máxima Esperada (MME) y estimaciones de aceleración máxima del suelo.

A diferencia de los métodos probabilísticos de amenaza sísmica tradicionales, SERRA/MEL está íntimamente ligado al comportamiento sísmico real de la región analizada — sus curvas, etapas y patrones de recurrencia se derivan directamente del registro histórico de energía y no de distribuciones estadísticas externas, lo que representa una ventaja metodológica fundamental.

Una propuesta tectónica central del framework sostiene que el material anómalo entre las placas de Nazca y Sudamericana en el segmento ecuatoriano puede representar un vestigio de la placa del Caribe, expresado estructuralmente a través del sistema de falla Guayaquil-Caracas [2].

Aplicado al Ecuador desde el año 2000, SERRA/MEL identificó correctamente el inicio de una nueva etapa de reactivación sísmica desde ese año — validado por el hecho de que la liberación de energía post-2000 ha aumentado decenas de veces por encima de los niveles previos al año 2000 — e identificó la zona de Manabí-Esmeraldas como área de amenaza máxima con magnitudes esperadas de Mw 7.7-8.0 en 2003-2005 [3], validado empíricamente por el terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016 (Mw 7.8).

El framework ha sido aplicado a Ecuador, México, Chile, Venezuela, Colombia, Perú, Japón, Australia, Estados Unidos, Europa y a escala continental [6,7], produciendo mapas de riesgo sísmico para Latinoamérica y el hallazgo fundamental de que el comportamiento sísmico en Perú y Chile está gobernado por la proximidad a la subducción mientras que en Ecuador, Colombia y Venezuela está gobernado por focos sismogénicos discretos.

Un hallazgo clave de esta aplicación multinacional es que el comportamiento sísmico de varios países puede expresarse mediante ecuaciones polinómicas matemáticas derivadas de sus curvas de liberación de energía, lo que constituye

un avance importante que permite proyectar cuantitativamente el comportamiento sísmico futuro [6].

El framework se complementa actualmente con cinco leyes de atenuación originales desarrolladas por el autor para aplicación en diferentes contextos tectónicos.

Palabras clave: *energía sísmica liberada; SERRA/MEL; SIGSA; vestigio placa del Caribe; falla Guayaquil-Caracas; mapas de riesgo sísmico; curvas de profundidad hipocentral; ecuaciones de comportamiento energético; focos sismogénicos; Ecuador; Pedernales 2016; diseño estructural por energía; leyes de atenuación originales*

1. Introducción y Origen del Framework

El límite de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana a lo largo de la trinchera Colombia-Ecuador define uno de los márgenes tectónicos más sísmicamente complejos del mundo. El registro histórico de este margen se extiende hasta el siglo XVI y documenta un patrón de reactivación sísmica cíclica de magnitud excepcional y capacidad destructiva. Traducir esta realidad física en evaluación de amenaza sísmica accionable y con utilidad ingenieril, a la escala de ciudades, cantones y estructuras individuales, ha sido un desafío persistente tanto para la investigación sismológica como para la práctica de ingeniería en Ecuador y el resto de la región andina.

El framework SERRA/MEL — Método de Energía Liberada, denominado en inglés Seismic Energy Release Risk Assessment — aborda este desafío a través de un enfoque que es fundamentalmente diferente de los métodos existentes en un aspecto crítico: está íntimamente ligado al comportamiento sísmico real de la región analizada. En lugar de imponer un modelo estadístico externo sobre los datos de magnitud, SERRA/MEL deriva su caracterización de la amenaza directamente del registro físico histórico de energía del sistema tectónico. Esto produce resultados que no son meramente estadísticamente probables sino físicamente significativos, fundamentados en el ritmo documentado de acumulación y liberación de energía que gobierna la actividad sísmica de la región.

1.1 Orígenes Intellectuales: De Bertero a Tokio

La trayectoria intelectual que produjo SERRA/MEL comenzó en Guayaquil con la visita del Profesor Vitelmo Bertero, quien presentó a la comunidad de ingeniería ecuatoriana el caso para los métodos inelásticos y basados en energía como el siguiente avance fundamental en el diseño estructural sísmico. Esa presentación cristalizó una orientación que definiría el programa de investigación del autor durante décadas. El primer resultado concreto fue una tesis de grado sobre espectros de respuesta inelásticos y factores de reducción sísmica calculados a partir de registros de movimiento del suelo específicos para Guayaquil [véase Moncayo, 1998] — trabajo que propuso explícitamente estos espectros para incorporación en las normas de diseño

estructural ecuatorianas y que estableció la conexión entre la caracterización de la demanda sísmica y el diseño estructural al nivel de la energía física.

En 1999-2000, la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) otorgó al autor una beca de postgrado para estudios en el Building Research Institute (IISEE) de Japón. Posteriormente seleccionado para investigación de tesis en la Universidad de Tokio, Instituto de Ciencia Industrial, Laboratorio de Estructuras de Acero, el autor trabajó bajo la supervisión directa del Profesor Kenichi Ohi [2]. El Profesor Ohi había sido formado bajo la dirección del Profesor Hiroshi Akiyama [8] — el padre del diseño estructural basado en energía en Japón, autor del texto fundacional sobre esa filosofía de diseño, y el progenitor intelectual de la tradición energética dentro de la cual SERRA/MEL fue concebido. La convergencia del framework de diseño por energía de Akiyama con el problema de la caracterización de amenaza sísmica para Ecuador — en un laboratorio profundamente orientado hacia el análisis físico de la energía en estructuras — fue el ambiente intelectual en el que SERRA/MEL nació.

1.2 El Problema con los Métodos Existentes

Un examen sistemático de las metodologías disponibles de estimación de amenaza sísmica en la Universidad de Tokio identificó dos categorías de limitación fundamental que motivaron el desarrollo de SERRA/MEL. Los métodos basados en parámetros empíricos de falla — longitud, ancho sismogénico, profundidad — requieren cantidades que no pueden medirse directamente y deben estimarse mediante relaciones de escala globales [10,11]. Estas relaciones llevan incertidumbre epistémica sustancial que se propaga a través del cálculo de amenaza de maneras difíciles de acotar, particularmente en ambientes de subducción donde la geometría de la zona sismogénica está mal restringida [12]. El empirismo inherente a estas variables representaba una debilidad estructural irremediable dentro del marco metodológico existente.

La distribución de valores extremos de Gumbel Tipo I [9], si bien estadísticamente sólida, opera como una caja negra sobre datos de magnitud. Ajusta una distribución a las magnitudes máximas anuales y extrapola períodos de retorno sin referencia al proceso físico — la acumulación y liberación de energía de deformación cortical — que genera esas magnitudes. Produce estimaciones de recurrencia pero no ofrece ninguna visión sobre si la región se encuentra en una fase temprana, media o avanzada de su ciclo de acumulación energética. No puede distinguir entre una región que acaba de completar una gran liberación de energía y una que está en el umbral de otra. Para un investigador cuyo objetivo era construir un framework de amenaza físicamente fundamentado en energía, un método incapaz de caracterizar el estado de acumulación energética era conceptualmente inadecuado.

1.3 La Propuesta Central: Invertir la Relación de Gutenberg-Richter

La resolución llegó de un reexamen de la relación de Gutenberg-Richter [1]. Esa ecuación es bidireccional: Richter transitó *desde* la energía física *hacia* una escala logarítmica de magnitud conveniente. La propuesta central de SERRA/MEL es la operación inversa sistemática: transformar los catálogos sísmicos históricos *de regreso* desde el dominio de la magnitud hacia el dominio de la energía física. El USGS acababa de poner en línea su catálogo sísmico [16], proporcionando acceso a datos instrumentales desde 1900 y a registros históricos hasta

aproximadamente 1500 d.C. Aplicar la Ecuación 1 a ese catálogo, evento por evento, produce una serie temporal de energías físicas que constituye lo que este autor denomina la **huella digital sísmica** de la región: una firma temporal característica que codifica la dinámica dominante de acumulación y liberación de energía tectónica que ni los métodos de falla [10,11] ni las distribuciones estadísticas [9] podían revelar.

1.4 La Experiencia de Campo Motivadora

La urgencia de esta investigación no fue abstracta. En 1998, el autor participó en levantamientos post-sísmicos tras el terremoto de Bahía de Caráquez (Mw 7.1), documentando fallas estructurales catastróficas — incluyendo el vuelco completo del edificio Calipso y la destrucción del hospital municipal. La imagen de esas estructuras colapsadas, de un hospital municipal inutilizado por un evento que los mapas de amenaza existentes no habían clasificado como la prioridad máxima, definió las implicaciones prácticas del programa de investigación y fue una referencia motivadora permanente durante los años en Tokio.

1.5 Una Propuesta Tectónica: El Vestigio de la Placa del Caribe

Paralelo al análisis energético de SERRA/MEL, una década de examen sistemático de la configuración tectónica ecuatoriana llevó al autor a formular una propuesta de trabajo respecto a la estructura del límite de placas Nazca-Sudamericana en el segmento ecuatoriano [2]. El comportamiento sísmico de Ecuador, revelado por los mapas de energía del método y corroborado por el análisis multinacional [6,7], difiere fundamentalmente del de Perú y Chile: en lugar de seguir la regla de proximidad a la trinchera que gobierna el margen de subducción sur, la sismicidad ecuatoriana se concentra en focos sismogénicos discretos desconectados de la geometría de subducción simple.

El autor propone que este comportamiento anómalo refleja la presencia de material entre las placas de Nazca y Sudamericana en el segmento ecuatoriano que no corresponde a las propiedades esperadas de ninguna de las dos placas. Tras un exhaustivo análisis, la propuesta es que esta zona anómala puede representar un vestigio antiguo de la placa del Caribe, preservado en la interfaz de subducción tras un episodio de interacción compleja de placas [2]. La expresión estructural más significativa de esta configuración es el sistema de falla Guayaquil-Caracas — un lineamiento tectónico mayor cuya orientación y extensión son consistentes con la geometría de un contacto triple que involucra un remanente de la placa del Caribe. Esta propuesta, de ser validada, alteraría fundamentalmente el modelo de amenaza sísmica para Ecuador, Colombia y Venezuela, explicando por qué las normas de amenaza estándar basadas en subducción calibradas para Chile y Perú son sistemáticamente inadecuadas para el margen andino norte.

2. Marco Teórico

2.1 La Relación Energía-Magnitud y su Inversión

La ecuación fundacional de SERRA/MEL es la relación energía-magnitud establecida por Guttenberg y Richter en 1956 [1]:

$$\text{Log(ES)} = 1.5 \cdot \text{Ms} + 11.8 \quad (\text{ES en ergios}) \quad (\text{Ec. 1})$$

Esta ecuación permite transformar cualquier magnitud catalogada en su energía física equivalente en el hipocentro. Aplicada sistemáticamente a un catálogo histórico completo, produce una serie temporal de energías físicas que captura el comportamiento sísmico total de la región — no meramente su frecuencia de eventos. La significancia física de esta transformación es sustancial: la escala Richter comprime el dominio de la energía logarítmicamente, con cada unidad de magnitud representando un factor de 31.6 en liberación de energía. Un solo evento Ms 8.8 (Ecuador, 1906) libera aproximadamente 31 millones de veces la energía de un evento de magnitud 5.0. En el dominio de la energía, esta abrumadora dominancia de los grandes eventos es explícita y cuantificable — formando el fundamento empírico de la Ley del 95% y distinguiendo la caracterización de riesgo de SERRA/MEL de los métodos que tratan los eventos simétricamente por conteo.

2.2 Energía de Deformación Cortical: El Mecanismo Físico de las Etapas Sísmicas

El movimiento tectónico de las placas realiza trabajo mecánico sobre la roca cortical adyacente a las zonas de subducción y fallas activas, almacenando esa energía como energía de deformación elástica. Siguiendo la mecánica clásica [13], en ausencia de disipación, la energía de deformación es igual al trabajo realizado. El Teorema de Castigliano [13,20] relaciona la energía almacenada U con el desplazamiento δ y la fuerza F :

$$\delta = \partial U / \partial F \quad (\text{Ec. 2})$$

La energía de deformación por unidad de volumen como función del estrés normal σ (módulo de Young E) y el estrés cortante τ (módulo de corte G) es:

$$U = \sigma^2 / 2E \quad ; \quad U = \tau^2 / 2G \quad (\text{Ec. 3})$$

A medida que el movimiento de las placas aplica estrés según la Ecuación 3, la energía elástica de deformación se acumula. Cuando el estrés supera el umbral de falla del material, ocurre la ruptura en la falla, la energía almacenada se libera como energía sísmica, y tanto el estrés como la energía almacenada caen bruscamente. Este ciclo — décadas a siglos de acumulación lenta, segundos a minutos de liberación rápida — es lo que las curvas históricas de energía de SERRA/MEL capturan y caracterizan a lo largo de 500 años de historia sísmica.

2.3 La Ley del 95% de la Energía Sísmica Liberada

Un resultado empírico consistente en todas las aplicaciones de SERRA/MEL es la Ley del 95% de la Energía Sísmica Liberada [2,4]: en el sistema de subducción Nazca-Sudamericano, el 95% de los eventos sísmicos tienen magnitud $M_s < 6$ y liberan colectivamente solo el 5% de la energía sísmica total. El 5% restante de eventos, con $M_s > 6$, libera el 95% del total. Esta asimetría no es un artefacto estadístico sino una consecuencia directa de la relación energía-magnitud [1]. Su implicación práctica es fundamental: el riesgo sísmico dominante de cualquier región de subducción está determinado casi enteramente por sus grandes eventos infrecuentes — no por las propiedades estadísticas de los pequeños eventos frecuentes que dominan los métodos de conteo de eventos. SERRA/MEL es el único framework de amenaza que hace de esta asimetría el punto de partida explícito del análisis.

2.4 Etapas Sísmicas: El Ciclo de Dos Fases

El análisis de la curva histórica de liberación de energía revela un ciclo sistemático de dos etapas que SERRA/MEL identifica y caracteriza para cada región de estudio [2,4]. La Etapa 1 corresponde a la década de mayor energía de cada ciclo sísmico — típicamente un período de una a dos décadas de actividad intensa dominada por uno o más grandes eventos subductivos. La Etapa 2 es un pico energético secundario aproximadamente 40-60 años después de la Etapa 1, con niveles de energía aproximadamente 100 veces menores. Cada etapa es seguida por una fase de recarga de 30-50 años durante la cual la energía se acumula y la curva declina hacia valores mínimos.

Para Ecuador, este ciclo de dos etapas recurre con intervalos entre 98 y 125 años a través de cuatro ciclos documentados desde 1500 d.C. [2]. A escala cantonal [7], SERRA/MEL revela ciclos de reactivación local más cortos con intervalos de recurrencia de 8-25 años. Estos ciclos no son impuestos por modelos externos: emergen directamente de los datos de energía como expresión de la realidad física del sistema tectónico.

2.5 La Teoría de la Potencialidad de Energía de Deformación Liberada (SERPT)

La priorización espacial de las zonas de amenaza en SERRA/MEL se apoya en la Teoría de la Potencialidad de Energía de Deformación Liberada (SERPT) introducida por Williams y Reifsnider (1978) [9b]: cuando múltiples mecanismos de daño son posibles con igual probabilidad, el que más probablemente iniciará primero es el de mayor potencial de liberar energía de deformación almacenada. Aplicado al contexto tectónico, entre múltiples sistemas de fallas activas, el próximo evento significativo se originará más probablemente en el sistema con mayor densidad de energía. En todas las aplicaciones nacionales de SERRA/MEL [6,7], el 90% de la energía total liberada en cada zona durante el siglo XX fue atribuible a un solo evento dominante — consistente con este principio.

2.6 La Extensión Estadística: Proyección por Media-Varianza de Etapas de Reactivación

Una innovación metodológica significativa, desarrollada a través de la investigación de titulación supervisada por el autor [7], extendió SERRA/MEL con un procedimiento estadístico para proyectar el momento de las futuras etapas de reactivación a partir de los intervalos inter-reactivación observados. El procedimiento:

1. Identificar todos los máximos locales de energía en la curva histórica — los años o lustros en que se registran picos de liberación. Cada pico constituye un evento de reactivación observado.
2. Calcular los intervalos de tiempo entre picos consecutivos, formando la muestra de espaciamientos inter-reactivación.
3. Calcular la media muestral μ y la varianza muestral σ^2 de estos intervalos.
4. Aplicar prueba de hipótesis al 95% de confianza para definir el rango probable del siguiente intervalo como $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$.
5. Proyectar el rango probable de fechas de la próxima reactivación sumando este intervalo a la fecha del último pico observado.

Este procedimiento transforma la curva de liberación de energía de una herramienta diagnóstica retrospectiva en un instrumento prospectivo de vigilancia de amenaza. En el estudio de 30 cantones [7], el método identificó consistentemente que todos los cantones se encuentran en fases activas de reactivación al año 2022 — muchos con reactivaciones de intensidad y duración sin precedentes en el registro instrumental.

3. Metodología: Herramientas Analíticas y Procedimientos

3.1 Fuentes de Datos

SERRA/MEL utiliza el catálogo del Centro Nacional de Información sobre Terremotos del USGS como fuente primaria de datos [16], complementado por CERESIS para eventos históricos anteriores a 1900. Para estudios nacionales se incluyen eventos con $M_w \geq 4.0$; para estudios cantonales, $M_w \geq 4.5$. Los radios de análisis son 250 km para la mayoría de cantones y 400 km para Guayaquil. El estudio de 30 cantones [7] utilizó datos desde 1900 hasta 2022 — una ventana instrumental de 122 años que comprendió 11.549 eventos para México, 6.424 para Chile, 2.785 para Colombia, 1.653 para Ecuador y conteos proporcionales para otros países.

3.2 Herramienta 1: La Curva de Liberación de Energía — Energía versus Tiempo

La curva de liberación de energía es el resultado analítico primario de SERRA/MEL. Se construye aplicando la Ecuación 1 a cada evento del catálogo, convirtiendo cada magnitud a su equivalente de energía física en ergios, y agregando los resultados en dos resoluciones temporales: por lustros (períodos de cinco años) y por décadas. Esta doble resolución es necesaria porque los ciclos de reactivación local a escala cantonal, con períodos de 8-25 años, son mejor visibles a

escala de lustros, mientras que los ciclos nacionales dominantes de Etapa 1 y Etapa 2, con períodos de 98-125 años, son mejor visibles a escala decadal.

La curva de liberación de energía permite las siguientes determinaciones específicas:

- Identificación de etapas de reactivación — los picos de liberación de energía que definen el comportamiento sísmico cíclico de la región.
- Medición de niveles de energía en cada etapa — expresados en ergios, normalizados al promedio histórico, permitiendo comparación directa entre el estado energético actual y los históricos.
- Determinación de intervalos de reactivación — el tiempo entre picos de energía consecutivos, de los cuales se calculan media y varianza para proyección probabilística.
- Detección de comportamiento sin precedentes — identificación de niveles actuales de energía que superan todos los máximos históricos, como documentado en Guayaquil y varios cantones de Manabí al año 2022 [7].
- Construcción de mapas de riesgo sísmico — acumulando y cartografiando la energía total liberada en cada sector SIGSA a lo largo del registro histórico, SERRA/MEL produce mapas de amenaza distribuidos espacialmente que clasifican las zonas de riesgo por nivel de energía y Magnitud Máxima Esperada [3,4].

Una ventaja crítica de la curva de energía sobre los métodos estadísticos de magnitud es que está directa y únicamente ligada al comportamiento sísmico físico de la región específica analizada. La forma de la curva, su estructura de etapas y su patrón de recurrencia no son impuestos por una suposición distribucional externa sino que emergen de los datos como expresión de cómo ese sistema tectónico ha funcionado a lo largo de su historia observable.

3.3 Herramienta 2: La Curva de Profundidad Hipocentral — Perfil de Profundidad versus Tiempo

La segunda herramienta analítica introducida en la extensión cantonal [7] es la curva de profundidad hipocentral. Esta curva rastrea, a intervalos de cinco y diez años, el conteo de eventos sísmicos clasificados en tres categorías de profundidad: superficial (≤ 30 km), intermedio (31-100 km) y profundo (≥ 101 km). La base física de este análisis radica en la relación bien establecida entre la profundidad sísmica y el movimiento del suelo en superficie: los terremotos superficiales liberan su energía en el subsuelo inmediato y la transmiten a la superficie con mínima atenuación; los terremotos intermedios y profundos llegan a la superficie después de atravesar mayores distancias de roca, significativamente atenuados.

Un hallazgo clave del estudio cantonal [7] es que la profundidad sísmica sigue un patrón consistente correlacionado con la etapa de reactivación: durante los períodos de intensa actividad sísmica — los picos de reactivación — los hipocentros migran hacia la superficie, con dominancia de sismicidad superficial. Durante los períodos de tranquilidad sísmica — la fase de recarga — los hipocentros se profundizan, con predominancia de eventos intermedios y profundos. Esta correlación entre etapa energética y perfil de profundidad es físicamente consistente con el modelo de acumulación de energía de deformación: a medida que el estrés cortical aumenta y la zona estresada se expande hacia las fallas superficiales, esas zonas

comienzan a rupturarse más frecuentemente, produciendo el observable empuje hacia la superficie de la distribución de profundidad hipocentral.

La condición más destructiva identificada por SERRA/MEL es la combinación simultánea de alta liberación de energía y hipocentros superficiales: esta configuración concentra la máxima energía de movimiento del suelo en la zona cercana a la superficie donde se ubican las estructuras, sin la atenuación de trayectoria que reduce el impacto de los eventos más profundos. Al año 2022, los 30 cantones del estudio exhiben esta doble firma — energía elevada y sismicidad superficial creciente — representando una condición de alerta en todo el territorio poblado del Ecuador.

3.4 Sistema Integrado Geológicamente Activo (SIGSA)

El Sistema Integrado Geológicamente Activo (SIGSA) es la unidad espacial de acumulación de energía en SERRA/MEL [2,3,4]. El procedimiento de construcción:

6. Mapear todas las fallas geológicas activas dentro del radio de estudio utilizando levantamientos geológicos disponibles y bases de datos publicadas.
7. Identificar la orientación estructural dominante de la red de fallas mediante análisis direccional.
8. Definir una traza virtual lineal siguiendo la orientación dominante.
9. Asignar un área de contribución sísmica a cada SIGSA, delimitada por las mediatrices entre trazas adyacentes.
10. Acumular toda la energía sísmica de los eventos dentro del área de contribución de cada SIGSA, tratando el agregado como una sola fuente concentrada para cálculos de recurrencia y amenaza.

Para estudios nacionales, se definieron 5 SIGSA para la región de Guayaquil: Subducción, Manabí-Esmeraldas, Santa Elena, Guayaquil y Jambelí [3,4]. Para el estudio cantonal [7], se identificaron entre 5 y 14 SIGSA por cantón dependiendo de la complejidad de fallas local. El concepto de SIGSA resuelve una limitación fundamental de la caracterización de fallas individuales: en redes de fallas complejas, la transferencia de estrés entre estructuras vecinas hace que los modelos de recurrencia de fallas individuales sean poco confiables. El SIGSA agrega el comportamiento de la red en una sola fuente representativa.

3.5 Magnitud Máxima Esperada, PGA y Cartografía de Riesgo

La Magnitud Máxima Esperada (MME) para cada SIGSA se calcula como el evento que liberaría la energía total acumulada en una sola ruptura dominante [2,3,4]:

$$MME = (\text{Log}(E_{\text{TOTAL}}) - 11.8) / 1.5$$

(Ec. 4)

La aceleración máxima del suelo en el sitio de estudio se estima usando una familia original de cinco leyes de atenuación desarrolladas por el autor para aplicación en diferentes contextos tectónicos y rangos de distancia. Este conjunto de cinco leyes de atenuación Moncayo Theurer representa un desarrollo metodológico significativo respecto a las aplicaciones iniciales de SERRA/MEL, que empleaban las formulaciones de Cornell [14b], Lara [14] y Youngs et al. [15].

Las cinco leyes propias están calibradas a las características específicas del movimiento del suelo del entorno tectónico ecuatoriano y sudamericano, reduciendo la incertidumbre asociada a la aplicación de relaciones de atenuación derivadas globalmente a un contexto regional específico. Para el diseño estructural, el framework recomienda aplicar un factor de reducción por inelasticidad de 2 a la aceleración calculada:

$$a_{\text{diseño}} = a_{\text{MME}} / 2 \quad (\text{gals, reducción inelástica}) \quad (\text{Ec. 5})$$

Los valores de MME se clasifican en el esquema de siete niveles de amenaza (Tabla 2) y la distribución espacial de las zonas de riesgo se representa en mapas de energía focalizada con SIG producidos con ArcMap para estudios cantonales [7] y Global Mapper para estudios nacionales [6]. Estos mapas de riesgo sísmico son representaciones directas de dónde se ha concentrado la energía tectónica en el registro histórico, proporcionando una imagen espacialmente interpretable de la distribución del riesgo sísmico.

3.6 Ecuaciones de Comportamiento Energético: Expresión Matemática de la Huella Digital Sísmica

Uno de los hallazgos analíticos más significativos de la aplicación multinacional de SERRA/MEL [6] es que el comportamiento de liberación de energía sísmica de países individuales puede expresarse mediante ecuaciones polinómicas derivadas de sus curvas de liberación de energía. Estas expresiones polinómicas de sexto grado relacionan la liberación de energía acumulada con el tiempo y constituyen huellas digitales matemáticas del comportamiento sísmico de cada país:

$$E(t) = a_6 t^6 + a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (\text{ergios}) \quad (\text{Ec. 6})$$

donde los coeficientes a_0 a través de a_6 se ajustan a la serie histórica de energía de cada país. Este enfoque matemático fue derivado para Ecuador, Perú, Chile, Venezuela, Colombia y México [6]. Su significancia es triple. Primero, proporciona un resumen cuantitativo compacto de la huella sísmica única de cada país. Segundo, permite la comparación cuantitativa del comportamiento sísmico entre países en una escala de energía común. Tercero, permite la proyección de niveles futuros de energía extrapolando el polinomio más allá del período histórico observado — proporcionando una base cuantitativa para anticipar si la liberación de energía aumentará, se estabilizará o declinará en el corto a mediano plazo. El hecho de que el comportamiento sísmico nacional pueda capturarse matemáticamente en esta forma es en sí mismo una contribución al entendimiento sismológico, demostrando que la secuencia aparentemente caótica de terremotos sigue un patrón físicamente estructurado cuando se analiza en el dominio de la energía.

4. Aplicación Nacional: Ecuador — Resultados y Validación Empírica

4.1 El Registro de Energía del Siglo XX

La aplicación de SERRA/MEL al catálogo sísmico del Ecuador — analizado a través de 122 años de datos instrumentales complementados con 500 años de registros históricos — revela el ciclo de dos etapas que define la huella digital sísmica del país [2,4]. La Etapa 1 abarca la década 1900-1910 y está anclada por tres grandes eventos: Ms 7.8 el 7 de enero de 1901 (Zona 1, 100 km de Guayaquil); Ms 8.8 el 31 de enero de 1906 (Zona 1, costa norte — el cuarto terremoto más grande de la historia mundial registrada, que generó grandes olas destructivas en el Pacífico y mató a más de 1.500 personas); y Ms 7.5 el 28 de septiembre de 1906 (Zona 2, profundidad 150 km). La Zona 1 liberó 1×10^{25} ergios solo en esa década — ocho órdenes de magnitud por encima de los valores mínimos de los años 1990. La Etapa 2 ocurrió en los años 1950, con eventos dominantes de Ms 7.8 en 1953 y 1958. La razón energética Etapa 1 a Etapa 2 es de aproximadamente 100:1. Desde los años 1960 hasta los 1990, las tres zonas entraron en una fase de recarga sostenida — curvas de energía declinando monótonamente mientras los conteos de eventos menores aumentaban.

4.2 Primera Validación Empírica: La Predicción de Reactivación del Año 2000

La convergencia de tres indicadores — liberación de energía casi nula durante los años 1990, aumento de la frecuencia de eventos menores, e intervalo de recurrencia de 98-125 años que situaba la próxima Etapa 1 entre 1998 y 2030 — produjo la conclusión publicada en la 6ª Conferencia Internacional de Zonificación Sísmica en 2000 [2] y comunicada públicamente en Ecuador en octubre de 2001 a través de una página completa en el Diario El Universo con el titular 'Moncayo: Inicio de la reactivación sísmica del Ecuador' [2]. El artículo presentó las curvas de energía de SERRA/MEL y advirtió que los niveles de energía entonces registrados serían superados cien veces en los años subsiguientes.

Esta predicción constituye la primera validación empírica de SERRA/MEL. Los años posteriores al 2000 demostraron exactamente el comportamiento que el framework predijo: actividad volcánica sostenida del Tungurahua, Guagua Pichincha y Reventador, intensificación progresiva de la actividad sísmica regional, y — como documenta el estudio cantonal [7] — una fase de reactivación actual en la que la liberación de energía post-2000 ha aumentado decenas de veces por encima de los niveles del año 2000 en todos los cantones estudiados. Las curvas de energía producidas por SERRA/MEL muestran ahora que la reactivación no solo es confirmada sino que está produciendo concentraciones de energía históricamente sin precedentes en varios cantones, particularmente en las regiones de Manabí y Guayas. El Honorable Congreso Nacional otorgó el Premio al Mérito Científico al autor en reconocimiento de esta contribución.

4.3 Segunda Validación Empírica: El Mapa ESPOL 2003-2005 y la Predicción de Manabí

El Proyecto Semilla ESPOL (2003-2005) [3], otorgado al autor como la propuesta de investigación de mayor relevancia científica de su convocatoria, aplicó SERRA/MEL para producir el Mapa de Potencialidad de Energía Liberada para la región metropolitana de Guayaquil. Se identificaron nueve fuentes de amenaza sísmica clasificadas en siete niveles de

riesgo. Dos fuentes recibieron la clasificación máxima de Muy Alto riesgo (MME 8.0): la zona de subducción a 100 km frente a Salinas, y el segmento Manabí-Esmeraldas a 120 km frente a Bahía de Caráquez. Otras dos fuentes fueron clasificadas como Alto riesgo (MME 7.7).

El 16 de abril de 2016, el terremoto de Pedernales azotó con Mw 7.8, con su epicentro en la provincia de Manabí. Las cifras oficiales registraron 671 muertos y un número no precisado de desaparecidos. Investigaciones independientes indican que las víctimas reales pueden ser hasta ocho veces superiores a las reportadas oficialmente, y el costo humano completo de este evento merece una investigación rigurosa e independiente. La destrucción estructural fue extensa: miles de viviendas dañadas o colapsadas en toda la zona costera; múltiples edificaciones de hormigón armado en Manta y Portoviejo colapsaron completamente; cientos de instalaciones industriales y comerciales quedaron paralizadas; barrios enteros de Pedernales fueron arrasados. El epicentro cae dentro del SIGSA de Manabí-Esmeraldas cartografiado en 2003-2005 [3]. La magnitud observada (Mw 7.8) se encuentra dentro del rango de amenaza de SERRA/MEL de 7.7-8.0 para esa zona. El evento ocurrió dentro del período de reactivación identificado desde el año 2000. Esta triple correspondencia — zona correcta, rango de magnitud correcto, etapa temporal correcta — constituye la segunda y principal validación empírica del framework SERRA/MEL.

Cabe destacar que varias otras amenazas del mapa de 2005 también se han materializado desde su publicación, incluyendo un sismo de magnitud 6 cercano a Olón que aparece en el mapa — demostrando que el mapa de riesgo sísmico funciona como instrumento predictivo en curso.

4.4 El Congreso Internacional de Octubre 2015 y su Publicación

En octubre de 2015, cinco meses antes del terremoto de Pedernales, el autor presentó las evaluaciones de amenaza de SERRA/MEL en el Congreso Internacional de Ingeniería Sísmica celebrado en la Universidad Católica Santiago de Guayaquil. La presentación identificó explícitamente la amenaza de Mw 7.7-8.0 para la zona de Manabí-Esmeraldas y describió el estado actual de acumulación de energía de cada SIGSA. Los papers de ese congreso fueron publicados en la revista Alternativas en 2016 [4], proporcionando un registro revisado por pares de la evaluación de amenaza que es anterior al terremoto. Esta documentación — un paper publicado que identifica la zona de amenaza específica y el rango de magnitud cinco meses antes del evento — representa uno de los casos más claramente documentados de identificación prospectiva de amenaza sísmica en la literatura de la región.

4.5 Corroboración Metodológica Independiente

La evaluación de amenaza de SERRA/MEL para Manabí-Esmeraldas recibe corroboración independiente de Castilla y Sánchez (2014) [5], quienes aplicaron estadísticas de recurrencia de Gutenberg-Richter combinadas con análisis de valores extremos Gumbel Tipo I a la costa pacífica colombo-ecuatoriana. Su resultado: probabilidad del 99% de Mw 7.8 en 100 años, con período de retorno de 15.65 años ya superado en 2014. Dos enfoques metodológicamente independientes — SERRA/MEL (análisis físico energético, 2000-2005) y Gumbel-Gutenberg-Richter (análisis estadístico de valores extremos, 2014) — convergieron en la misma zona, la

misma magnitud y la misma conclusión de período de retorno superado, con ambos análisis anteriores al evento de 2016.

5. Datos de Energía por SIGSA — Ecuador

La Tabla 1 presenta la distribución de la energía del siglo XX por SIGSA y décadas. El patrón estructural es claro: el 95% de la energía total del SIGSA de Subducción fue liberada en la primera década (megaterremoto de 1906), seguida de recuperación y Etapa 2 en las décadas de 1940-1960 para los SIGSA interiores, y liberación casi nula en todos los SIGSA en los años 1990 — la confirmación de recarga completa que sustentó la predicción del año 2000 [2,3].

DÉCADA	SANTA ELENA	GUAYAQUIL	JAMBELÍ	MANABÍ-ESMERALDAS	SUBDUCCIÓN
1900–1910	—	—	65%	—	95%
1910–1920	17%	—	—	—	—
1920–1930	—	10%	—	10%	1%
1930–1940	—	—	5%	—	—
1940–1950	73%	—	—	—	4%
1950–1960	—	75%	—	83%	—
1960–1970	—	—	22%	—	—
1970–1980	17%	—	—	—	1%
1980–1990	—	15%	6%	7%	—
1990–2000	—	—	—	—	—

Tabla 1. Porcentaje de la energía sísmica total del siglo XX liberada por décadas, por SIGSA (fuente: [3,4]). La liberación casi nula en todos los SIGSA en los años 1990 confirmó la recarga completa y fue la evidencia principal de la predicción de reactivación del año 2000 [2].

NIVEL DE RIESGO	COLOR	MME (Mw)	ENERGÍA DESDE (Ergios)	ENERGÍA HASTA (Ergios)
Muy Alto	Rojo Oscuro	8.0	3.1×10^{23}	8.0×10^{23}
Alto	Rojo	7.7	5.0×10^{22}	3.1×10^{23}
Medio-Alto	Rosado	7.2	8.0×10^{21}	5.0×10^{22}
Medio	Azul	6.7	9.0×10^{20}	8.0×10^{21}
Medio-Bajo	Celeste	6.0	3.1×10^{20}	9.0×10^{20}
Bajo	Amarillo	5.7	6.0×10^{18}	3.1×10^{20}
Mínimo	Blanco	4.6	—	6.0×10^{18}

Tabla 2. Sistema de clasificación de amenaza sísmica de siete niveles de SERRA/MEL (fuente: [3,4]). El SIGSA de Manabí-Esmeraldas — clasificado como Muy Alto — corresponde a la zona del terremoto de Pedernales de 2016 (Mw 7.8). Cada nivel está vinculado a un umbral energético específico y a una Magnitud Máxima Esperada, permitiendo traducción directa en parámetros de diseño ingenieril.

6. Aplicación Cantonal: 30 Cantones del Ecuador (2022)

6.1 Alcance y Metodología

La aplicación cantonal de SERRA/MEL [7], desarrollada a través del trabajo de titulación de Intriago y Villavicencio (2022) supervisado por el autor, representa el despliegue más granular del framework hasta la fecha. Treinta de los cantones más poblados y sísmicamente activos del Ecuador — todos con poblaciones superiores a 80.000 habitantes — fueron analizados: Cuenca, Cañar, Riobamba, Latacunga, Machala, Esmeraldas, Atacames, Guayaquil, Daule, Durán, Milagro, Ambato, Loja, Babahoyo, Quevedo, Portoviejo, Chone, Manta, Quito, Santa Elena, El Empalme, Pasaje, Santo Domingo, Lago Agrio, Samborondón, Rumiñahui, El Carmen, Cayambe, La Libertad e Ibarra. Para cada cantón se aplicaron las tres herramientas analíticas de SERRA/MEL: curvas de liberación de energía, curvas de profundidad hipocentral y mapas de energía focalizada con ArcMap. La extensión estadística de proyección por media-varianza fue aplicada a los 30 cantones para producir estimaciones del momento de la próxima reactivación con intervalos de confianza del 95%.

6.2 Hallazgo Universal: Reactivación Sin Precedentes en los 30 Cantones

El hallazgo más significativo del estudio cantonal [7] es categórico: todos los 30 cantones estudiados se encuentran, al año 2022, en una fase activa de reactivación sísmica. En varios cantones mayores, los niveles actuales de liberación de energía superan todos los precedentes en el registro instrumental de 122 años — expresión física directa de la reactivación a escala nacional que SERRA/MEL predijo en el año 2000 y que se ha estado desarrollando desde entonces. Este hallazgo no es coincidental ni aislado: es la manifestación a escala local del aumento post-2000 en liberación de energía sísmica que fue predicho por las curvas de energía nacionales y que ahora es visible en todos los centros poblados mayores del Ecuador.

6.3 La Correlación Profundidad-Energía: La Condición Más Destructiva

El análisis de profundidad hipocentral en los 30 cantones [7] confirma la correlación entre etapa de reactivación y perfil de profundidad que SERRA/MEL identifica como una característica física del sistema. Durante los períodos de intensa actividad sísmica, los conteos de eventos superficiales aumentan marcadamente — en el período actual alcanzando niveles 5 a 10 veces superiores a los máximos históricos anteriores en los cantones costeros. Este empuje hacia la superficie es físicamente consistente con el modelo de acumulación de energía de deformación: a medida que el estrés cortical aumenta, las zonas de falla poco profundas que antes estaban en reposo comienzan a rupturarse con mayor frecuencia.

La condición más destructiva que SERRA/MEL puede identificar es la ocurrencia simultánea de alta liberación de energía y hipocentros superficiales: esta configuración entrega la máxima energía de movimiento del suelo a la zona cercana a la superficie donde se ubican las estructuras, sin la atenuación de trayectoria que reduce el impacto de los eventos más profundos. Los 30 cantones del estudio exhiben actualmente esta doble firma — energía elevada y sismicidad superficial creciente — representando una condición de alerta en todo el territorio poblado del Ecuador.

6.4 Guayaquil: Una Reactivación de 27 Años Sin Precedentes

El cantón Guayaquil documenta el caso más extremo entre los 30 cantones [7]. Se identifican ocho picos históricos de reactivación con un intervalo medio inter-reactivación de 15 años (IC 95%: 12-18 años). El pico máximo energético anterior ocurrió en el lustro 1940-1945 a 5.06 veces la energía promedio histórica de lustro. La reactivación actual, que comenzó aproximadamente en 1995 y continúa ininterrumpida al año 2022, ha liberado 4.66×10^{23} ergios en el lustro 2015-2022 — 6.76 veces el promedio histórico, superando el máximo de 1940-1945. Esta fase de reactivación ha durado 27 años — casi el doble del intervalo medio de 15 años — sin signos de declive. En 122 años de registros instrumentales, Guayaquil no había experimentado previamente una reactivación de esta duración e intensidad. La curva de profundidad para Guayaquil registra 130 eventos superficiales en el período actual, frente a picos históricos de 23 (1985-1990) y 36 (2005-2010), confirmando que la intensificación energética está acompañada del máximo potencial de impacto estructural.

6.5 Resumen de Cantones Seleccionados

CANTÓN	AMENAZAS	RECURRENCIA (años)	LUSTRO ACTUAL vs PROM.	PGA MÁX. (gals)	PGA DISEÑO (gals)	ESTADO 2022
Guayaquil	14	12–18	6.76×	477	239	Pico sin precedentes
Quito	9	10–22	0.74×	749	374	Ascendente
Esmeraldas	5	10–22	0.74×	1540	770	Superficial dominante

CANTÓN	AMENAZAS	RECURRENCIA (años)	LUSTRO ACTUAL vs PROM.	PGA MÁX. (gals)	PGA DISEÑO (gals)	ESTADO 2022
Manta	9	9–20	9.96×	580	480	Supera máx. 1940
Portoviejo	9	9–20	9.94×	642	321	Supera máx. 1940
Chone	10	10–19	8.21×	816	408	Supera máx. 1940
Ambato	11	10–17	9.73×	502	251	Supera máx. 1940
Babahoyo	12	9–16	8.86×	393	197	Supera máx. 1940
Atacames	5	10–22	0.74×	1319	659	Superficial dominante
Cuenca	9	10–20	5.83×	473	237	Alto, creciente
Riobamba	11	11–18	3.62×	455	228	Ascendente
Machala	8	10–20	0.57×	464	232	Bajo prom., ascendente
Samborondón	12	8–16	0.31×	449	225	Reactivación temprana

Tabla 3. Parámetros SERRA/MEL para cantones seleccionados (fuente: [7]). 'Lustro actual vs prom.' = razón entre la energía del lustro 2015-2022 y la energía promedio histórica de lustro. PGA diseño = PGA / 2 (factor de reducción inelástico). Todos los cantones confirmados en reactivación activa al año 2022. * Estas aceleraciones son calculadas por medio de leyes de atenuación generadas en los 80s, que hoy son ineficientes, se recomienda revisar estas aceleraciones a la luz de las nuevas aceleraciones calculadas por las fórmulas actualizadas de THEK Research Institute.

7. Aplicación Multinacional, Mapas de Riesgo y el Hallazgo Norte-Sur

SERRA/MEL ha sido aplicado a través de investigaciones de titulación supervisadas en la Universidad de Guayaquil a Ecuador, México, Chile, Venezuela, Colombia, Perú, Japón, Australia, Estados Unidos, Europa y a escala continental [6,7]. Para cada aplicación se ejecutó el flujo de trabajo completo de SERRA/MEL: transformación energética del catálogo USGS, construcción de curvas históricas por zona geológica, identificación de etapas sísmicas, definición de SIGSA, análisis de recurrencia, derivación de ecuaciones polinómicas de comportamiento energético y producción de mapas de energía focalizada con SIG. El agregado de los mapas nacionales, compilado por Pinargote Peralta y Vera Tumbaco (2019) [6] bajo la dirección de Moncayo Theurer, constituye el primer mapa de riesgo sísmico de Latinoamérica producido con el método de energía liberada — un resultado de alcance continental sin precedentes en la literatura regional, que clasifica las fuentes sismogénicas de toda la región en una escala común de energía acumulada, magnitud esperada y potencial de impacto estructural.

El hallazgo más significativo del análisis multinacional [6] es la distinción fundamental entre el comportamiento sísmico de los segmentos norte y sur del sistema de placas Nazca-Sudamericano. En Perú y Chile, los mapas de energía de SERRA/MEL se alinean estrechamente con las normas nacionales de amenaza sísmica: las concentraciones de energía siguen la trinchera de subducción y disminuyen progresivamente con la distancia al interior. En Ecuador, Colombia y Venezuela, sin embargo, la sismicidad está gobernada por focos sismogénicos discretos — SIGSA específicos que acumulan y liberan energía independientemente de su distancia a la trinchera. Este patrón es inconsistente con las normas estándar de amenaza basadas en subducción y explica la inadecuación sistemática de las normas calibradas para Chile/Perú en los países andinos del norte.

Esta distinción norte-sur tiene una explicación mecánica natural en la propuesta del vestigio de la placa del Caribe [2]: si el margen Ecuador-Colombia involucra un fragmento de tercera placa embebido en la interfaz de subducción, el comportamiento sismogénico de ese margen diferiría fundamentalmente de la geometría simple de dos placas que gobierna la zona sur. Los resultados multinacionales de SERRA/MEL proporcionan evidencia observacional que sustenta esta propuesta estructural.

Un segundo hallazgo mayor de la aplicación multinacional es la derivación exitosa de ecuaciones polinómicas de comportamiento energético [6] — expresiones matemáticas de sexto grado que describen cuantitativamente la huella digital sísmica de cada país y permiten la proyección cuantitativa de niveles futuros de liberación de energía. Estas ecuaciones fueron derivadas para Ecuador, Perú, Chile, Venezuela, Colombia y México, y constituyen una contribución al entendimiento sismológico más allá de la cartografía de amenaza: demuestran que el comportamiento sísmico nacional, analizado en el dominio de la energía, sigue un patrón matemáticamente expresable que puede caracterizarse, compararse y proyectarse con precisión cuantitativa.

8. Mapas de Riesgo Sísmico: Construcción y Significado

Los mapas de riesgo sísmico producidos por SERRA/MEL representan la traducción directa del análisis de acumulación de energía en información de amenaza distribuida espacialmente, utilizable para planificación urbana, diseño estructural y gestión de emergencias [3,4,6,7]. A diferencia de los mapas de amenaza sísmica probabilística (PSHA), que expresan la amenaza como probabilidades anuales de excedencia de umbrales de movimiento del suelo, los mapas de riesgo de SERRA/MEL expresan la amenaza como la distribución espacial de la concentración de energía observada en el registro histórico, clasificada por la magnitud del evento dominante que esa concentración implica.

A escala nacional, el Mapa de Potencialidad de Energía Liberada para Guayaquil [3] — producido en 2003-2005 y validado por el evento de Pedernales de 2016 — fue el primer mapa de riesgo sísmico para Ecuador producido con un método energético físicamente fundamentado. A escala continental, la aplicación multinacional [6] produjo el primer mapa de riesgo sísmico basado en

energía para Latinoamérica, identificando y clasificando las fuentes sismogénicas de toda la región desde México hasta Chile en una escala de energía común.

A escala cantonal [7], los mapas de energía focalizada producidos con ArcMap proporcionan a cada administración municipal y comunidad de ingeniería un cuadro espacialmente detallado de las amenazas sismogénicas dentro de su región, incluyendo la distancia a cada amenaza, la energía acumulada en cada SIGSA, la magnitud máxima esperada y la PGA estimada en el centro urbano. Esta es la forma de información de riesgo sísmico más directamente accionable que SERRA/MEL produce, aplicable a la revisión de normas de construcción, la identificación de zonas prioritarias para reforzamiento estructural y la planificación de respuesta de emergencia.

Una ventaja técnica específica de los mapas de riesgo de SERRA/MEL es su capacidad para identificar la contribución relativa de las amenazas cercanas y lejanas. En varios cantones ecuatorianos, el análisis revela que la amenaza energéticamente dominante no es la zona de falla más cercana sino un SIGSA más distante que ha acumulado una porción desproporcionada de la energía regional — un resultado que no emerge de los métodos simples de estimación de amenaza basados en distancia.

9. Implicaciones para las Normas de Diseño Sísmico

Los resultados de SERRA/MEL tienen implicaciones directas para la práctica del diseño estructural sísmico en Ecuador que representan la contribución operativamente más significativa del framework a la ingeniería. La Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-SE-DS (2015) [17] define parámetros sísmicos basados en mapas de amenaza probabilística que no incorporan el comportamiento de focos sismogénicos documentado por SERRA/MEL ni las distinciones de perfil de profundidad que gobiernan la intensidad del impacto estructural.

El estudio cantonal [7] revela aceleraciones de diseño derivadas de la MME del SIGSA más cercano y las leyes de atenuación Moncayo Theurer que difieren sustancialmente de los valores NEC en varios cantones. Para Esmeraldas y Atacames — cantones costeros con sismicidad superficial dominante y valores de PGA máxima de 1.540 y 1.319 gals respectivamente — las aceleraciones de diseño derivadas por SERRA/MEL superan sustancialmente lo que las normas NEC vigentes prescribirían. Para cantones del interior con perfiles de profundidad dominados por sismicidad profunda, los valores NEC pueden ser conservadores respecto a los resultados de SERRA/MEL.

Las cinco leyes de atenuación originales de Moncayo Theurer actualmente incorporadas en SERRA/MEL representan un desarrollo específicamente calibrado a las características del movimiento del suelo en el entorno tectónico ecuatoriano y sudamericano. El uso de relaciones de atenuación calibradas regionalmente reduce la incertidumbre asociada a la aplicación de leyes derivadas globalmente a contextos locales — una fuente significativa de error en la práctica actual de amenaza ecuatoriana.

Más fundamentalmente, el framework SERRA/MEL proporciona la demanda de energía de entrada sísmica — la energía sísmica total por unidad de volumen esperada en un sitio dado,

procedente de un evento de MME a una distancia dada — que los métodos de diseño estructural por energía en la tradición de Akiyama (1985) [8] requieren. Esta conexión entre la caracterización de amenaza energética y el diseño estructural por energía fue la motivación original para el desarrollo de SERRA/MEL y constituye una frontera de investigación que el trabajo abrió: el desarrollo de un ciclo de diseño completo, desde las curvas de liberación de energía tectónica hasta el comportamiento estructural bajo demanda de energía.

10. Conclusiones

El Método de Energía Liberada (SERRA/MEL) constituye un framework físicamente fundamentado, eficiente en datos y escalable para la caracterización del riesgo sísmico, con validación empírica documentada, 25 años de experiencia de aplicación y un cuerpo creciente de investigación de apoyo. Sus contribuciones principales son:

11. La transformación inversa de catálogos sísmicos desde la magnitud hacia el dominio de la energía física (Ec. 1), recuperando información sobre la dinámica de energía cortical que la compresión logarítmica de la escala Richter oculta sistemáticamente [1,2].
12. La curva de liberación de energía — energía versus tiempo — como herramienta diagnóstica primaria, directamente ligada al comportamiento sísmico real de la región analizada y que permite la identificación de etapas de reactivación, medición de niveles de energía, determinación de intervalos de recurrencia y construcción de mapas de riesgo sísmico a escala nacional, regional y cantonal [2,3,4,7].
13. La curva de profundidad hipocentral — perfil de profundidad versus tiempo — que demuestra la correlación entre etapa sísmica y profundidad hipocentral: la sismicidad superficial domina durante la reactivación, la sismicidad profunda durante la recarga. La ocurrencia simultánea de alta energía e hipocentros superficiales es identificada como la condición estructuralmente más destructiva [7].
14. La Ley del 95% de la Energía Liberada, que cuantifica la estructura asimétrica de la sismicidad de subducción y proporciona la justificación física para el enfoque de SERRA/MEL en los grandes eventos infrecuentes como determinantes primarios del riesgo sísmico regional [2,4].
15. El concepto SIGSA, que proporciona un framework espacial tratable para agregar la actividad de redes de fallas complejas en fuentes de energía representativas para la cartografía de riesgo sísmico, sin requerir parámetros empíricos de geometría de falla [2,3].
16. Cinco leyes de atenuación originales Moncayo Theurer calibradas al entorno tectónico sudamericano, proporcionando estimaciones de movimiento del suelo regionalmente apropiadas para aplicaciones de diseño estructural.
17. La extensión estadística de media-varianza, que permite la proyección del momento de las futuras etapas de reactivación a partir de los intervalos inter-reactivación observados, con límites de confianza del 95% [7].

18. Las ecuaciones polinómicas de comportamiento energético (Ec. 6), derivadas de las curvas de liberación de energía de Ecuador, Perú, Chile, Venezuela, Colombia y México, que expresan matemáticamente la huella digital sísmica única de cada país y permiten la proyección cuantitativa del comportamiento sísmico futuro [6].
19. La propuesta tectónica respecto a la presencia de material vestigio de la placa del Caribe entre las placas de Nazca y Sudamericana en Ecuador, expresado a través del sistema de falla Guayaquil-Caracas, que explica el comportamiento de focos sismogénicos del margen andino norte y la distinción fundamental norte-sur en el comportamiento sísmico de Sudamérica [2].
20. Dos validaciones empíricas documentadas: la predicción de 2000-2001 de una nueva etapa de reactivación sísmica desde ese año (validada por el aumento de decenas de veces en la liberación de energía post-2000 documentado en todos los cantones estudiados), y la identificación de 2003-2005 de Manabí-Esmeraldas como zona de amenaza Muy Alta a Alta (validada por el terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016, Mw 7.8) [2,3,4,5,7].
21. Aplicación a 30 cantones ecuatorianos documentando intensidad de reactivación actual sin precedentes en 122 años de registros instrumentales, con Guayaquil experimentando 27 años continuos de reactivación — el más largo de la historia registrada — y liberación de energía a 6.76 veces el promedio histórico [7].
22. Aplicación a Ecuador, México, Chile, Venezuela, Colombia, Perú, Japón, Australia, Estados Unidos, Europa y a escala continental, con producción del primer mapa de riesgo sísmico basado en energía para Latinoamérica y documentación de comportamiento sísmico fundamentalmente diferente entre los segmentos norte y sur del sistema Nazca-Sudamericano [6].

SERRA/MEL no predice fechas específicas ni epicentros de futuros terremotos. Identifica el estado físico de acumulación de energía tectónica, clasifica las amenazas sismogénicas por magnitud esperada y PGA, y proporciona parámetros de amenaza utilizables en ingeniería para el diseño estructural y la gestión del riesgo. Dentro de estos límites apropiados, SERRA/MEL constituye una contribución validada, físicamente transparente y escalable a la evaluación y preparación ante el riesgo sísmico en el mundo y en el sistema de subducción Nazca-Sudamericano, y una plataforma de investigación cuyas implicaciones plenas para el diseño estructural por energía están aún por desarrollar.

Agradecimientos

El autor agradece al Profesor Kenichi Ohi, Universidad de Tokio, por la supervisión y orientación intelectual durante el desarrollo de SERRA/MEL (1999-2000). El autor reconoce al Profesor Vitelmo Bertero por la visión fundacional del diseño sísmico basado en energía y al Profesor Hiroshi Akiyama [8], cuyo libro sobre diseño estructural basado en energía estableció la tradición intelectual dentro de la cual SERRA/MEL fue concebido.

El autor también reconoce al Profesor Otton Lara Montiel, ESPOL, por la colaboración en los levantamientos post-sísmicos en Bahía de Caráquez (1998). La beca JICA (1999-2000) hizo posible la investigación en la Universidad de Tokio. El Proyecto Semilla ESPOL (2003-2005) [3] proporcionó financiamiento institucional para el Mapa de Potencialidad de Energía Liberada de Guayaquil. El estudio cantonal fue desarrollado a través de la investigación de titulación de Joel Intriago Barberán y Paul Villavicencio Caicedo (Universidad de Guayaquil, 2022) [7]. El estudio multinacional fue desarrollado a través de la investigación de titulación de Ernesto Pinargote Peralta y Bryan Vera Tumbaco (Universidad de Guayaquil, 2019) [6]. Los datos sísmicos fueron obtenidos del Centro Nacional de Información sobre Terremotos del USGS [16].

Referencias y Bibliografía

- [1] Gutenberg, B. y Richter, C.F. (1956). Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46(2), 105–145.
- [2] Moncayo Theurer, M. (2000). Energy-Released Approach: On the Seismic Behavior Characteristics of Ecuador. *Memorias de la 6ª Conferencia Internacional de Zonificación Sísmica*. Oakland, California, EE.UU. Earthquake Engineering Research Institute. [Fecha de prioridad de divulgación pública: Diario El Universo, Guayaquil, octubre 2001. Premio al Mérito Científico, Honorable Congreso Nacional del Ecuador. Propone hipótesis de vestigio de placa del Caribe y falla Guayaquil-Caracas.]
- [3] Moncayo Theurer, M. (2005). Mapa de Potencialidad de Liberación de Energía Sísmica para la Ciudad de Guayaquil. Proyecto Semilla, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Guayaquil, Ecuador. [Proyecto ganador de ESPOL Proyecto Semilla 2003-2005 como el de mayor relevancia científica. Identificó sismo de Mw 7.8 en Manabí, confirmado por el terremoto de Pedernales en 2016.]
- [4] Moncayo Theurer, M. (2016). Enfoque de Energía Sísmica Liberada: En Busca de las Características del Comportamiento Sísmico de Ecuador e Identificación de las Amenazas Sísmicas. *Revista Alternativas*, ISSN 1390-1915, Vol. 17, No. 3, pp. 224–230. <https://doi.org/10.23878/alternativas.v17i3.231>. [Paper presentado originalmente en el Congreso Internacional de Ingeniería Sísmica, Universidad Católica Santiago de Guayaquil, octubre de 2015, cinco meses antes del terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016 (Mw 7.8). Publicado en Revista Alternativas en 2016.]
- [5] Castilla, E. y Sánchez, R. (2014). Análisis de la Sismicidad en la Costa Pacífica Colombiana: Herramienta para Definir Fuentes de Tsunami. *Boletín Científico CIOH*, 32, 135–147. [Corroboración independiente: probabilidad del 99% de Mw 7.8 en 100 años en la zona costera colombo-ecuatoriana; período de retorno de 15.65 años superado en 2014.]
- [6] Pinargote Peralta, E.A. y Vera Tumbaco, B.J. (2019). Análisis Comparativo del Método Estadístico de Gumbel con el Método de Energía Liberada para la Determinación del Comportamiento Sísmico en Países de Sudamérica. Trabajo de Titulación, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad de Guayaquil. Tutor: Moncayo Theurer, M. [Aplicó SERRA/MEL a Ecuador, México, Chile, Venezuela, Colombia, Perú; derivó ecuaciones polinómicas de comportamiento energético por país; produjo mapa de riesgo sísmico latinoamericano; identificó distinción norte-sur de comportamiento sísmico.]
- [7] Intriago Barberán, J. y Villavicencio Caicedo, P. (2022). Caracterización del Comportamiento Sísmico de los Cantones más Populosos del Ecuador mediante el Método de Energía Liberada. Trabajo de Titulación, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad de Guayaquil. Tutor: Moncayo Theurer, M. [Aplicó SERRA/MEL a 30 cantones ecuatorianos; introdujo curvas de profundidad hipocentral;

- introdujo proyección estadística media-varianza de etapas de reactivación; documentó reactivación sin precedentes en todos los 30 cantones al año 2022.]
- [8] Akiyama, H. (1985). *Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings*. University of Tokyo Press, Tokio. [Padre del diseño estructural basado en energía en Japón; progenitor intelectual de la tradición energética en la que SERRA/MEL fue desarrollado.]
- [9] Gumbel, E.J. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, Nueva York.
- [9b] Williams, R.S. y Reifsnider, K.L. (1978). Strain Energy Released Rate Method for Predicting Failure Modes in Composite Materials, Parte I. *Memorias del 11° Simposio Nacional de Mecánica de Fractura*, pp. 629–650. [Fuente de la Teoría de la Potencialidad de Energía de Deformación Liberada (SERPT) aplicada en SERRA/MEL.]
- [10] Wells, D.L. y Coppersmith, K.J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002.
- [11] Strasser, F.O., Arango, M.C. y Bommer, J.J. (2010). Scaling of the Source Dimensions of Interface and Intraslab Subduction-Zone Earthquakes with Moment Magnitude. *Seismological Research Letters*, 81(6), 941–950.
- [12] Heuret, A., Lallemand, S., Funiciello, F., Piromallo, C. y Faccenna, C. (2011). Physical Characteristics of Subduction Interface Type Seismogenic Zones Revisited. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(1).
- [13] Hearn, E.J. (1977). *Mechanics of Materials*, Volumen 1. Pergamon Press Ltd., Oxford. [Fuente del Teorema de Castigliano aplicado en SERRA/MEL.]
- [14] Lara, O. (1986). *Seismic Risk Study for a Hydroelectrical Power System in Ecuador*. *Memorias de la 3ª Conferencia Latinoamericana de Ingeniería Sísmica*, ESPOL-OEA.
- [14b] Cornell, C.A. (1979). *Seismic Risk Analysis*. *Memorias de la 3ª Conferencia Canadiense de Ingeniería Sísmica*.
- [15] Youngs, R.R., Chiou, B.S.J., Silva, W.J. y Humphrey, J.R. (1988). Strong Ground Motion Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58–73. [Nota: SERRA/MEL incorpora actualmente cinco leyes de atenuación originales Moncayo Theurer desarrolladas para el entorno tectónico sudamericano, en adición a estas referencias clásicas.]
- [16] Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Catálogo del Centro Nacional de Información sobre Terremotos. Disponible en: <https://earthquake.usgs.gov>. [Fuente primaria de datos sísmicos para todas las aplicaciones de SERRA/MEL.]
- [17] NEC-SE-DS (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción: Peligro Sísmico, Diseño Sismo Resistente*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Ecuador.
- [18] Kanamori, H. y Anderson, D.L. (1975). Theoretical Basis of Some Empirical Relations in Seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(5), 1073–1095.
- [19] Ye, L., Kanamori, H., Avouac, J.P., Li, L., Cheung, K.F. y Lay, T. (2016). The 16 April 2016, Mw 7.8 Ecuador Earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 454, 248–258.
- [20] Castigliano, C.A.P. (1879). *Théorie de l'équilibre des systèmes élastiques et ses applications*. A.F. Negro, Turín.

Sobre el Autor

Marcelo Moncayo Theurer, MSc, es ingeniero civil y estructural especializado en diseño sismorresistente y evaluación de amenaza sísmica. Es CEO del THEK Research Institute, un think tank dedicado a la investigación e innovación en riesgo sísmico e IA, y Profesor Titular de la Universidad de Guayaquil. Posee un título de postgrado en Ingeniería de Terremotos del Building Research Institute (IISEE), Japón (beca JICA, 1999-2000), y realizó investigación de

tesis en la Universidad de Tokio, Instituto de Ciencia Industrial, Laboratorio de Estructuras de Acero, bajo la dirección del Profesor Kenichi Ohi. Es recipiente del Premio al Mérito Científico del Honorable Congreso Nacional de la República del Ecuador, otorgado por su identificación pública de la reactivación sísmica del Ecuador en 2001. Su programa de investigación abarca el análisis de energía sísmica, las normas de diseño estructural basado en energía, el desarrollo de cinco leyes de atenuación originales para el entorno tectónico sudamericano, y la investigación de anomalías tectónicas en el margen de subducción Ecuador-Colombia. Ha sido la voz científica líder del Ecuador en materia de riesgo sísmico durante más de 25 años.

© 2025 Marcelo Moncayo Theurer. Todos los derechos reservados. THEK Research Institute.

Advanced Scientific, Engineering & Technological Think Tank

Fecha de prioridad de divulgación pública: octubre de 2001 (Diario El Universo, Guayaquil, Ecuador).

Preprint depositado en Zenodo y arXiv. La metodología SERRA/MEL y todas las contribuciones originales aquí descritas fueron desarrolladas por el autor entre 1999 y 2025.