UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Evaluación de la medida de intensidad sísmica “SaRatio” como predictor de la efectividad de los amortiguadores de masa sintonizada (AMS) en la reducción de la respuesta sísmica de edificios.

Memoria de Título presentada por

Javiera Francisca Milla Almonte

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Cristian Emanuel Cruz Doggenweiler
Enero de 2025

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

Evaluación de la medida de intensidad sísmica "SaRatio" como predictor de la efectividad de los amortiguadores de masa sintonizada (AMS) en la reducción de la respuesta sísmica de edificios.

AUTOR:

Javiera Francisca Milla Almonte

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	Nombre	Firma
Prof. Guía	Cristian Emanuel Cruz Doggenweiler	.....
Miembro 1 Comisión	.....	.....
Miembro 2 Comisión	.....	.....

Valparaíso/Santiago, Chile, Enero de 2025

EVALUACIÓN DE LA MEDIDA DE INTENSIDAD SÍSMICA "SARATIO" COMO PREDICTOR DE LA EFECTIVIDAD DE LOS AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADA (AMS) EN LA REDUCCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICIOS.

Javiera Francisca Milla Almonte, Cristian Emanuel Cruz Doggenweiler

Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Este estudio analizó la influencia de la forma espectral en la eficiencia de los amortiguadores de masa sintonizada (AMS), dispositivos ampliamente utilizados para reducir la respuesta estructural frente a sismos. Para efectos de esta memoria, la eficiencia del AMS se definió como un coeficiente de atenuación de la respuesta estructural en términos de desplazamiento. Se utilizó una base de datos de 3738 registros sísmicos chilenos, proporcionados por el Centro Sismológico Nacional (CSN), con el objetivo de evaluar la correlación lineal entre la métrica de intensidad SaRatio y la efectividad del AMS en un sistema de un grado de libertad (1GDL).

Los parámetros óptimos del AMS se determinaron mediante las ecuaciones propuestas por Lin et al. (1994), mientras que la respuesta de desplazamiento de la estructura primaria y el AMS se calcularon utilizando el método de recurrencia y el enfoque de espacio-estado, respectivamente. Posteriormente, se graficaron los resultados y se analizó la correlación lineal entre las variables mediante regresión lineal, evaluando los parámetros de ajuste del modelo, tales como el intercepto, la pendiente, p value y, principalmente, el coeficiente de correlación (R^2). Este análisis se repitió para seis períodos, desde 0.5 [s] hasta 3.0 [s], obteniendo un valor máximo de R^2 igual a 0.270 para un período T = 0.5 [s], lo que confirma una relación entre SaRatio y la eficiencia del AMS.

Finalmente, se incorporaron cinco variables adicionales al modelo de regresión lineal original, que evalúa la relación entre la eficiencia del AMS y SaRatio, para analizar si mejoraban el coeficiente de correlación: duración acotada del registro sísmico, tipo de suelo, aceleración espectral, media geométrica de la respuesta espectral de aceleración y velocidad incremental filtrada. Sin embargo, ninguna de estas variables produjo un aumento significativo en el coeficiente de determinación (R^2), ya que el valor de R^2 no aumentó en más de 0.05 al incluirlas, lo que sugiere que no tienen una relación significativa con la eficiencia del AMS.

Palabras claves

Amortiguador de masa sintonizada (AMS), SaRatio, eficiencia del AMS, método de recurrencia, enfoque espacio-estado, coeficiente de determinación (R^2), duración acotada del registro, tipo de suelo, aceleración espectral, media geométrica de la respuesta espectral de aceleración y velocidad incremental filtrada.

Contenido

1 Introducción 5
2 Objetivos 7
2.1 Objetivo general 7
2.2 Objetivos específicos 7
3 Marco teórico 8
3.1 Ecuación de movimiento y formulación del problema Espacio-Estado 8
3.2 Parámetros Óptimos de Sintonía 9
3.3 Eficiencia del amortiguador de masa sintonizada 10
3.4 Sa Ratio 11
3.5 Duración Acotada 11
3.6 Velocidad incremental filtrada 12
4 Metodología 13
4.1 Registros sísmicos 13
4.2 Propiedades dinámicas de la estructura primaria y AMS 14
4.3 Cálculo de respuesta estructural 15
4.4 Cálculo de la eficiencia del AMS 15
4.5 Cálculo de Sa Ratio y determinación de la ventana óptima de periodos 15
4.6 Otras variables de interés 15
5 Análisis y resultados 16
5.1 Sa Ratio: Parámetros óptimos para la ventana de periodos 16
5.2 SaRatio 17
5.3 Tipo de suelo 21
5.4 Duración 25
5.5 Medidas de intensidad 27
6 Conclusiones 34
7 Referencias 35

1 Introducción

En Chile y en otros países del mundo, una gran cantidad de edificios y estructuras se han visto afectadas por sismos de baja, mediana y alta intensidad, presentando desde daños leves hasta colapsos completos de la estructura (Celedon, 2011). Ejemplos de dichos sismos son el terremoto de Christchurch, Nueva Zelanda el año 2011 o el terremoto de Maule ocurrido en Chile el año 2010. Es por esta razón, que en las últimas décadas se ha prestado una gran atención a la investigación y el desarrollo de dispositivos de control estructural, con especial énfasis en la disminución de las vibraciones de edificios y puentes debido a cargas de viento o cargas sísmicas (Soong & Spencer, 2002), entre los cuales destacan los amortiguadores de masa sintonizada (AMS).

Los amortiguadores de masa sintonizados (AMS) son dispositivos de control que están compuestos por una masa, un elemento de rigidez y un elemento de amortiguación viscosa. Estos dispositivos, son capaces de reducir la vibración estructural mediante la transferencia de energía desde la estructura protegida al dispositivo de control (Domizio et al. 2015).

Desde que se implementó el primer amortiguador de masa sintonizada (AMS) en la Torre John Hancock en 1976, su uso se ha extendido a diversos edificios alrededor del mundo con el objetivo de reducir la respuesta estructural frente a sismos, tales como la estructura Gold Tower en Japón, Taipei 101 ubicada en la ciudad de Taiwán o la Cámara Chile de la Construcción ubicada en nuestro país (Figura 1.1).



Figura 1.1. Amortiguador de masa sintonizada en la Cámara Chilena de la Construcción (CChC).
Fuente: SyA Ingenieros Consultores (2019).

La implementación de un amortiguador de masa sintonizada (AMS) en las estructuras generalmente ayuda a mitigar la respuesta sísmica durante un terremoto. Sin embargo, en algunos casos, su efectividad puede ser limitada o incluso contraproducente, dependiendo de factores específicos relacionados con la estructura y el sismo (Cortés, 2023). En consecuencia, a lo largo de los años diversos investigadores han estudiado la eficiencia de los AMS en la respuesta sísmica de edificios. Villaverde (1994) investigó la efectividad sísmica de los AMS mediante el estudio de 3 estructuras sometidas a 9 registros sísmicos reales, obteniendo en algunos casos un gran desempeño del AMS, mientras que en otros casos el efecto del amortiguador fue aproximadamente nulo. Un año más tarde, Sadek et al. (1996) determinaron que los AMS son eficaces siempre que se diseñen bajo sus parámetros óptimos, es decir, considerando la razón óptima de sintonización de frecuencias del sistema acoplado y la fracción de amortiguamiento óptima del AMS. Por el contrario, Domizio et al. (2015) concluyeron que cuando el contenido de

frecuencias del sismo difiere de la frecuencia del modo fundamental de la estructura, la adición del AMS es ineficaz.

Por su parte, Cortés (2023) mediante simulaciones de una estructura de un grado de libertad equipada con un AMS óptimo y sometida a las excitaciones de los registros sísmicos del terremoto de Kobe de 1995 (RSN 1101) y del terremoto de Loma Prieta de 1989 (RSN 803), concluyó que el AMS reduce significativamente la respuesta estructural cuando el periodo de la estructura sin AMS coincide con un peak del espectro de aceleraciones. Este hallazgo pone en manifiesto la importancia de investigar la relación entre la forma espectral de un registro sísmico y la eficiencia de un AMS.

La forma espectral de un registro depende principalmente del contenido en frecuencia y duración del movimiento sísmico. A su vez, estos parámetros dependen de la magnitud del terremoto y de la distancia a fuente que se encuentre el sitio (Miranda et al. 2020). Una medida de intensidad que cuantifica el efecto de la forma espectral es SaRatio. Esta medida de intensidad fue propuesta por Eads et al. (2016) y se define como el cociente entre la ordenada espectral, amortiguada al 5%, evaluada en un periodo T y la media geométrica del espectro en una ventana de periodos en torno a T. Eads et al. (2016) propusieron esta métrica como un indicador capaz de cuantificar la forma espectral de un registro sísmico en relación con su capacidad para causar el colapso de una estructura. Años más tarde, Miranda et al. (2020) demostraron que SaRatio se correlaciona de manera significativa con los factores de modificación de amortiguamiento. Es de interés, entonces, determinar si existe correlación entre la medida de intensidad SaRatio y la efectividad del AMS.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la influencia de la forma espectral en la eficiencia del amortiguador de masa sintonizada (AMS). Para efectos de este trabajo, la eficiencia se entiende como un coeficiente de atenuación calculado como la raíz de la media cuadrática (RMS) de la historia de desplazamientos de la respuesta estructural de la estructura con AMS respecto de la misma estructura sin AMS. La forma espectral se estudia mediante la medida de intensidad SaRatio.

Para alcanzar este objetivo, se calculan los valores de SaRatio y la eficiencia del AMS para 3738 registros sísmicos, considerando un sistema acoplado de 2GDL con un periodo específico del oscilador. Primero, se realiza un análisis para determinar cuál es la ventana de periodos, determinada por las constantes positivas a y b utilizadas en el cálculo de SaRatio, que maximizan la correlación con la eficiencia del AMS. Luego, se cuantifica la mejor correlación obtenida para un rango amplio de periodos estructurales. Finalmente, se estudia el efecto de otros factores como el tipo de suelo, la duración del registro, el valor de la ordenada espectral Sa, el valor de la ordenada espectral promedio Sa_{avg}, y la aceleración incremental filtrada, FIV3.

Con respecto al desarrollo de este trabajo, se organiza en tres secciones principales. En primer lugar, se desarrolla el marco teórico que abarca los principales conceptos sísmicos evaluados en esta memoria. A continuación, se describe la metodología para evaluar la posible correlación lineal entre la eficiencia del AMS y la métrica de forma espectral SaRatio. Posteriormente, se amplía el análisis hacia otras variables y medidas de intensidad para examinar su relación con la eficiencia del AMS. Finalmente, se presentan los de resultados obtenidos y las conclusiones más relevantes.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

El objetivo general de esta investigación es evaluar una metodología capaz de identificar la correlación entre la forma espectral de un registro sísmico y la efectividad de un amortiguador de masa sintonizada en edificios equipados con dicho dispositivo de control estructural.

2.2 Objetivos específicos

Para llevar a cabo el objetivo general de este trabajo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

(i) Determinar si existe correlación entre la eficiencia del amortiguador de masa sintonizada (AMS) y SaRatio para una estructura de un grado de libertad (1GDL), utilizando un conjunto de 3738 registros sísmicos representativos de la sismicidad Chilena.

(ii) Determinar los valores óptimos de los parámetros de entrada (a y b) necesarios en el cálculo de SaRatio de modo que maximicen la correlación con la eficiencia del AMS para seis periodos de interés.

(iii) Analizar la influencia de diversas características de los registros sísmicos, como la duración, aceleración espectral (Sa), aceleración espectral promedio (Sa_{avg}), velocidad incremental filtrada (FIV3) y tipo de suelo en la efectividad del amortiguador de masa sintonizada (AMS).

3 Marco teórico

3.1 Ecuación de movimiento y formulación del problema Espacio-Estado

La Figura 3.1.1 muestra una representación esquemática en dos dimensiones de una estructura primaria de N grados de libertad con un AMS en su N-ésimo grado de libertad, representado por un sistema de un grado de libertad. Se define como estructura primaria al sistema sin considerar el AMS.

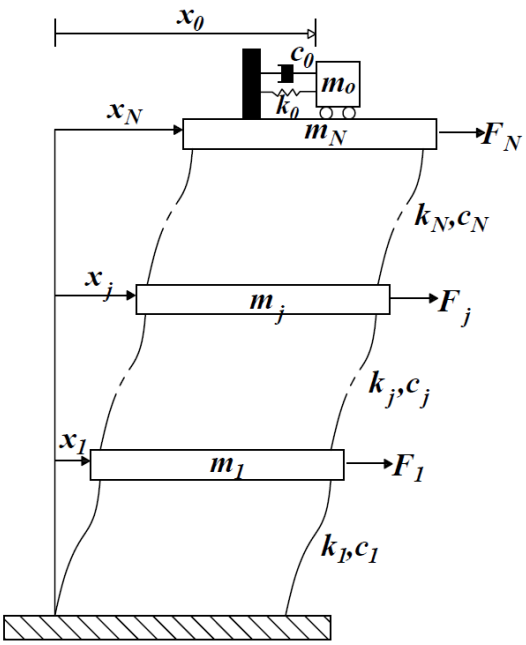


Figura 3.1.1. Representación esquemática de una estructura de N grados de libertad equipada con un AMS.

Las ecuaciones (1) y (2) representan la ecuación de movimiento de la estructura primaria sin incluir la influencia del AMS sobre ella y del AMS, respectivamente.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{r\}\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

$$m_0\ddot{x}_0(t) + c_0(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_N(t)) + k_0(x_0(t) - x_N(t)) = -m_0\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

Donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son matrices cuadradas de orden N que representan las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura primaria, respectivamente. Asimismo, m_0, c_0 y k_0 corresponden a la masa, amortiguamiento y rigidez del AMS. $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, y $\{x(t)\}$ corresponden a los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento relativos a la base de los N grados de libertad de la estructura primaria, mientras que, $\ddot{x}_0(t)$, $\dot{x}_0(t)$ y $(x_0(t)$ corresponden a la aceleración, velocidad y desplazamiento relativos a la base del AMS. Por su parte, $\{r\}$ es el vector de influencia, el cual indica cómo se relaciona la aceleración de cuerpo rígido inducida por el movimiento en la base con los distintos grados de libertad de la estructura. Como el edificio únicamente posee grados de libertad horizontales, el vector de influencia está conformado únicamente por valores unitarios, es decir, $\{r\} = 1$. Por último, dado que se considera que la excitación externa es puramente horizontal se tiene que $\{F_j(t)\} = -[M]\{r\}\ddot{x}_g(t)$ y $\{F_0(t)\} = -m_0\ddot{x}_g(t)$, con $\ddot{x}_g(t)$ igual a la excitación basal de aceleración del suelo.

La ecuación (3) muestra la ecuación de movimiento de la estructura primaria considerando la influencia del AMS sobre esta.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} - [c_0(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_N(t)) + k_0(x_0(t) - x_N(t)]\{\rho\} = -[M]\{1\}\ddot{x}_g(t) \quad (3)$$

Donde $\{\rho\}$ es un vector indicador de la ubicación del AMS, por ende, $i_N = 1$ y $i_j = 0$ para cualquier grado de libertad j≠N.

La ecuación de movimiento del sistema acoplado Estructura-AMS, se puede escribir matricialmente tal como indica la ecuación (4).

$$[M^s]\{\ddot{x}^s(t)\} + [C^s]\{\dot{x}^s(t)\} + [K^s]\{x^s(t)\} = -[M^s]\{1\}\ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

El superíndice "s" representa las propiedades del sistema acoplado estructura-AMS. Las matrices $[M^s]$, $[C^s]$ y $[K^s]$ corresponden a las matrices cuadradas de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema acoplado, respectivamente, y poseen un orden N+1, con N la cantidad de grados de libertad de la estructura primaria; $\{\ddot{x}^s(t)\}$, $\{\dot{x}^s(t)\}$ y $\{x^s(t)\}$ corresponden a los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento relativos a la base del sistema acoplado.

Por otro lado, debido a que las estructuras con amortiguadores de masa sintonizada poseen amortiguamiento no clásico, no es posible obtener la respuesta estructural del sistema acoplado mediante un análisis de superposición modal ordinario. En vez, la resolución se realiza reescribiendo la ecuación de movimiento en la forma de espacio-estado y resolviendo como un sistema espacio-estado discreto. Las ecuaciones (5) a (10) describen el problema en esta formulación.

$$\{\dot{y}^s(t)\} = [A^s]\{y^s(t)\} + [B^s]\ddot{x}_g(t) \quad (5)$$

$$[A^s] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M^s]^{-1}[K^s] & -[M^s]^{-1}[C^s] \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[B^s] = \begin{bmatrix} \{0\} \\ -\{1\} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\{z^s(t)\} = \left[\tilde{C}^s\right]\{y^s(t)\} + [D^s]\ddot{x}_g(t) \quad (8)$$

$$\left[\tilde{C}^s\right] = \begin{bmatrix} [I] & [0] \\ [0] & [I] \\ -[M^s]^{-1}[K^s] & -[M^s]^{-1}[C^s] \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[D^s] = \begin{bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ -\{1\} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Donde $\{y^s(t)\} = \{x^s(t) \quad x^s(t)\}^T$ es el vector de estados del sistema y $\{\dot{y}^s(t)\}$ corresponde a la derivada en función del tiempo del vector de estados. Por su parte, la matriz $[A^s]$ se define como la matriz de estados del sistema con [0] e $[I]$ como las matrices nula e identidad de orden N+1, respectivamente, mientras que $[B^s]$ es la matriz de entradas del sistema. Por último, $\{z^s(t)\}$, $\left[\tilde{C}^s\right]$ y $[D^s]$ corresponden al vector de respuesta del sistema, la matriz de respuesta y la matriz de transmisión directa o "feedthrough", respectivamente.

3.2 Parámetros Óptimos de Sintonía

La Figura 3.2.1 muestra una representación esquemática en dos dimensiones de una estructura primaria de un grado de libertad equipada con un AMS.

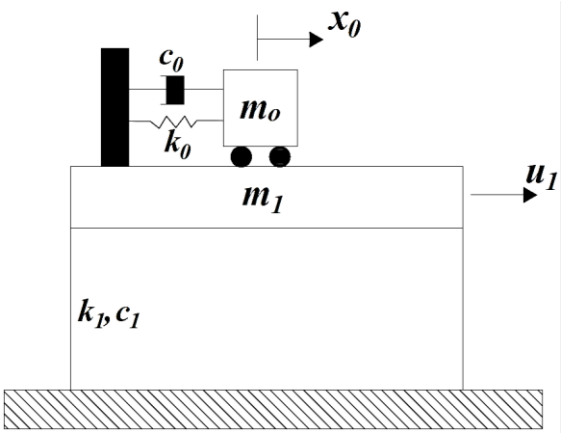


Figura 3.2.1. Representación esquemática de una estructura de 1GDL equipada con un AMS.

Donde m_i, k_i, c_i y u_i corresponden a la masa, constante de rigidez lateral, constante de amortiguamiento y desplazamiento relativo del sistema. En este caso, el subíndice 1 y 0 indican la estructura primaria y el AMS, respectivamente.

Se definen como *parámetros óptimos de sintonía* a la frecuencia natural de vibrar y la fracción de amortiguamiento crítico del AMS que maximizan la efectividad del dispositivo. En la literatura, estos parámetros se calculan a partir de la razón óptima de sintonización de frecuencias Rf^{opt} y y la razón de masas μ. La razón de frecuencias Rf^{opt} se define en la ecuación (11) como el cociente entre la frecuencia natural de vibración del AMS, f_{AMS}, y la frecuencia del modo controlado de la estructura primaria f_n. La ecuación (12) define la razón de masas del sistema como el cociente entre la masa del amortiguador, m_o, y la masa modal del modo controlado m_r. Para el caso particular en donde la estructura primaria corresponda a un sistema de un único grado de libertad, la masa modal del modo controlador de la estructura primaria equivale a la masa total de la estructura primaria, es decir, $m_r = m_1$ (Rana & Soong, 1998).

$$Rf^{opt} = \frac{f_{AMS}}{f_n} \tag{11}$$

$$\mu = \frac{m_o}{m_r} \tag{12}$$

Lin et al. (1994) proponen las ecuaciones (13) y (14) para definir los parámetros óptimos de sintonía del amortiguador de masa sintonizada ante cargas sísmicas.

$$Rf^{opt} = \left(\frac{a}{1+\mu}\right)^b, a = 1 - \frac{\xi_1}{4}, \quad b = 1.35e^{3.2\xi_1} \tag{13}$$

$$\xi_0^{opt} = 0.46\mu^{0.48} \tag{14}$$

Donde μ representa la razón de masas del sistema y ξ_1 corresponde a la fracción de amortiguamiento del primer modo de la estructura primaria.

3.3 Eficiencia del amortiguador de masa sintonizada

En el presente trabajo de investigación, la eficiencia del amortiguador de masa sintonizada (AMS) se define como un coeficiente de atenuación de la respuesta de desplazamiento de la estructura, que representa la capacidad que posee el amortiguador de reducir la respuesta del sistema primario una vez incorporado el AMS, para un determinado registro sísmico.

Tal como sigue la ecuación (15), la eficiencia del AMS o factor de atenuación de la respuesta (η) se calcula como la razón entre la raíz cuadrada media (RMS) de los desplazamientos del sistema con y sin AMS, para un registro sísmico dado.

$$\eta = \frac{\sqrt{\frac{1}{\tau}\sum_{i=1}^{\tau}\left|\left(u_i^{con\,AMS}\right)^2\right|}}{\sqrt{\frac{1}{\tau}\sum_{i=1}^{\tau}\left|\left(u_i^{sin\,AMS}\right)^2\right|}} \quad (15)$$

Donde τ, $u_i^{\text{con }AMS}$, $u_i^{\text{sin }AMS}$ corresponden al número de puntos de la señal, el valor de desplazamiento considerando el amortiguador en el instante de tiempo $t = i\Delta t$ y el valor de desplazamiento sin amortiguador en el mismo instante de tiempo $t = i\Delta t$, respectivamente; y Δt corresponde al paso de tiempo de la señal.

En otras palabras, si al incorporar el AMS la respuesta de desplazamiento de la estructura se reduce, entonces el factor de atenuación es menor que 1. Por el contrario, si la respuesta de desplazamiento de la estructura aumenta, entonces el factor de atenuación es mayor que 1. En consecuencia, se considera que el despeño del AMS es mejor (o más eficiente) mientras más pequeño sea el valor de η.

3.4 Sa Ratio

SaRatio se define como la ordenada espectral ($Sa(T1)$) con un amortiguamiento del 5% en el periodo de interés normalizada por la media geométrica de las ordenadas de aceleraciones espectrales con un amortiguamiento del 5% en un rango del mismo periodo delimitado por dos parámetros no negativos, a y b (Eads et al., 2016). Las ecuaciones (16) y (17) indican esta métrica de forma espectral.

$$SaRatio = \frac{Sa(T1)}{Sa_{avg}([a \cdot T1, b \cdot T1])} \quad (16)$$

$$Sa_{avg}([a \cdot T1, b \cdot T1]) = \left(\prod_{i=1}^{M} Sa(Ti)\right)^{1/M} \quad (17)$$

Donde T1 corresponde al periodo de análisis mientras que, a y b son constantes no negativas definidas como el límite inferior y superior de la ventana de periodos de análisis, respectivamente. A su vez, se cuenta con M número de datos para obtener la media geométrica de la respuesta espectral de aceleración Sa_{avg} en un paso temporal del periodo igual a 0.01 [s].

3.5 Duración Acotada

Se define la duración acotada t_{90} de un registro sísmico como la ventana de tiempo donde se acumula desde el 5% al 95% de la intensidad de Arias de la señal. Es decir,

$$t_{90} = t_f - t_i \quad (18)$$

$$I_A(t) = \frac{\pi}{2g}\int_0^t a^2(\tau)d\tau \quad (19)$$

$$t_i = arg_t\left\{\frac{I_A(t)}{I_A(t = t_d)} = 0.05\right\} \quad (20)$$

$$t_f = arg_t\left\{\frac{I_A(t)}{I_A(t = t_d)} = 0.95\right\} \quad (21)$$

Donde a(t) corresponde a la aceleración del suelo, g a la aceleración de gravedad y t_d corresponde a la duración total del registro.

3.6 Velocidad incremental filtrada

La velocidad incremental filtrada (FIV3) es una métrica propuesta como una mejora a las medidas de intensidad sísmica tradicionales para evaluar el colapso estructural. Dávalos & Miranda (2019) definen FIV3 como una métrica dependiente del período que se calcula sumando los tres pulsos de velocidades incrementales locales más grandes que se obtienen de un registro sísmico de aceleraciones del suelo filtradas. El filtro corresponde a un paso bajo que permite eliminar las componentes de alta frecuencia que no afectan en gran medida a la estructura. En particular, esta medida de intensidad ha demostrado ser altamente eficiente para estimar la fragilidad de colapso de estructuras de marcos de acero sometidas a movimientos sísmicos (Dávalos & Miranda 2019).

4 Metodología

En esta sección se establecen las bases de la metodología utilizada para evaluar la eficiencia del amortiguador de masa sintonizada (AMS) frente a 3738 registros sísmicos. En primer lugar, se describe la base de datos con sus características más relevantes, tales como sus componentes horizontales, frecuencia, magnitud, tipo de suelo, entre otras. Luego, se definen las propiedades dinámicas del sistema estructural primario, simulado como un sistema de un grado de libertad (1GDL), y del AMS, considerado como un oscilador armónico amortiguado de un grado de libertad sintonizado empleando las ecuaciones (13) y (14). Posteriormente, se detalla el cálculo de la respuesta estructural de desplazamiento de ambos sistemas por separado, junto con la eficiencia del AMS y la medida de intensidad SaRatio. Luego se describe el proceso para determinar la ventana óptima de periodos que maximiza la correlación entre la eficiencia del AMS y SaRatio. Finalmente, se presenta el análisis otras variables de interés, tales como la duración acotada, tipo de suelo, la aceleración espectral, la aceleración espectral promedio y la velocidad incremental filtrada, evaluando su correlación con la eficiencia del AMS.

4.1 Registros sísmicos

Se utilizó una base de datos de 3738 registros sísmicos chilenos procesados de aceleración, obtenida del Centro Sismológico Nacional (CSN). En cuanto a los datos o características que incluye esta base de datos se encuentran: dos componentes horizontales perpendiculares de aceleración registrada, estación, frecuencia, magnitud, PGA de las componentes de aceleración, tipo de suelo según la clasificación indicada en la norma NCh433, profundidad, duración, entre otras.

Las Figuras 4.1.1 y 4.1.2 muestran en detalle el rango de valores que posee la base de datos tanto de magnitud (M_W), distancia a la ruptura (R_{rup}) como de tipo de suelo, que se clasifica según la norma NCh433 en suelo tipo A, B, C, D, E, F y sin clasificar (SC).

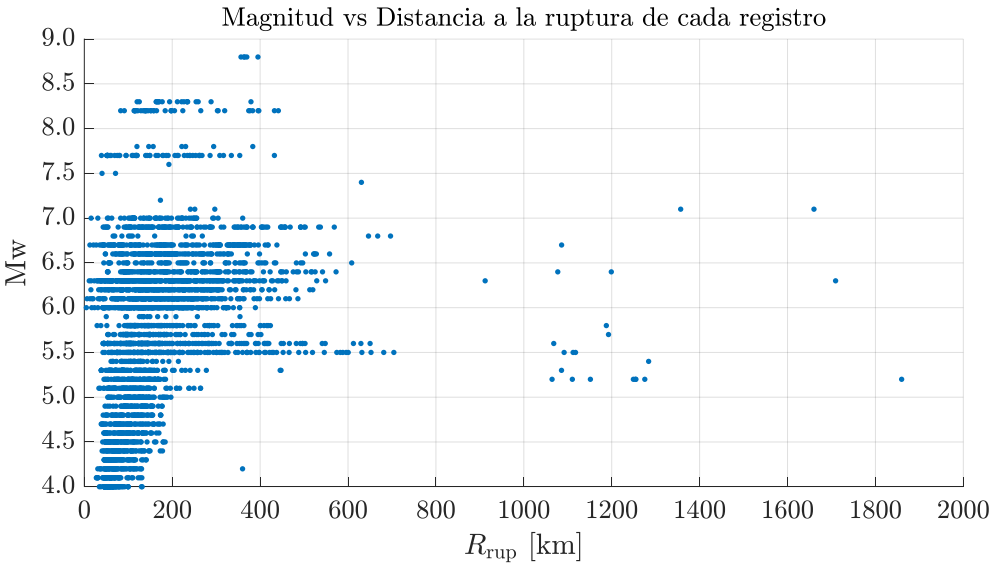


Figura 4.1.1. Datos de magnitud y distancia a la ruptura de cada registro de la base de datos.

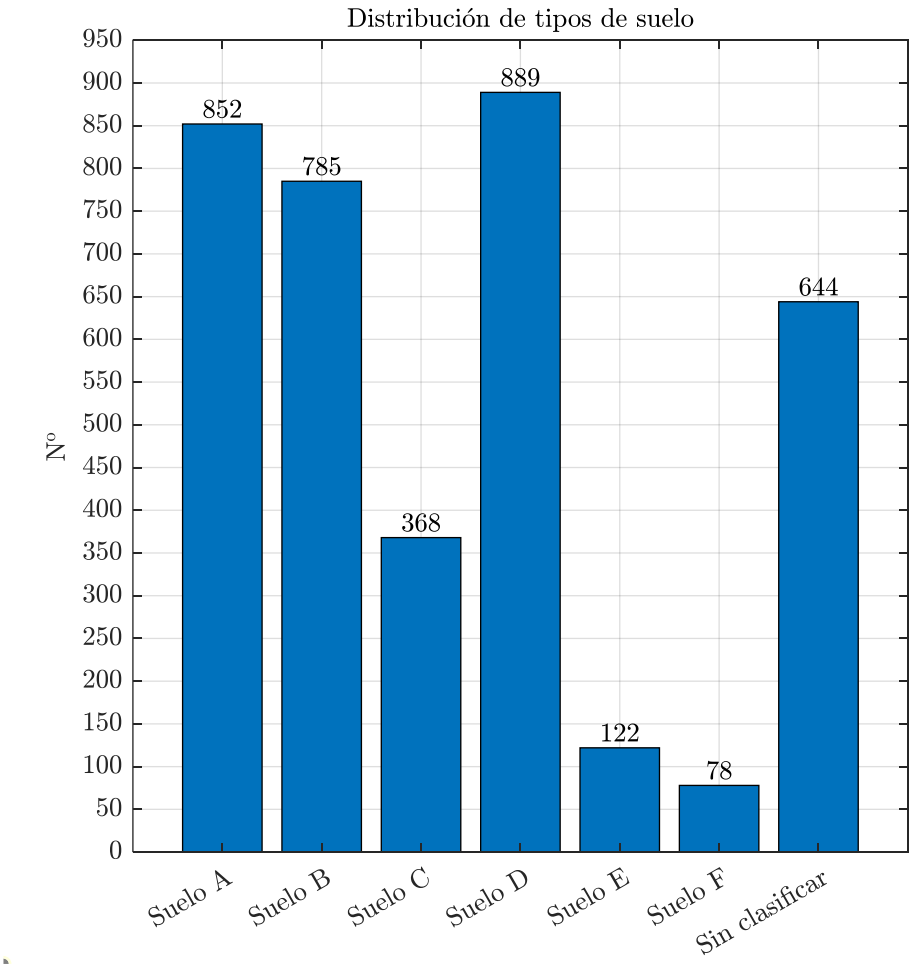


Figura 4.1.2. Número de registros según tipo de suelo.

En lo que concierne a la dirección de aceleración utilizada, se consideró una dirección aleatoria. Para ello, el registro se rota en la dirección θ como:

$$\ddot{u}_\theta(t) = \ddot{u}_x(t)\, cos(\theta) + \ddot{u}_y(t)\, sen(\theta) \tag{22}$$

Donde, $\ddot{u}_x(t)$ y $\ddot{u}_y(t)$ representan las componentes horizontales perpendiculares del registro, y θ es un valor aleatorio entre 0° y 360°.

4.2 Propiedades dinámicas de la estructura primaria y AMS

Se considera una estructura de un grado de libertad con una masa unitaria y una fracción de amortiguamiento crítico de 3%. La influencia del periodo, T, del sistema se estudió variando su valor entre T = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 [s].

En cuanto al amortiguador de masa sintonizada (AMS), este corresponde a un oscilador armónico amortiguado de un grado de libertad y cuenta con una masa igual a un 2% de la masa de la estructura primaria. En cada análisis, el periodo y la fracción de amortiguamiento del AMS se asignan de modo de alcanzar los parámetros óptimos de sintonía en base a las expresiones propuestas por Lin et al. (1994), empleando las ecuaciones (12), (13) y (14) presentadas en la sección 3.2. De esta forma, se obtiene un valor de razón de masas del sistema acoplado de 0.02, una razón óptima de sintonización de frecuencias de 0.9602 y una fracción de amortiguamiento óptima del AMS igual a 7.03 %.

4.3 Cálculo de respuesta estructural

Para cada registro, se calcula la respuesta de la estructura primaria (i.e., el sistema de 1GDL sin el AMS) empleando el método de recurrencia (Chopra, 2014).

En lo que concierne al sistema acoplado, este corresponde a un sistema lineal de 2 grados de libertad, la respuesta se calcula resolviendo numéricamente el problema de espacio estado utilizando la función *lsim* que se encuentra implantada en MATLAB (MathWorks, 2023).

4.4 Cálculo de la eficiencia del AMS

Para cada uno de los 3738 registros sísmicos, se calculó la eficiencia del AMS utilizando la ecuación (15). Este procedimiento se repite para seis periodos distintos de análisis.

4.5 Cálculo de Sa Ratio y determinación de la ventana óptima de periodos

Se puede observar en las ecuaciones (16) y (17), que la métrica SaRatio(T) depende de la media geométrica de la respuesta espectral de aceleración Sa_{avg} evaluada en una ventana de periodos que abarca desde aT hasta bT. En consecuencia, primero se debe definir qué valores de a y b utilizar para evaluar SaRatio. Para ello, para cada periodo en estudio, se determinaron los valores de a y b que maximizan la correlación entre η y SaRatio.

Se evaluaron valores de $a \in [0,1]$ a intervalos $\Delta a = 0.1$; valores de $b \in [1,4]$ a intervalos $\Delta b = 0.1$, y valores de $T \in [0.5, 3.0]$ s, a intervalos $\Delta T = 0.5$ s. Para cada combinación (a, b, T), se calcularon 3738 pares numéricos (SaRatio, η). Para cada valor de T, los pares fueron luego transformados al espacio logarítmico en base 10 ($\log(SaRatio)$, $\log(\eta)$) y se obtuvo el coeficiente de correlación lineal calculando el coeficiente de determinación R^2 de una regresión lineal para estimar η a partir de SaRatio. Por lo tanto, para cada periodo de análisis se obtienen 341 valores de R^2 asociados a cada posible combinación de (a, b), de los que se escoge aquella que maximiza el valor de R^2.

4.6 Otras variables de interés

Para cada registro, se discretiza por tipo de suelo, se calcula su duración acotada, aceleración espectral Sa(T), aceleración espectral promedio Sa_{avg} utilizando los valores óptimos de a y b, y la velocidad incremental filtrada FIV3. Se evalúa, para cada parámetro, la correlación entre estas medidas de intensidad o métricas de caracterización del movimiento sísmico y η.

5 Análisis y resultados

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos en la evaluación de la eficiencia de un amortiguador de masa sintonizada (AMS) incorporado en un sistema estructural de un grado de libertad frente a 3738 registros sísmicos chilenos. En primer lugar, se muestran las correlaciones lineales entre la métrica SaRatio y la eficiencia del AMS, evaluada en seis periodos de interés y en sus valores óptimos de a y b, constates positivas necesarias para el cálculo de SaRatio. Posteriormente, se analiza la correlación entre la eficiencia del AMS y otras medidas de intensidad, así como métricas de caracterización del movimiento sísmico, tales como la duración acotada del registro, el tipo de suelo, la aceleración espectral (Sa), la aceleración espectral promedio (Sa_{avg}) y la velocidad incremental filtrada (FIV3).

$$log(y) = \beta_0 + \beta_1\, log(X_1) + \cdots . + \beta_i log(X_i) \tag{23}$$

El análisis se basa en ajustes de regresión lineal utilizando como modelo la ecuación (23), donde y representa la variable independiente analizada (eficiencia del AMS, η), β_0 el intercepto de la regresión y β_i la pendiente asociada a la variable independiente X_i. Las regresiones se realizan en el espacio logarítmico en base 10 debido a que se observa una mejor linealidad y coeficiente de determinación al aplicar esta transformación.

5.1 Sa Ratio: Parámetros óptimos para la ventana de periodos

La Figura 5.1.1 muestra los coeficientes de determinación calculados para cada par (a, b) para los 6 periodos de análisis. En cada gráfico, el punto rojo indica el valor óptimo del par (a, b) que genera el mayor coeficiente de determinación R^2.

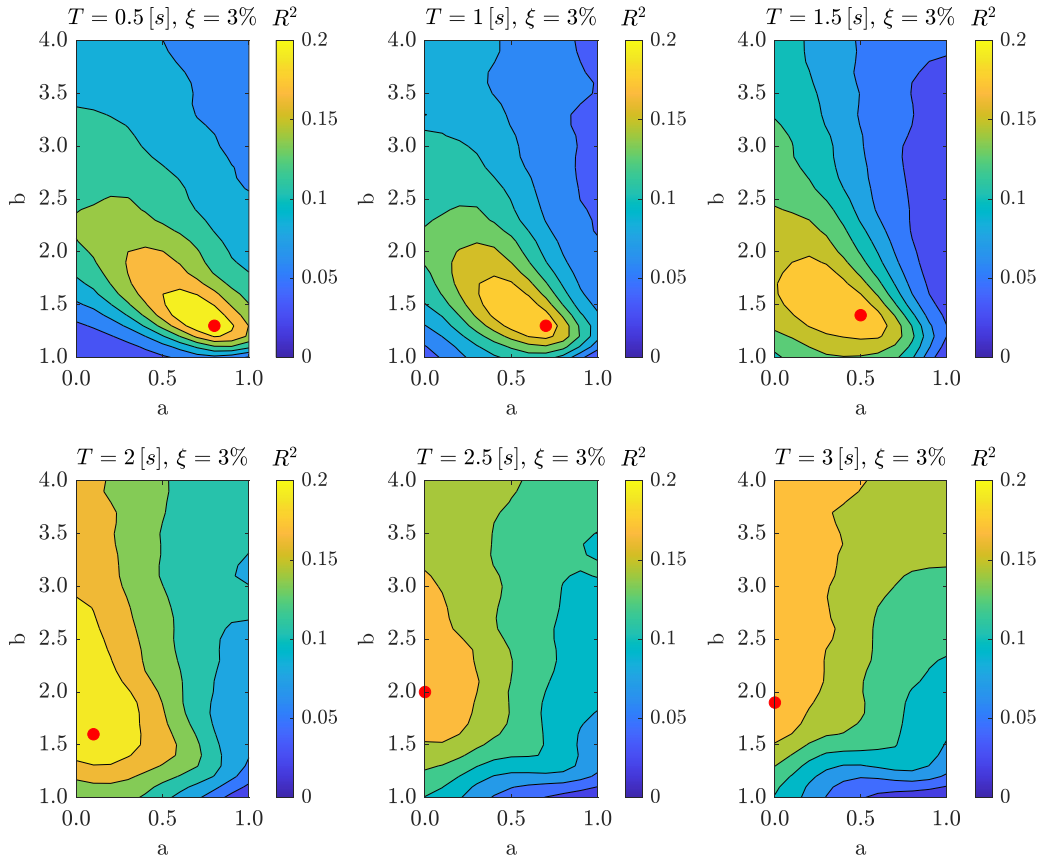


Figura 5.1.1. Curvas de nivel del coeficiente de correlación R^2 para SaRatio vs. Eficiencia del AMS para diferentes pares de (a, b).

La Figura 5.2.1 muestra las curvas de nivel que representan los valores del coeficiente de correlación (R^2) entre la eficiencia del AMS (η) y SaRatio, en función de los parámetros a y b, para diferentes periodos T y una fracción de amortiguamiento del sistema ξ=3%.

De la figura se observa que los valores óptimos de a y b varían significativamente con el periodo T. A medida que aumenta el periodo del sistema, el valor óptimo del parámetro a tiende a disminuir, mientras que el valor óptimo de b aumenta.

Además, se infiere que la correlación significativa entre la eficiencia del AMS (η) y SaRatio es más significativa en sistemas con periodos cortos (T=0.5 [s]), obteniendo un valor mayor de R^2. Sin embargo, a medida que el periodo aumenta, el valor de R^2 tiende a disminuir, lo cual indica que SaRatio pierde efectividad con predictor de la eficiencia del AMS en sistemas más flexibles. Este patrón, aunque presenta fluctuaciones, indica que la correlación entre SaRatio y η es más consistente en sistemas rígidos que en aquellos con periodos más largos (sistemas más flexibles).

5.2 SaRatio

Las Figuras 5.2.1 a 5.2.6 indican los gráficos de Sa ratio vs eficiencia obtenidos para cada periodo y el par óptimo de (a, b), considerando los resultados en escala logarítmica. En cada figura, los puntos negros indican los valores de (log (η), log(SaRatio)) de los 3738 registros sísmicos, mientras que la línea roja corresponde a la regresión lineal $\log(\eta) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(SaRatio)$. Asimismo, la línea azul punteada representa el intervalo de confianza al 95% e indica el rango de inclinación posible para la línea de regresión con un 95% de confianza.

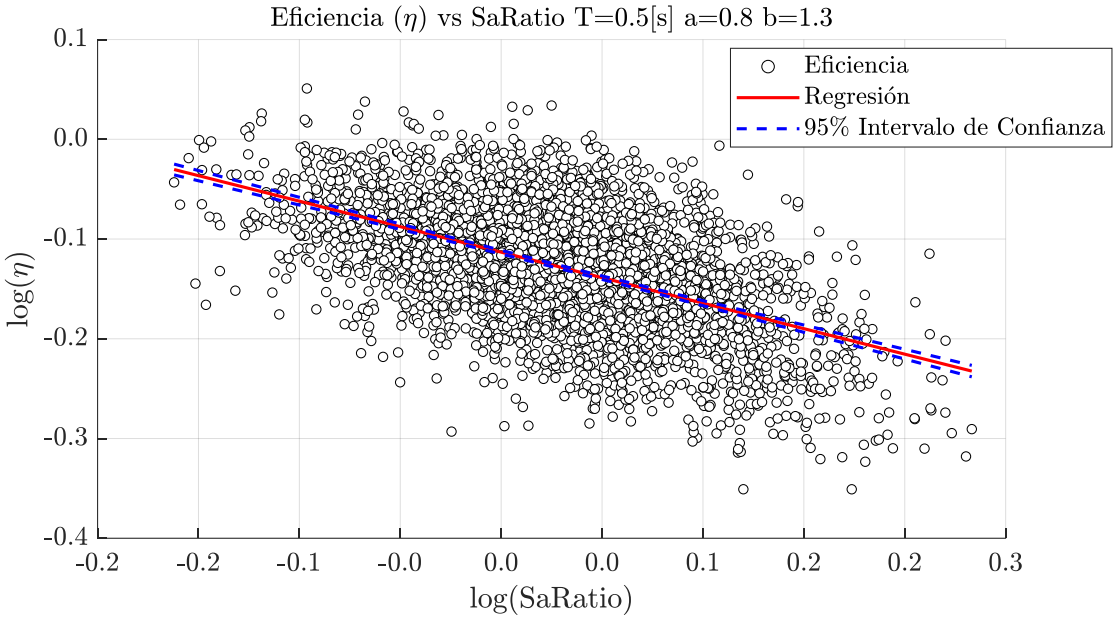


Figura 5.2.1. SaRatio vs. Eficiencia del AMS para T=0.5 [s].

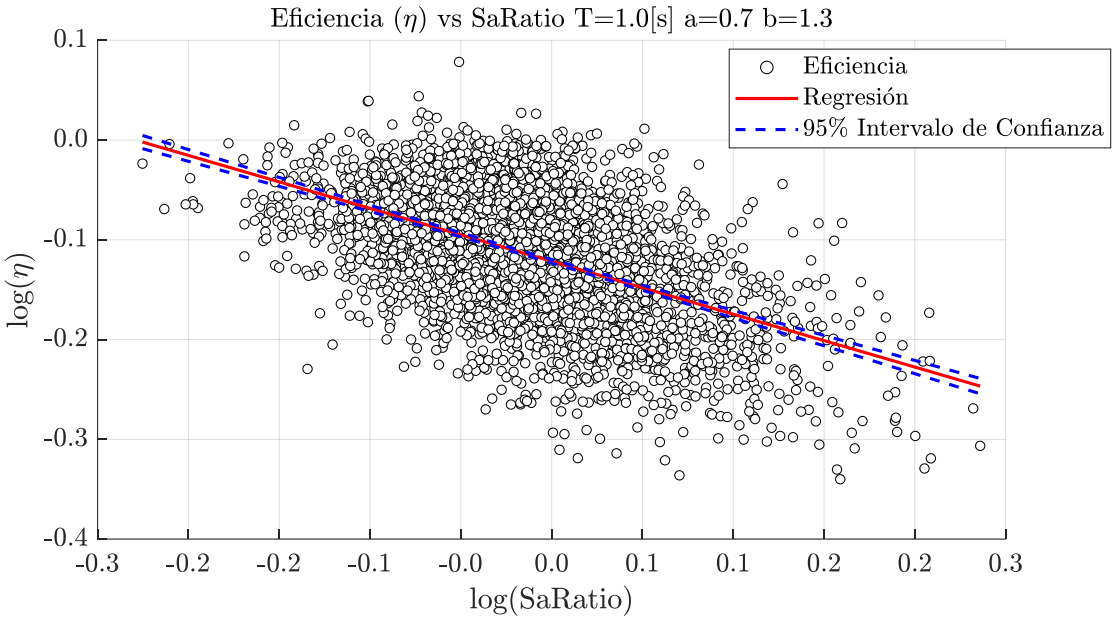


Figura 5.2.2. SaRatio vs. Eficiencia del AMS para T=1.0 [s].

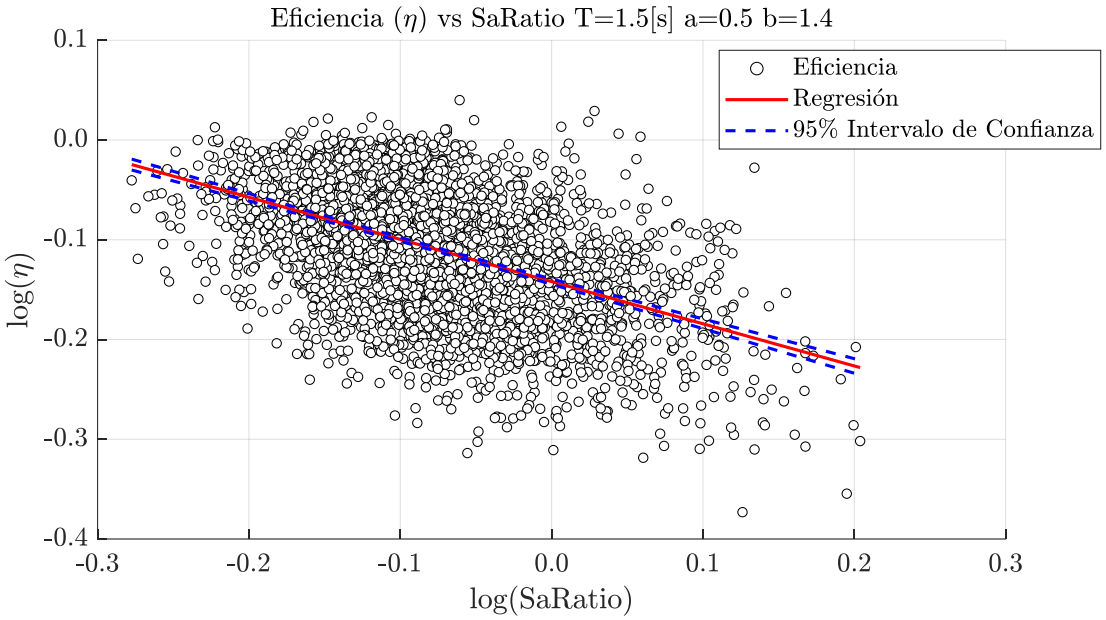


Figura 5.2.3. SaRatio vs. Eficiencia del AMS para T=1.5 [s].

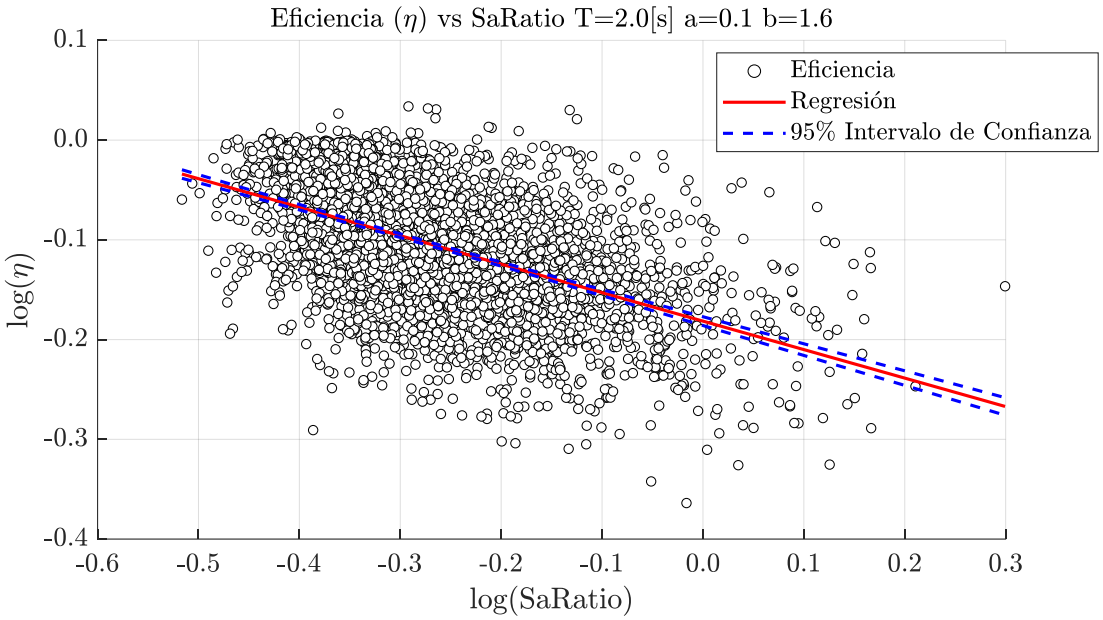


Figura 5.2.4. SaRatio vs. Eficiencia del AMS para T=2.0 [s].

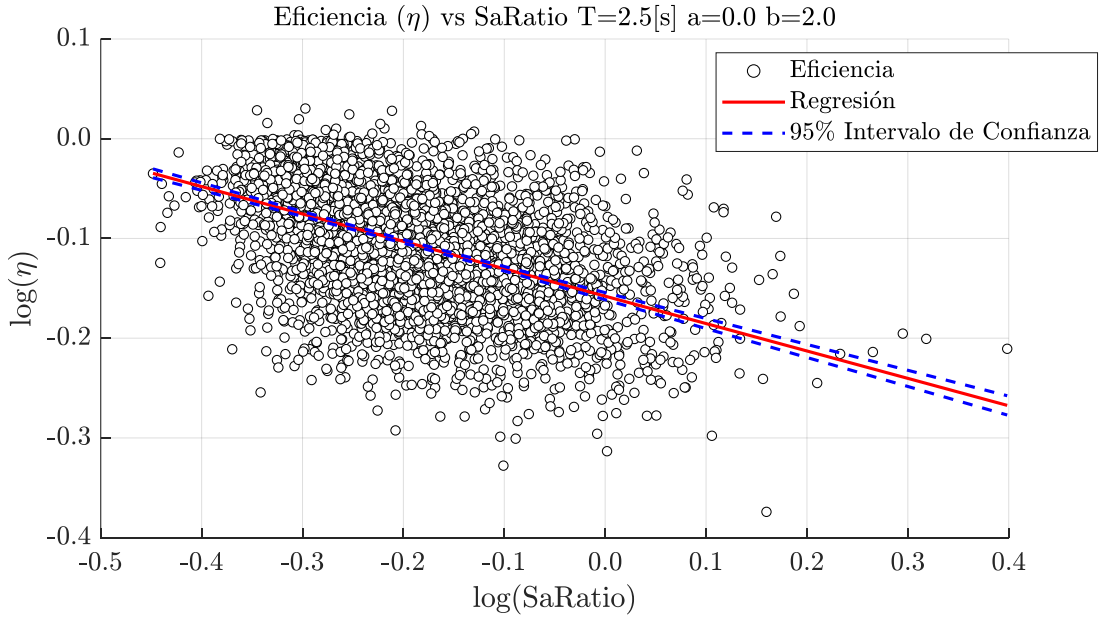


Figura 5.2.5. SaRatio vs. Eficiencia del AMS para T=2.5 [s].

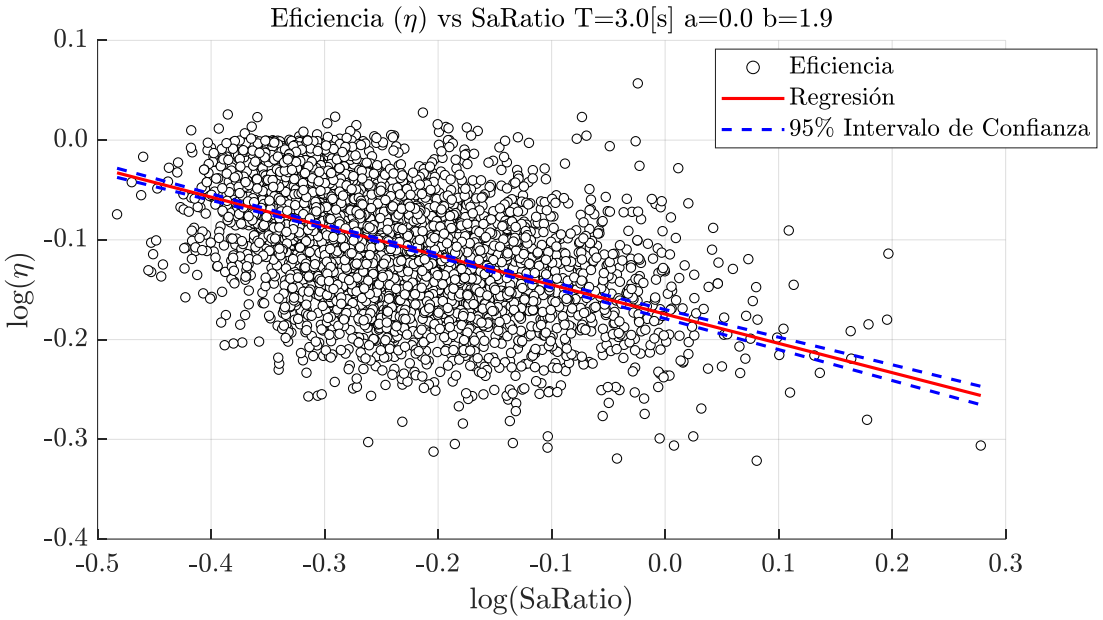


Figura 5.2.6. SaRatio vs. Eficiencia del AMS para T=3.0 [s].

Tabla 5.2.1. Valores de ajuste para la regresión lineal entre SaRatio y la eficiencia del AMS, en escala logarítmica.

T [s]	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
(a, b)	(0.8, 1.3)	(0.7, 1.3)	(0.5, 1.4)	(0.1, 1.6)	(0.0, 2.0)	(0.0, 1.9)
Regresión lineal log (SaRatio) vs. log (η)						
R^2	0.270	0.243	0.219	0.262	0.231	0.224
p value (β_1)	1.34E-257	2.28E-228	2.28E-202	5.39E-249	2.71E-215	2.74E-208
β_0	-0.113	-0.122	-0.142	-0.182	-0.158	-0.175
β_1	-0.511	-0.531	-0.423	-0.286	-0.275	-0.293
σ	0.052	0.055	0.057	0.055	0.055	0.055

En las Figuras 5.2.1 a 5.2.6 se observa un claro comportamiento lineal entre datos, es decir, que existe una correlación lineal entre la eficiencia del amortiguador de masa sintonizada (AMS) y SaRatio para un sistema de un grado de libertad (1GDL). Asimismo, se aprecia que más del 90% de los datos muestra una eficiencia menor que 1, lo cual significa que el AMS reduce efectivamente la respuesta en más del 90% de los registros sísmicos evaluados en el caso de 1GDL. Además, el intervalo de confianza no incluye una pendiente igual a cero, lo que se traduce en un valor de p value menor a 5%.

La Tabla 5.2.1 presenta el análisis descriptivo de la regresión lineal entre SaRatio y la eficiencia del AMS aplicando una escala logarítmica en base 10 a las variables, mostrando el coeficiente de determinación (R^2), p value asociado a SaRatio, pendiente e intercepto de la regresión para cada periodo de análisis, utilizando los valores óptimos de (a, b) y la desviación estándar de la distribución del error (σ).

Además, la Tabla 5.2.1 cuantifica que existe una correlación lineal entre SaRatio y la eficiencia del AMS, dado que el coeficiente de correlación (R^2) toma valores entre 0.2 a 0.3 aproximadamente. Esto significa que SaRatio explica aproximadamente entre un 20% y un 30% de la variabilidad en la eficiencia del amortiguador, mientras que el porcentaje restante se debe a otros factores o variables que no están considerados en esta relación lineal. Además, se puede inferir de la misma tabla que para periodos largos la correlación lineal entre las variables es menor, o tiende a disminuir.

Por último, en todos los casos analizados en la Tabla 5.2.1 p value es inferior a 5%, lo cual indica que SaRatio es un predictor estadísticamente significativo de la eficiencia del AMS, es decir, el coeficiente asociado a SaRatio es significativamente diferente de cero con un 95% de confianza, por lo tanto, es confiable decir que hay una correlación entre SaRatio y la eficiencia del AMS.

5.3 Tipo de suelo

Las Figuras 5.3.1 a 5.3.6 muestran los resultados de eficiencia vs. SaRatio al discretizar por tipo de suelo en escala logarítmica. El tipo de suelo se considera una variable categórica con el suelo tipo A como categoría base. Por otro lado, los gráficos tienen indicado con un color diferente cada tipo de suelo con su respectiva regresión lineal cuya formulación se indica a continuación.

$$\log(\eta) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(\text{SaRatio}) + \beta_2 \cdot \text{Suelo B} + \beta_3 \cdot \text{Suelo C} + \beta_4 \cdot \text{Suelo D} + \beta_5 \cdot \text{Suelo E} + \beta_6 \cdot \text{Suelo F} + \beta_7 \cdot \text{Suelo } SC + \beta_8 \cdot (\log(\text{SaRatio}) \cdot \text{Suelo B}) + \beta_9 \cdot (\log(\text{SaRatio}) \cdot \text{Suelo C} + \beta_{10} \cdot (\log(\text{SaRatio}) \cdot \text{Suelo D}) + \beta_{11} \cdot (\log(\text{SaRatio}) \cdot \text{Suelo E}) + \beta_{12} \cdot (\log(\text{SaRatio}) \cdot \text{Suelo F} + \beta_{13} \cdot (\log(\text{SaRatio}) \cdot \text{ SC})$$

Con β_0 y β_1 el intercepto de la regresión y el coeficiente de estimación de SaRatio, respectivamente; β_2 a β_7 los coeficientes de estimación de cada tipo de suelo y β_8 a β_{13} los coeficientes de interacciones entre SaRatio y cada tipo de suelo.

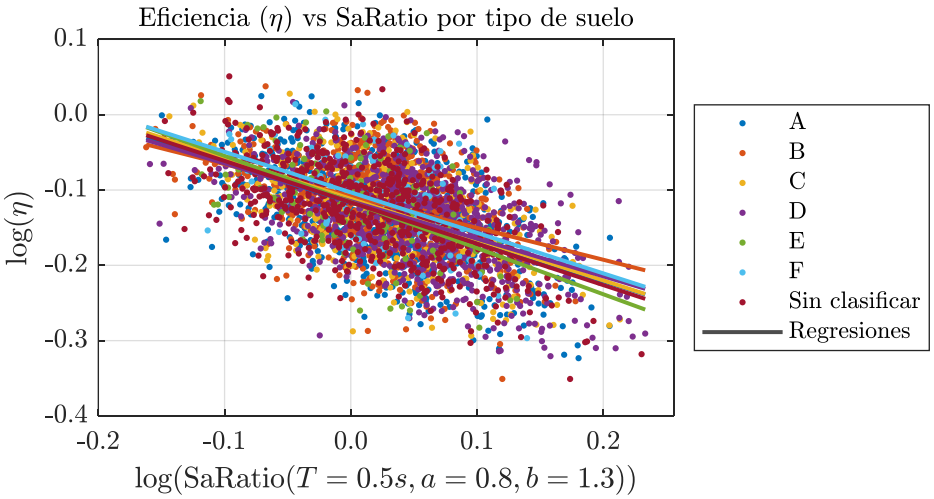


Figura 5.3.1. SaRatio vs. Eficiencia del AMS considerando tipo de suelo como variable categórica para T=0.5 [s].

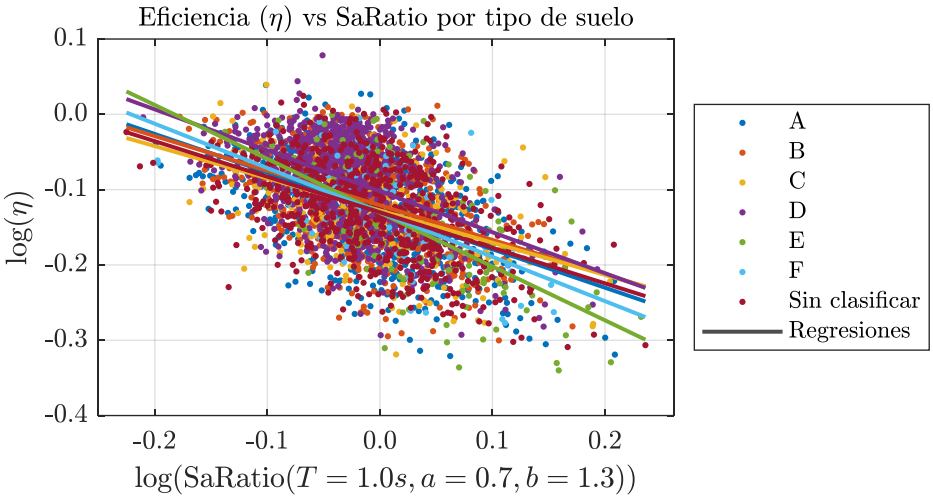


Figura 5.3.2. SaRatio vs. Eficiencia del AMS considerando tipo de suelo como variable categórica para T=1.0 [s].

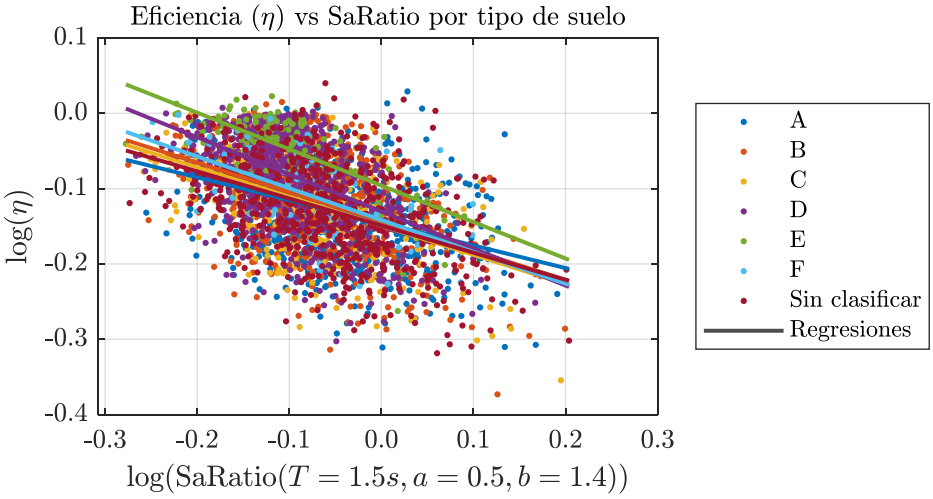


Figura 5.3.3. SaRatio vs. Eficiencia del AMS considerando tipo de suelo como variable categórica para T=1.5 [s].

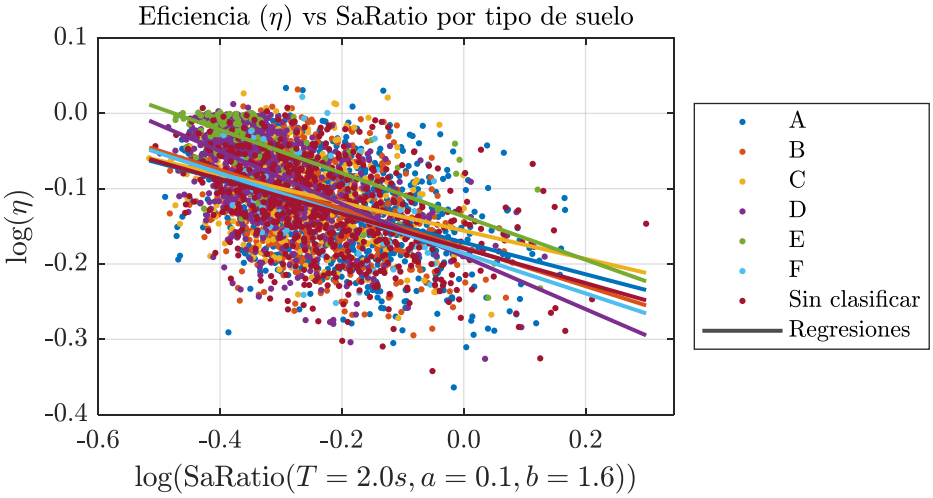


Figura 5.3.4. SaRatio vs. Eficiencia del AMS considerando tipo de suelo como variable categórica para T=2.0 [s].

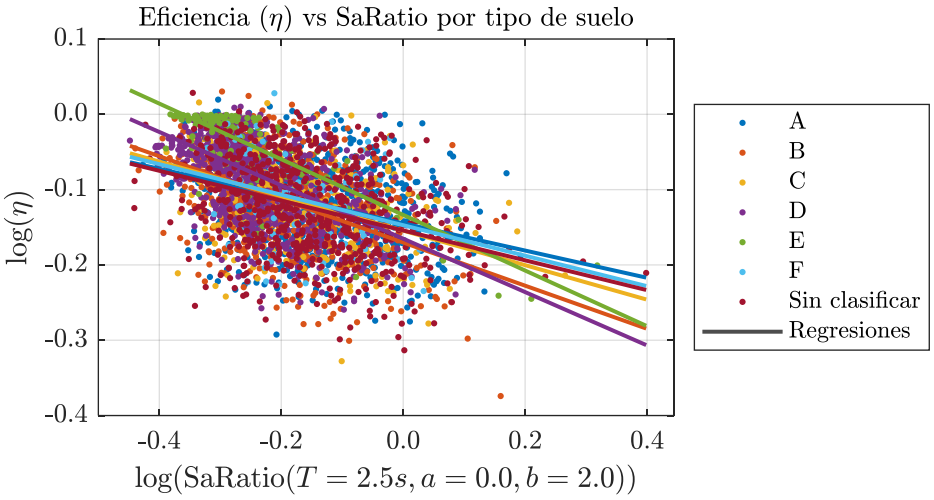


Figura 5.3.5. SaRatio vs. Eficiencia del AMS considerando tipo de suelo como variable categórica para T=2.5 [s].

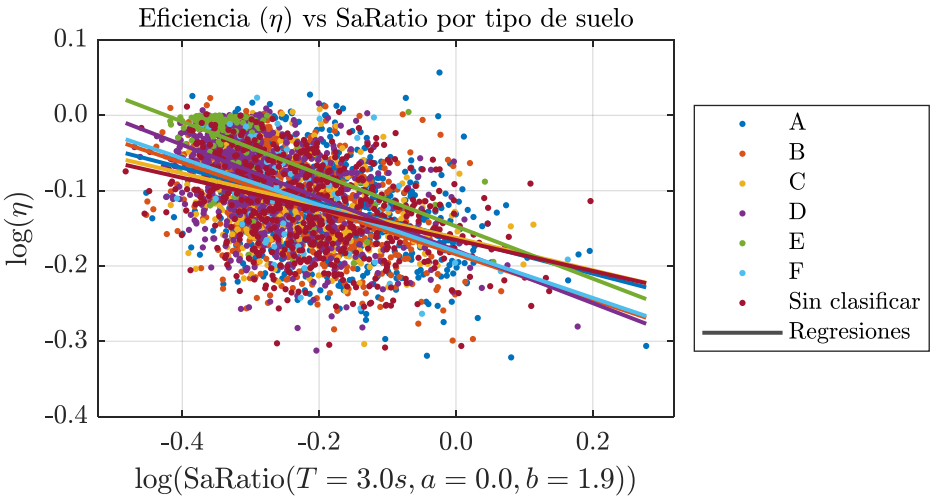


Figura 5.3.6. SaRatio vs. Eficiencia del AMS considerando tipo de suelo como variable categórica para T=3.0 [s].

Tabla 5.3.1. Valor de coeficientes estimados, intercepto, desviación estándar de la distribución del error y coeficiente de correlación para la regresión lineal entre SaRatio y la eficiencia del AMS, con tipo de suelo como variable categórica.

T [s]	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
(a, b)	(0.8, 1.3)	(0.7, 1.3)	(0.5, 1.4)	(0.1, 1.6)	(0.0, 2.0)	(0.0, 1.9)
β_0	-0.116	-0.128	-0.145	-0.172	-0.145	-0.163
R^2	0.277	0.280	0.281	0.301	0.281	0.263
σ	0.052	0.054	0.055	0.053	0.053	0.053
Coeficiente	Estimado					
β_1	-0.525	-0.510	-0.301	-0.211	-0.181	-0.234
β_2	0.008	0.007	0.002	-0.007	-0.026	-0.021
β_3	0.005	4.67.E-04	-0.004	0.016	-0.010	0.001
β_4	0.002	0.026	0.015	-0.019	-0.020	-0.016
β_5	4.53.E-04	-0.002	0.049	0.035	0.011	0.016
β_6	0.013	-0.002	0.004	-0.014	-0.003	-0.017
β_7	2.00.E-05	-0.002	-0.004	-0.008	-0.010	-0.002
β_8	0.102	0.051	-0.088	-0.046	-0.106	-0.069
β_9	-0.018	0.083	-0.086	0.024	-0.048	0.020
β_{10}	0.025	-0.033	-0.191	-0.139	-0.173	-0.116
β_{11}	-0.088	-0.204	-0.183	-0.077	-0.189	-0.114
β_{12}	-0.013	-0.079	-0.121	-0.056	-0.022	-0.074
β_{13}	-0.025	0.038	-0.059	-0.019	-0.017	0.028

Tabla 5.3.2 Valor de p value para la regresión lineal entre SaRatio y la eficiencia del AMS, con tipo de suelo como variable categórica.

T [s]	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
(a, b)	(0.8, 1.3)	(0.7, 1.3)	(0.5, 1.4)	(0.1, 1.6)	(0.0, 2.0)	(0.0, 1.9)
Variable	p value					
$SaRatio$	4.04.E-68	2.55.E-58	1.49.E-29	1.36.E-41	3.95.E-28	6.88.E-40
Suelo B	0.003	0.007	0.621	0.351	2.14.E-06	0.003
Suelo C	0.187	0.892	0.407	0.082	0.117	0.947
Suelo D	0.582	1.01.E-20	0.001	0.015	0.001	0.037
Suelo E	0.929	0.671	8.95.E-08	0.019	0.362	0.406
Suelo F	0.046	0.739	0.690	0.373	0.846	0.263
Suelo SC	0.994	0.499	0.294	0.167	0.044	0.728
SaRatio:Suelo B	0.025	0.286	0.028	0.072	2.91.E-05	0.013
SaRatio:Suelo C	0.732	0.141	0.059	0.461	0.110	0.576
SaRatio:Suelo D	0.534	0.482	4.43.E-06	3.68.E-08	3.38.E-11	3.81.E-05
SaRatio:Suelo E	0.316	0.006	0.015	0.074	2.39.E-05	0.061
SaRatio:Suelo F	0.902	0.410	0.165	0.383	0.758	0.254
SaRatio:Suelo SC	0.560	0.392	0.115	0.393	0.482	0.285

En las Figuras 5.3.1 a 5.3.6 hay una tendencia general descendente en todas las categorías de suelo, es decir, que la eficiencia tiende a disminuir a medida que aumenta el valor SaRatio para todos los tipos de suelo.

Por otro lado, se observa que cada tipo de suelo tiene su propia regresión lineal, con pendientes negativas muy similares. Aunque algunas pendientes son ligeramente más pronunciadas o menos inclinadas que otras, la variación entre ellas es menor, lo que indica que el tipo de suelo tiene un

pequeño efecto en la relación entre eficiencia y SaRatio, aunque no lo suficiente como para cambiar la tendencia general de los resultados.

La Tabla 5.3.1 indica el valor de los coeficientes estimados para cada tipo de suelo, intercepto de la regresión y el coeficiente de determinación (R^2) asociado a cada periodo de análisis. En comparación a la Tabla 5.2.1, se observa que al agregar el tipo de suelo a la regresión lineal, aumenta el valor del coeficiente de correlación en todos los casos evaluados, con un aumento máximo de 0.05 para un periodo de T=1.5 [s]. Además, se puede notar que los coeficientes estimados son aproximadamente cero en todos los casos, exceptuando el caso de SaRatio, por lo cual que su efecto en el modelo es prácticamente nulo.

Por otro lado, la Tabla 5.3.2 muestra el valor de p value asociado a cada coeficiente de la regresión. En primer lugar, SaRatio posee un valor p extremadamente bajo, indicando que SaRatio es una variable muy significativa en el modelo, tal como se verificó anteriormente. En cuanto a los tipos de suelo, su efecto varía según la categoría. El suelo B muestra un efecto significativo en la mayoría de los periodos evaluados, particularmente para T=2.5 [s], mientras que, el suelo C no es significativo en ninguno de los casos y, los suelos tipo D y E son significativos solo para el periodo de análisis T=0.5 [s] y T=1.5 [s], respectivamente. En cuanto al suelo F y sin clasificar (SC), ambos muestran efectos negativos o no significativos en la mayoría de los periodos.

En conclusión, los efectos de los tipos de suelo varían considerablemente según el período, y algunas interacciones entre SaRatio y los tipos de suelo son significativas. Sin embargo, el valor del coeficiente de correlación (R^2) no muestra un incremento superior a 0.05 al incorporar el tipo de suelo en el modelo de regresión, debido a que los coeficientes estimados de las variables de regresión (Tabla 5.3.1), excluyendo el de SaRatio, son aproximadamente cero. Por lo tanto, se concluye que la influencia del tipo de suelo es despreciable.

5.4 Duración

La Figura 5.4.1 indica los resultados obtenidos al analizar la correlación existente entre la eficiencia del AMS y la duración acotada de los registros para los seis periodos analizados, considerando escala logarítmica. La línea negra indica la regresión lineal entre ambas variables, formulada como $\log(\eta) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(SaRatio) + \beta_2 \cdot \log(t_{90})$.

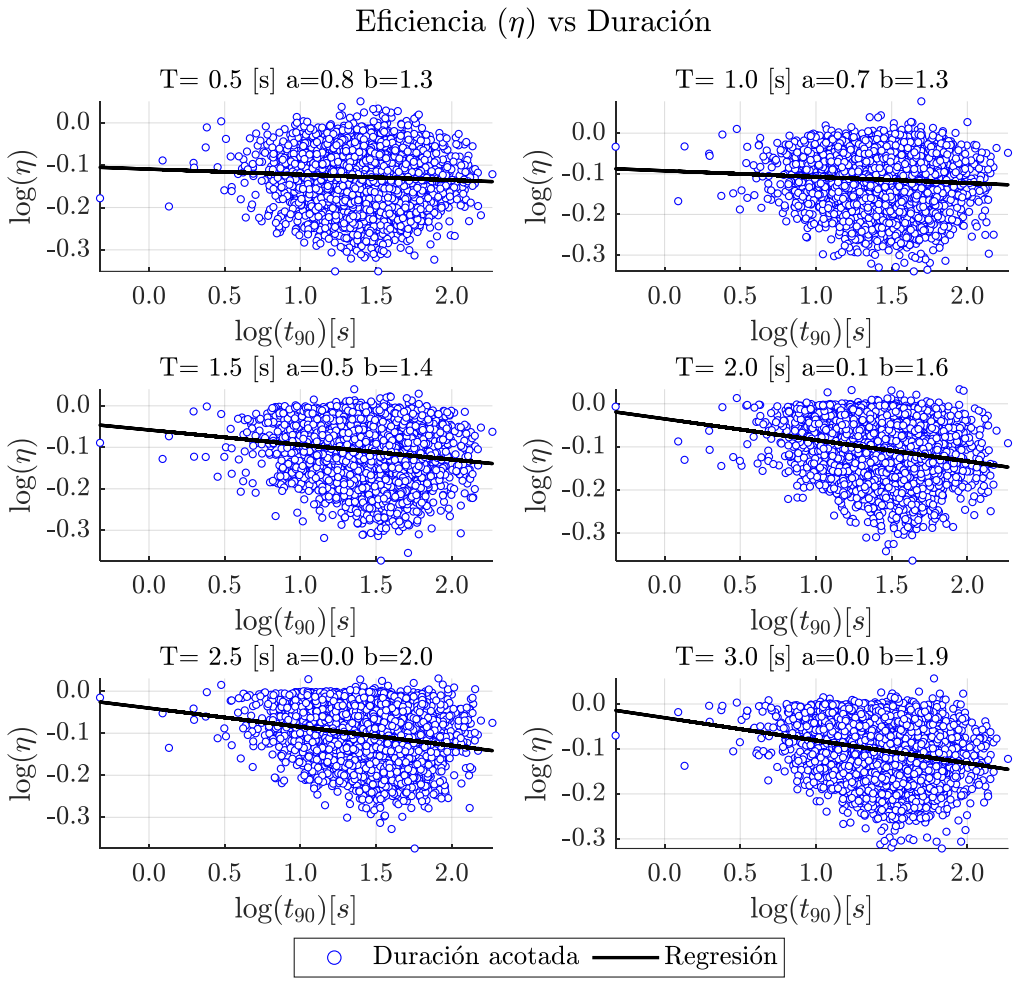


Figura 5.4.1. Duración del registro vs. Eficiencia del AMS.

Tabla 5.4.1. Valores de ajuste para la regresión lineal entre la duración del registro y la eficiencia del AMS, considerando escala logarítmica.

T [s]	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
(a, b)	(0.8, 1.3)	(0.7, 1.3)	(0.5, 1.4)	(0.1, 1.6)	(0.0, 2.0)	(0.0, 1.9)
Regresión lineal log (t_{90}) vs. log (η)						
R^2	0.280	0.245	0.228	0.268	0.234	0.231
p value (β_1)	7.41E-266	2.81E-227	6.93E-194	2.75E-218	3.05E-187	8.32E-174
p value (β_2)	8.94E-13	8.15E-04	3.07E-12	5.91E-08	4.44E-05	1.26E-08
β_0	-0.109	-0.093	-0.058	-0.035	-0.04	-0.031
β_1	-0.519	-0.518	-0.413	-0.274	-0.265	-0.277
β_2	-0.013	-0.015	-0.036	-0.045	-0.044	-0.051
σ	0.061	0.063	0.064	0.063	0.061	0.061

En la Figura 5.4.1 se observa la ausencia de correlación lineal entre la duración acotada del registro (t_{90}) y la eficiencia del AMS (η), ya que los datos no muestran ninguna tendencia definida con respecto a la línea de regresión. Además, la Tabla 5.4.1 permite observar que al agregar la duración acotada como variable independiente al modelo de regresión, en todos los casos evaluados el coeficiente de correlación (R^2) aumenta menos de 0.01 en comparación al modelo original que no considera este parámetro (Tabla 5.2.1), lo que sugiere que su contribución es marginal. Aunque p value es menor a 0.05 en todos los casos, indicando un efecto

estadísticamente significativo, los parámetros que acompañan a las variables en la regresión son aproximadamente cero, por lo tanto, la influencia de la duración en la eficiencia del AMS se considera despreciable.

5.5 Medidas de intensidad

Finalmente, las Figuras 5.5.1 a 5.5.6 indican la correlación existente entre la aceleración espectral (Sa), Sa average y la velocidad incremental filtrada (FIV3) con la eficiencia del AMS por separado, considerando los resultados en escala logarítmica.

La línea negra en cada uno de los gráficos corresponde a las siguientes regresiones lineales.

- $\log(\eta) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(SaRatio) + \beta_2 \cdot \log(Sa)$
- $\log(\eta) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(SaRatio) + \beta_2 \cdot \log(Sa\ average)$
- $\log(\eta) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(SaRatio) + \beta_2 \cdot \log(FIV3)$

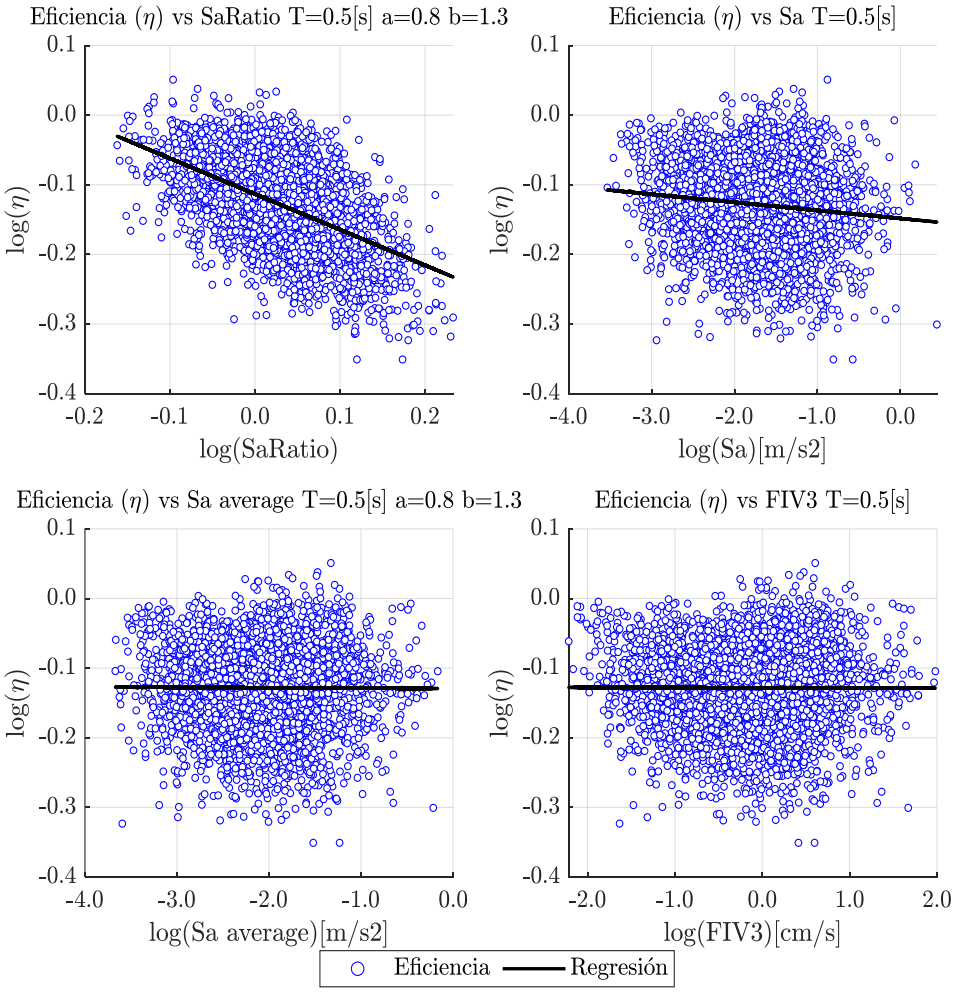


Figura 5.5.1. Sa, Sa average y FIV3 vs. Eficiencia del AMS por separado para T=0.5 [s].

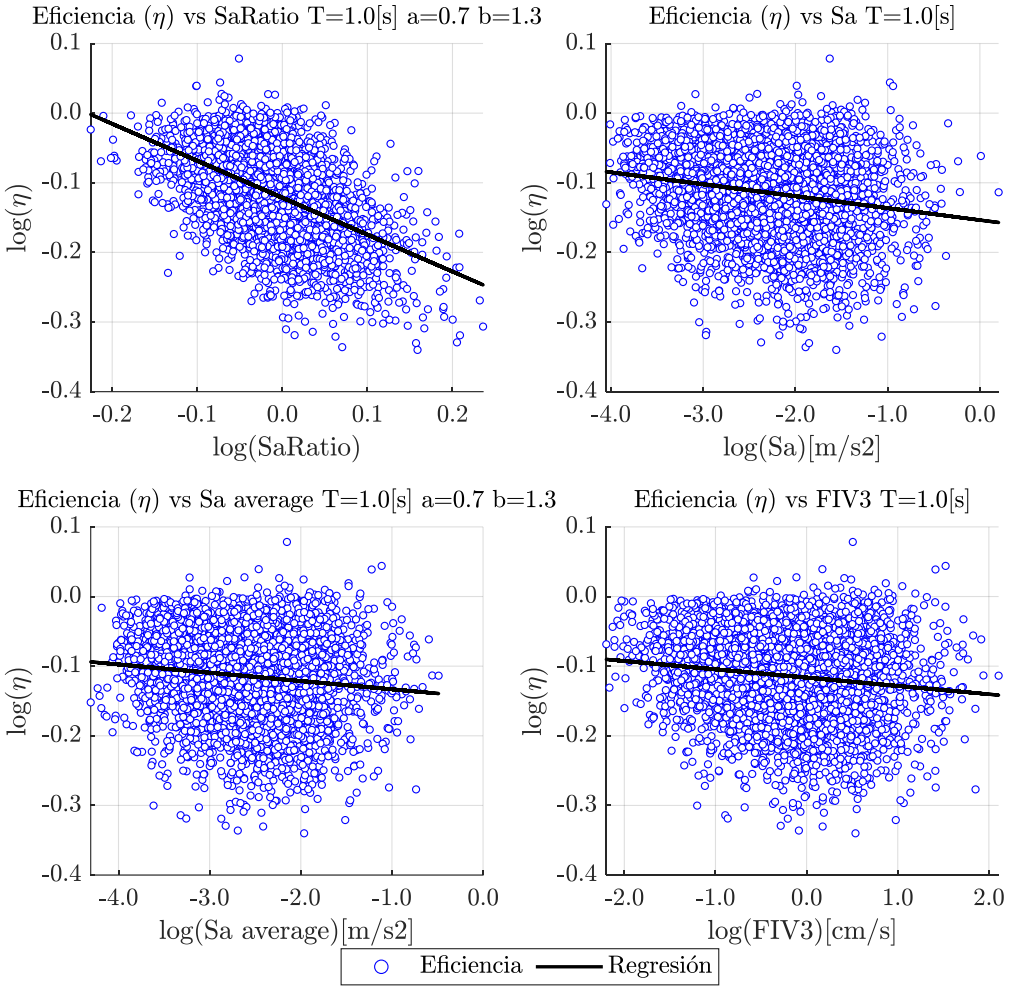


Figura 5.5.2. Sa, Sa average y FIV3 vs. Eficiencia del AMS por separado para T=1.0 [s].

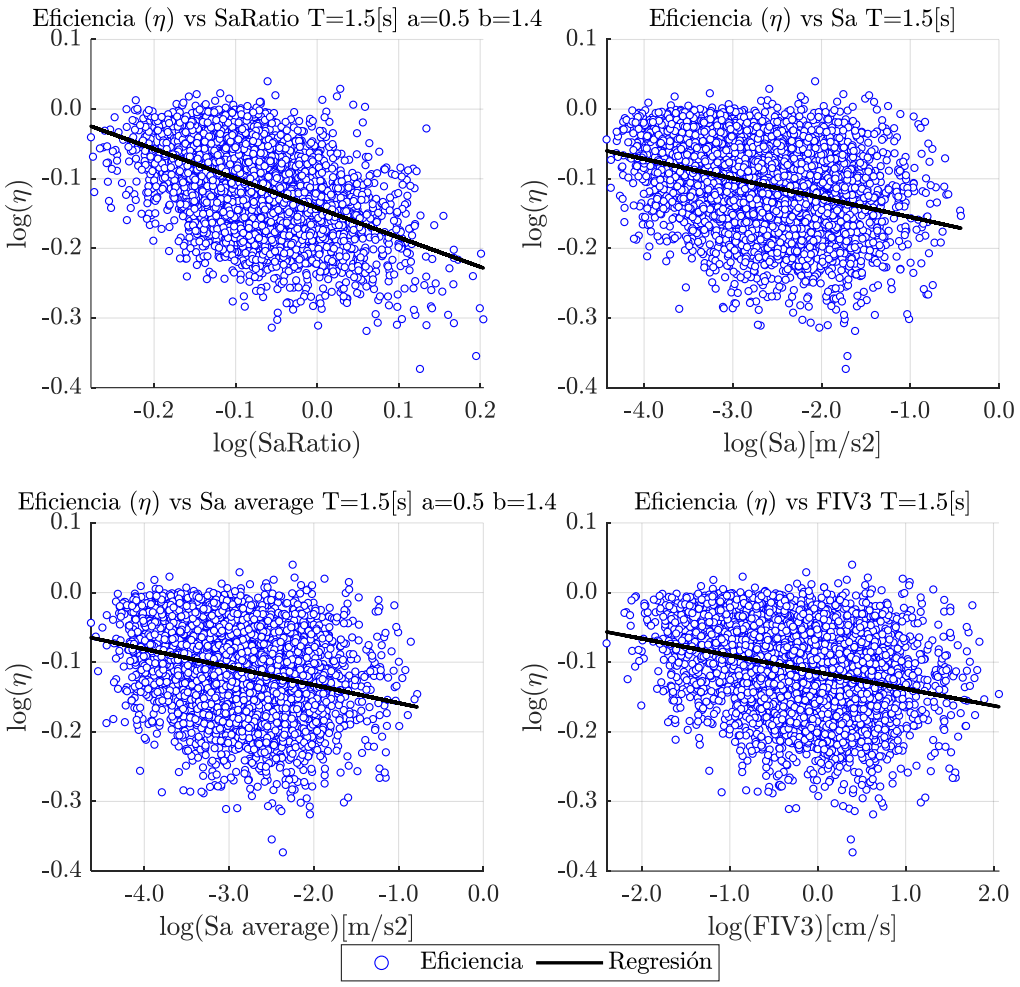


Figura 5.5.3. Sa, Sa average y FIV3 vs. Eficiencia del AMS por separado para T=1.5 [s].

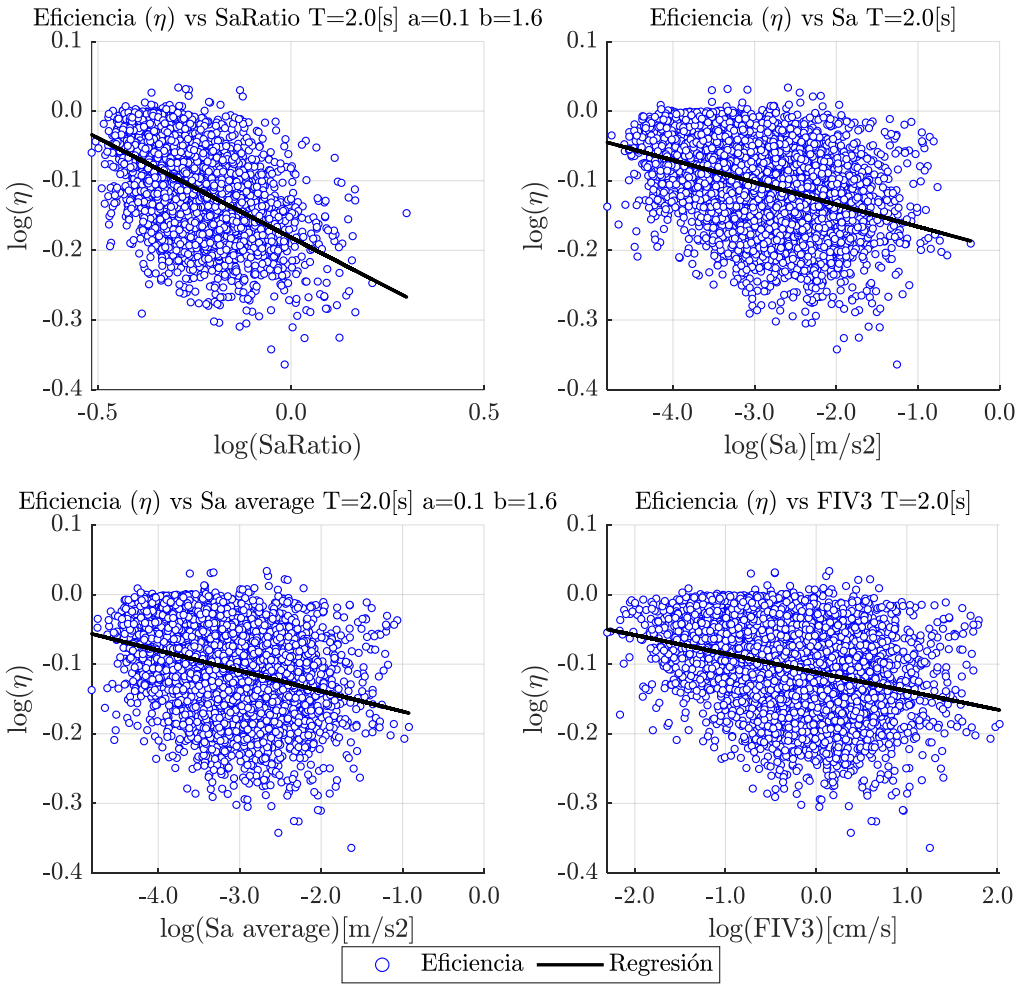


Figura 5.5.4. Sa, Sa average y FIV3 vs. Eficiencia del AMS por separado para T=2.0 [s].

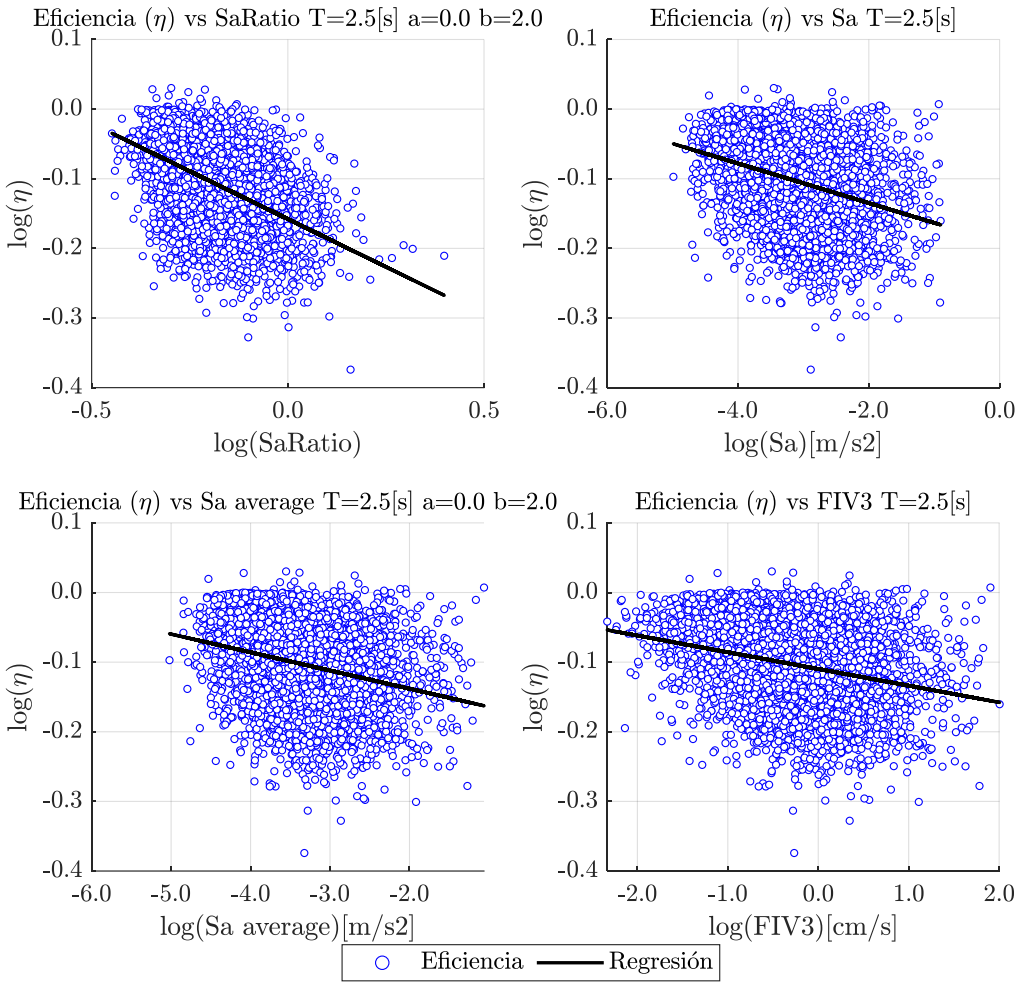


Figura 5.5.5. Sa, Sa average y FIV3 vs. Eficiencia del AMS por separado para T=2.5 [s].

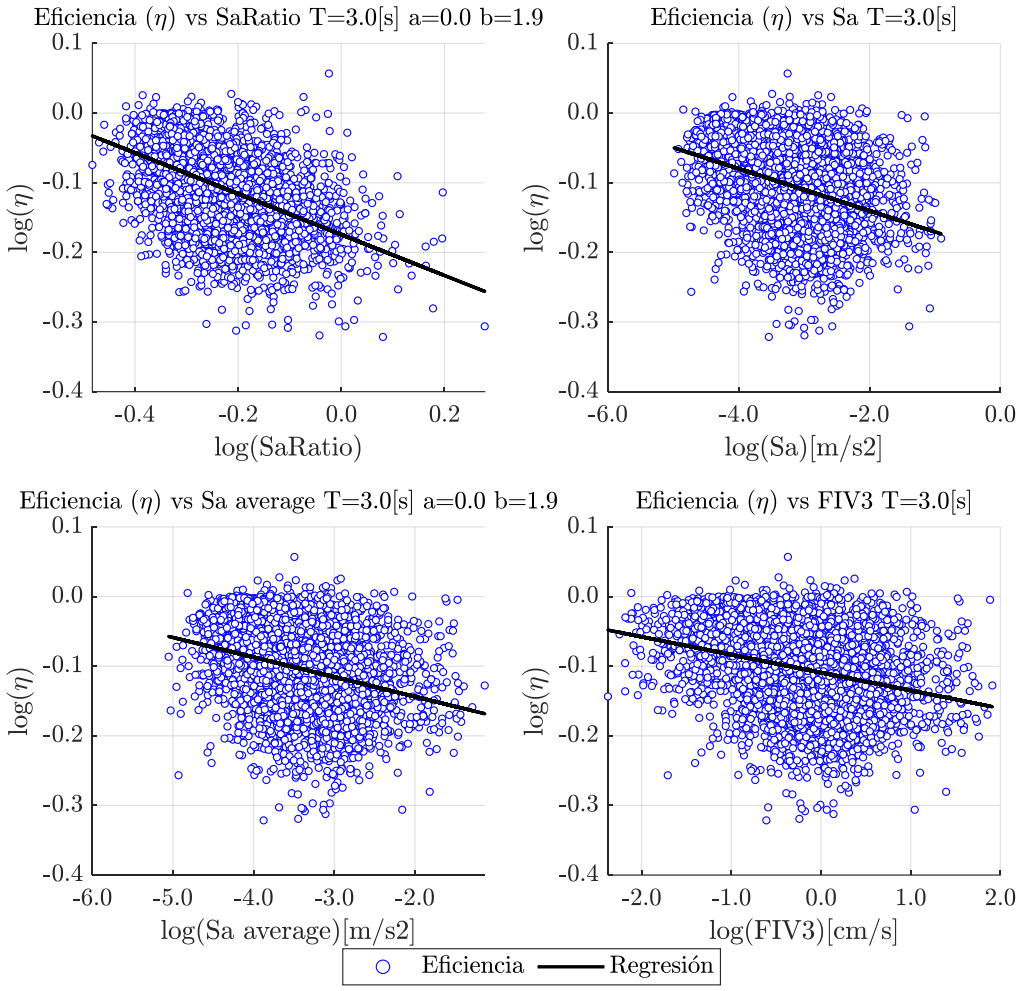


Figura 5.5.6. Sa, Sa average y FIV3 vs. Eficiencia del AMS por separado para T=3.0 [s].

Tabla 5.5.1. Valores de ajuste para la regresión lineal entre la aceleración espectral y la eficiencia del AMS, en escala logarítmica.

T [s]	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
(a, b)	(0.8, 1.3)	(0.7, 1.3)	(0.5, 1.4)	(0.1, 1.6)	(0.0, 2.0)	(0.0, 1.9)
Regresión lineal log (Sa) vs. log (η)						
R^2	0.279	0.256	0.255	0.276	0.237	0.239
p value (β_1)	1.04E-257	1.34E-214	1.77E-158	7.71E-148	3.09E-126	3.24E-115
p value (β_2)	8.05E-12	5.43E-16	2.40E-41	1.40E-16	2.11E-08	2.64E-17
β_0	-0.148	-0.154	-0.183	-0.197	-0.192	-0.201
β_1	-0.501	-0.513	-0.374	-0.247	-0.244	-0.246
β_2	-0.012	-0.017	-0.028	-0.031	-0.028	-0.030
σ	0.052	0.055	0.056	0.055	0.055	0.054

Tabla 5.5.2. Valores de ajuste para la regresión lineal entre la media geométrica de la respuesta espectral de aceleración y la eficiencia del AMS, en escala logarítmica.

T [s]	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
(a, b)	(0.8, 1.3)	(0.7, 1.3)	(0.5, 1.4)	(0.1, 1.6)	(0.0, 2.0)	(0.0, 1.9)
Regresión lineal log (Sa_{avg}) vs. log (η)						
R^2	0.274	0.252	0.249	0.270	0.234	0.233
p value (β_1)	4.23E-262	9.60E-226	2.55E-175	4.83E-180	1.79E-155	8.60E-144
p value (β_2)	4.28E-06	5.76E-11	1.06E-33	8.26E-10	5.51E-05	7.54E-11
β_0	-0.129	-0.145	-0.185	-0.197	-0.19	-0.2
β_1	-0.519	-0.525	-0.391	-0.262	-0.258	-0.265
β_2	-0.001	-0.012	-0.026	-0.029	-0.026	-0.028
σ	0.052	0.055	0.056	0.055	0.055	0.054

Tabla 5.5.3. Valores de ajuste para la regresión lineal entre la velocidad incremental filtrada (FIV3) y la eficiencia del AMS, en escala logarítmica.

T [s]	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
(a, b)	(0.8, 1.3)	(0.7, 1.3)	(0.5, 1.4)	(0.1, 1.6)	(0.0, 2.0)	(0.0, 1.9)
Regresión lineal log (FIV3) vs. log (η)						
R^2	0.276	0.253	0.251	0.272	0.235	0.235
p value (β_1)	8.49E-265	1.68E-224	2.99E-176	5.49E-184	1.46E-156	9.98E-147
p value (β_2)	4.28E-06	1.03E-12	1.06E-33	8.26E-10	5.51E-05	7.54E-11
β_0	-0.128	-0.116	-0.114	-0.112	-0.11	-0.109
β_1	-0.523	-0.523	-0.391	-0.261	-0.257	-0.263
β_2	-0.007	-0.009	-0.017	-0.01	-0.006	-0.010
σ	0.052	0.055	0.056	0.055	0.055	0.054

De las Figuras 5.5.1 a 5.5.6 se puede observar que a diferencia de SaRatio, las otras tres medidas de intensidad evaluadas, aceleración espectral (Sa), media geométrica de la respuesta espectral de aceleración (Sa avg) y la velocidad incremental filtrada (FIV3), presentan datos distribuidos de manera dispersa alrededor de la línea de regresión, sin mostrar una tendencia definida. Esto sugiere que no existe una correlación significativa entre la eficiencia del AMS y estas variables, lo cual se confirma visualmente por la ausencia de una pendiente clara o significativa en las líneas de regresión.

Además, las Tablas 5.5.1, 5.5.2 y 5.5.3 corroboran esta observación, ya que demuestran numéricamente la nula correlación lineal entre las tres medidas de intensidad y la eficiencia del AMS, ya que el coeficiente de determinación o correlación (R^2) no aumenta en más 0.036 en comparación al modelo original sin considerar estas variables (Tabla 5.2.1), a pesar de que los valores de p value para las tres variables son significativamente menores a 0.05, indicando que las variables son significativas dentro del modelo.

Aunque p value es menor a 0.05 en todos los casos, los parámetros que acompañan a las variables en la regresión son aproximadamente cero, lo cual implica que la influencia de la aceleración espectral (Sa), de la media geométrica de la respuesta espectral de aceleración (Sa_{avg}) y de la velocidad incremental filtrada (FIV3) en la eficiencia del AMS se considera despreciable.

En resumen, aunque las tres variables analizadas cumplen con el criterio de significancia estadística, su contribución al modelo es muy bajo, lo que indica que no poseen una influencia real sobre la eficiencia del AMS.

6 Conclusiones

En esta memoria se realizó un análisis sobre la influencia de la forma espectral en la eficiencia de los amortiguadores de masa sintonizada (AMS). La eficiencia se definió como el coeficiente de atenuación entre la raíz cuadrática media (RMS) de la respuesta de desplazamientos de la estructura con y sin el dispositivo. Se investigó la correlación entre la métrica de intensidad SaRatio y la efectividad del AMS en un sistema de un grado de libertad abarcando un rango de periodos de entre 0.5 y 3.0 [s], con una fracción de amortiguamiento crítico del 3% y una razón de masas de 2%. El AMS de cada sistema fue sintonizado empleando las ecuaciones de Lin et al. (1994) para calcular los parámetros óptimos de sintonía del sistema estructura-AMS. Cada sistema fue sometido a 3738 registros sísmicos chilenos, orientados de forma aleatoria. Se realizó un análisis paramétrico para determinar los parámetros de SaRatio que maximizan la correlación con η para cada periodo.

El análisis reveló que existe una correlación entre la eficiencia del AMS (η) y la métrica SaRatio, con coeficientes de correlación (R^2) que oscilan entre 0.219 para un periodo T=1.5 [s] y 0.270 para T=0.5 [s], siendo este último el valor máximo observado. Esto responde positivamente a la hipótesis de que existe una correlación lineal entre la forma espectral de un registro sísmico y la efectividad del amortiguador de masa sintonizada.

Además, para los seis períodos analizados, los valores de p value fueron menores a 5%, lo que indica que existe evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula de ausencia de relación entre SaRatio y la eficiencia del AMS. Asimismo, este resultado refuerza la conclusión de que SaRatio es un predictor estadísticamente significativo de la eficiencia del AMS al nivel del 95%, lo que implica que SaRatio tiene una influencia real y no aleatoria en la efectividad del amortiguador de masa sintonizada.

En cuanto a las otras variables consideradas, como la duración del registro sísmico, el tipo de suelo, la aceleración espectral, la media geométrica de la respuesta espectral de aceleración y la velocidad incremental filtrada, se concluyó que no existe una correlación lineal significativa con la eficiencia del AMS. Esto indica que, a pesar de su relevancia en otras áreas del análisis sísmico, no influyen de manera directa en la efectividad de los amortiguadores de masa sintonizada.

Finalmente, este estudio contribuye al entendimiento de la eficiencia de los AMS y su relación con las características de los registros sísmicos y las medidas de intensidad, particularmente SaRatio, para sistemas de un grado de libertad. Como posible línea de investigación futura, se sugiere explorar la eficiencia del AMS en condiciones de comportamiento no lineal de las estructuras y para sistemas de múltiples grados de libertad, lo que reflejaría más fielmente el comportamiento de edificios reales. Además, podría emplearse como base para desarrollar una GMPE (Ground Motion Prediction Equation) que incluya términos específicos para AMS o estudiar otros tipos de amortiguadores, como los viscosos o de fricción, y analizar su interacción con las características del sismo.

7 Referencias

Celedon, B. (2011). *Generación de espectros input de energía para zonas de sismicidad elevada*.

Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras*.

Cortés Hernández, E. A. (2023). *Identificación de las propiedades dinámicas de sistemas estructura - amortiguador de masa sintonizada a partir de la respuesta sísmica del sistema acoplado* [Tesis de magister]. Universidad Técnica Federico Santa María.

Dávalos, H., & Miranda, E. (2019). Filtered incremental velocity: A novel approach in intensity measures for seismic collapse estimation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, *48*(12), 1384–1405. https://doi.org/10.1002/eqe.3205

Domizio, M., Ambrosini, D., & Curadelli, O. (2015). Performance of tuned mass damper against structural collapse due to near fault earthquakes. *Journal of Sound and Vibration*, *336*. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.10.007

Eads, L., Miranda, E., & Lignos, D. (2016). Spectral shape metrics and structural collapse potential. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, *45*(10), 1643–1659. https://doi.org/10.1002/eqe.2739

Lin, C. C., Hu, C. M., Wang, J. F., & Hu, R. Y. (1994). Vibration control effectiveness of passive tuned mass dampers. *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers,Series A/Chung-Kuo Kung Ch'eng Hsuch K'an*, *17*(3), 367–376. https://doi.org/10.1080/02533839.1994.9677600

MathWorks. (2023). *MATLAB and Simulink* (R2023a). MathWorks. https://www.mathworks.com/products/matlab.html

Miranda, S., Miranda, E., & Carlos de la Llera, J. (2020). The effect of spectral shape on damping modification factors. *Earthquake Spectra*, *36*(4), 2086–2111. https://doi.org/10.1177/8755293020936691

Rana, R., & Soong, T. T. (1998). Parametric study and simplified design of tuned mass dampers. *Engineering Structures*, *20*(3), 193–204.

Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A. W., Chung, R. M., Brown, R. H., Good, M. L., & Prabhakar, A. (1996). *A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications*.

Soong, T. T., & Spencer, B. F. (2002). Supplemental energy dissipation: State-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, *24*(3). https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00092-X

SyA Ingenieros Consultores. (2019). *Visita al edificio de la Cámara Chilena de la Construcción* [Fotografía]. SyA. Santiago, Chile. https://www.sya.com.co/2019/09/29/visita-al-edificio-de-la-camara-chilena-de-la-construccion/

Villaverde, R. (1994). *Seismic control of structures with damped resonant appendages*.