

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

“EFECTO DE LA DIRECCIONALIDAD EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DEL SUELO FLEXIBLE DEL DISTRITO DE CAJAMARCA”

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR:

BACH. JORGE LUIS CABANILLAS SIFUENTES

ASESOR:

ING. MARCOS MENDOZA LINARES

CAJAMARCA – PERÚ

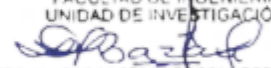
2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

FACULTAD DE INGENIERÍA

1. Investigador: JORGE LUIS CABANILLAS SIFUENTES
DNI: 45284267
Escuela Profesional: INGENIERIA CIVIL
2. Asesor: ING. MARCOS MENDOZA LINARES
Facultad de: INGENIERÍA
3. Grado Académico o título profesional
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
4. Tipo de investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación
"EFECTO DE LA DIRECCIONALIDAD EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DEL SUELO
FLEXIBLE DEL DISTRITO DE CAJAMARCA"
6. Fecha de evaluación: 31/05/2025
7. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINALL) ()
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 7%
9. Código de documento: 3117:463633503
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha de emisión: 31/05/2025

 FIRMA DEL ASESOR	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  Dra. Ing. Laura Sofía Bazán Díaz DIRECTORA
Nombre y Apellidos: Ing. Marcos Mendoza Linares DNI: 26612819	UNIDAD DE INVESTIGACION FI



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14016 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1128-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TÍTULO : EFECTO DE LA DIRECCIONALIDAD EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DEL SUELO FLEXIBLE DEL DISTRITO DE CAJAMARCA.

ASESOR : Ing. Marcos Mendoza Linares.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0281-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 05 de junio de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los nueve días del mes de junio de 2025, siendo las once horas (11:00 a.m.) en la Sala de Audiovisuales (Edificio 1A - Segundo Piso), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez.
Vocal : Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Secretario : M.Cs. Ing. Marco Antonio Silva Silva.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada EFECTO DE LA DIRECCIONALIDAD EN LA RESPUESTA ESPECTRAL DEL SUELO FLEXIBLE DEL DISTRITO DE CAJAMARCA, presentado por el Bachiller en Ingeniería Civil JORGE LUIS CABANILLAS SIFUENTES, asesorado por el Ing. Marcos Mendoza Linares, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 5.0 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 12.0 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 17.0 PTS. Dieciocho (En letras)

En consecuencia, se lo declara APROBADO con el calificativo de Dieciocho (18)... acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las DOCE horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez.
Presidente

Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Vocal

M.Cs. Ing. Marco Antonio Silva Silva.
Secretario

Ing. Marcos Mendoza Linares.
Asesor

AGRADECIMIENTO

שְׁמַע יִשְׂרָאֵל יְהוָה אֱלֹהֵינוּ יְהוָה אֶחָד

ESCUCHA ISRAEL, HASHEM ES NUESTRO ELOKIM, HASHEM ES UNO

וְאַהֲבָתָה אֶת יְהוָה אֱלֹהֶיךָ בְּכָל לִבְּךָ וּבְכָל נַפְשְׁךָ וּבְכָל מְאֹדְךָ

AMA A HASHEM, TU ELOKIM CON TODO TU CORAZON, CON TODA TU
ALMA Y CON TODOS TUS RECURSOS

וְהָיוּ הַדְּבָרִים הָאֵלֶּה אֲשֶׁר אֶנֶכִּי מְצַוְךָ הַיּוֹם עַל לִבְּךָ

ESTAS PALABRAS QUE TE ORDENO HOY DEBEN ESTAR SOBRE TU
CORAZON

וְשִׁנַּנְתָּם לְבָנֶיךָ וְדִבַּרְתָּ בָּם בְּשִׁבְתְּךָ בְּבֵיתְךָ וּבְלִקְחֶךָ בַּדֶּרֶךְ וּבְשֹׁכְבְּךָ וּבְקוּמְךָ

ENSEÑALES A TUS HIJOS Y HABLA DE ELLAS MIENTRAS ESTAS EN TU
CASA, MIENTRAS ESTAS DE VIAJE, AL ACOSTARTE Y LEVANTARTE

וְקוֹשְׁרָתָם לְאוֹת עַל יָדְךָ וְהָיוּ לְטִטּוּפֹת בֵּין עֵינֶיךָ

Y ATALAS COMO SEÑAL EN TU MANO Y QUE ESTEN COMO INSIGNIAS
ENTRE TUS OJOS

וְכַתַּבְתָּם עַל מַדְדוֹת בֵּיתְךָ וּבִשְׁעָרֶיךָ

Y ESCRIBELAS SOBRE LOS MARCOS DE TU CASA Y EN TUS PORTALES.

DEDICATORIA

A BARUJ HASHEM por guiar siempre mis pasos e iluminar siempre mis caminos.

A mi mamá Virginia Sifuentes Vásquez por su apoyo, ejemplo y amor incondicional.

A mi esposa Yolanda Terán Ramírez por su amor puro y sincero.

A mi hija Akeyla Cristell Cabanillas Machuca por ser luz para mis ojos.

Copyright©2025 by
JORGE LUIS CABANILLAS SIFUENTES
Todos los derechos reservados

CONTENIDO

CONTENIDO	vii
INDICE DE TABLAS	xi
INDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Formulación del problema.....	4
1.3. Hipótesis.....	4
1.4. Definición de Variables.....	4
1.4.1. Variable Independiente.....	4
1.4.2. Variable Dependiente.	4
1.5. Justificación de la investigación.....	5
1.6. Alcances o Delimitaciones de la investigación	5
1.7. Limitaciones	5
1.8. Objetivos	5
1.8.1. Objetivos General	5
1.8.2. Objetivos Específicos	6
1.9. Descripción de los capítulos.....	6
1.9.1. Capítulo I: Introducción.	6
1.9.2. Capítulo II: Marco Teórico.....	6
1.9.3. Capítulo III. Materiales y Métodos.....	6
1.9.4. Capítulo IV: Análisis y Discusión de Resultados.....	7
1.9.5. Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones.....	7
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Antecedentes Teóricos	8
2.1.1. Antecedentes Internacionales	8
2.1.2. Antecedentes Nacionales	10
2.2. Bases Teóricas.....	10
2.2.1. Registros Sísmicos.....	10
2.2.2. Peligro Sísmico.....	12
2.2.2.1. Zonificación	13
2.2.3. Perfiles del suelo.....	13
2.2.3.1. Perfil Tipo S ₀ : Roca Dura.	13

2.2.3.2.	Perfil Tipo S ₁ : Roca o Suelos Muy Rígidos.....	13
2.2.3.3.	Perfil Tipo S ₂ : Suelos Intermedios.....	14
2.2.3.4.	Perfil Tipo S ₃ : Suelos Blandos.....	14
2.2.3.5.	Perfil Tipo S ₄ : Condiciones Excepcionales.....	14
2.2.3.6.	Parámetros de Sitio (S, T _P , T _L y T _s).....	15
2.2.3.7.	Factores de amplificación sísmica	16
2.2.3.8.	Categoría de las edificaciones y factor de uso (U).....	16
2.2.3.9.	Sistemas estructurales	17
2.2.3.10.	Sistemas estructurales y Coeficiente Básico de Reducción de las Fuerzas Sísmicas.	18
2.2.3.11.	Factores de Irregularidad (I _a , I _p).....	18
2.2.3.12.	Categoría de la Edificación e Irregularidad.....	19
2.2.3.13.	Coeficiente de Reducción de las Fuerzas Sísmicas, R.	19
2.2.3.14.	Aceleración Espectral.....	19
2.2.4.	Ecuación de movimiento: Fuerza externa	19
2.2.4.1.	Sistemas de un grado de libertad.....	19
2.2.4.2.	Relación fuerza-desplazamiento	20
2.2.4.3.	Fuerza de amortiguamiento.....	22
2.2.4.4.	Uso de la Segunda ley del movimiento de Newton	23
2.2.4.5.	Ecuación de movimiento: Excitación sísmica.....	24
2.2.4.6.	Métodos de solución de la ecuación diferencial.....	26
2.2.4.7.	Vibración libre no amortiguada	30
2.2.4.8.	Vibración libre viscosamente amortiguada	34
2.2.4.9.	Respuesta a un impulso unitario	38
2.2.4.10.	Respuesta a una fuerza arbitraria	40
2.2.4.11.	Fuerza escalonada	42
2.2.4.12.	Fuerza tipo rampa o linealmente creciente.....	45
2.2.5.	Evaluación numérica de la respuesta dinámica	46
2.2.5.1.	Métodos basados en la interpolación de la excitación	46
2.2.6.	Métodos de combinación de componentes horizontales	50
2.2.6.1.	Media Geométrica (Geometric Mean) “GM”	50
2.2.6.2.	Media Geométrica, Rotación, Dependiente, Percentil (GMRotDpp)	52
2.2.6.3.	Media Geométrica, Rotación, Independiente, Percentil (GMRotIpp)	54
2.2.6.4.	Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS).....	58
2.2.6.5.	Respuesta Máxima en el Plano Horizontal (RotD100)	59

2.3. Definición de términos básicos	61
CAPITULO III MATERIALES Y METODOS.....	63
3.1. Ubicación del proyecto.....	63
3.1.1. Ubicación política.....	63
3.2. Recursos, equipos, materiales y herramientas utilizados en la investigación ..	63
3.2.1. Recursos humanos	63
3.2.2. Equipos	63
3.2.3. Softwares	63
3.3. Tipo, nivel, diseño y método de investigación.....	63
3.4. Población de estudio.....	64
3.5. Muestra.....	64
3.6. Unidad de análisis	64
3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	64
3.7.1. Acelerógrafo UNC-Cajamarca:	64
3.7.2. Acelerógrafo CIP- Cajamarca:	65
3.8. Técnicas de procesamiento de datos.	66
3.9. Procedimiento Metodológico	66
3.9.1. Cálculo del Espectro Según Norma E 030	66
3.9.1.1. Espectro de la Aceleración.....	67
3.9.1.2. Espectro de la Velocidad.....	67
3.9.1.3. Espectro del Desplazamiento	68
3.9.2. Obtención de la Base de datos.....	68
3.9.3. Selección de la Base de Datos	68
3.9.4. Procesamiento de la Base datos.....	73
3.9.4.1. Media Geométrica (GM) de Espectro de Respuesta.	73
3.9.4.2. GMRotDpp (GM: Media Geométrica, Rot: Rotación, D: Dependiente, pp: percentil).....	73
3.9.4.3. GMRotIpp (GM: Media Geométrica, Rot: Rotación, I: Independiente, pp: percentil).....	74
3.9.4.4. Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS).....	76
3.9.4.5. Respuesta Máxima en el Plano Horizontal (RotD100)	76
3.9.5. Presentación de resultados.....	77
3.9.5.1. Acelerógrafo UNC Cajamarca	77
3.9.5.2. Acelerógrafo CIP Cajamarca	84
CAPITULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	91
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95

5.1. Conclusiones	95
5.2. Recomendaciones.....	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXOS	99

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Factores de zona	13
Tabla 2.	Resume valores típicos para los distintos tipos de perfiles de suelo:	15
Tabla 3.	Parámetros de Sitio (S, TP y TL).....	15
Tabla 4.	Periodos “T _P ” Y “T _L ”	15
Tabla 5.	Periodo T _s	16
Tabla 6.	Categoría de las edificaciones y factor de uso (U)	16
Tabla 7.	Categoría y sistema estructural de las edificaciones.....	17
Tabla 8.	Sistemas estructurales y Coeficiente Básico de Reducción de las Fuerzas Sísmicas.	18
Tabla 9.	Factores de Irregularidad (I _a).	18
Tabla 10.	Factores de Irregularidad (I _p).	19
Tabla 11.	Categoría de la Edificación e Irregularidad.	19
Tabla 12.	Coeficientes en las fórmulas de recurrencia($\zeta < 1$)	49
Tabla 13.	Tipo de Investigación.	64
Tabla 14.	Datos del Acelerógrafo – UNC CAJAMARCA.....	65
Tabla 15.	Datos Acelerógrafo CIP-CAJAMARCA.....	65
Tabla 16.	Datos Generales de Diseño Espectro E030	66
Tabla 17.	Registros Sísmicos Acelerógrafo UNC Cajamarca	69
Tabla 18.	Registros Sísmicos Acelerógrafo CIP-Cajamarca	71
Tabla 19.	GM de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca	77
Tabla 20.	GMRotD00 de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca.....	77
Tabla 21.	GMRotD50 de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca.....	77
Tabla 22.	GMRotD100 de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca.....	78
Tabla 23.	GMRotI50 de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca	78
Tabla 24.	SRSS de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca.....	78
Tabla 25.	RotD100 de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca	79
Tabla 26.	GM de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca	79
Tabla 27.	GMRotD00 de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca.....	79
Tabla 28.	GMRotD50 de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca.....	80
Tabla 29.	GMRotD100 de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca.....	80
Tabla 30.	GMRotI50 de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca	80
Tabla 31.	SRSS de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca	81
Tabla 32.	RotD100 de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca	81
Tabla 33.	GM del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca.....	81

Tabla 34.	GMRotD00 del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca	82
Tabla 35.	GMRotD50 del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca	82
Tabla 36.	GMRotD100 del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca	82
Tabla 37.	GMRotI50 del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca	83
Tabla 38.	SRSS del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca.....	83
Tabla 39.	RotD100 del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca	83
Tabla 40.	GM de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca.....	84
Tabla 41.	GMRotD00 de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca	84
Tabla 42.	GMRotD50 de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca	84
Tabla 43.	GMRotD100 de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca	85
Tabla 44.	GMRotIpp de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca.....	85
Tabla 45.	SRSS de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca.....	85
Tabla 46.	RotD100 de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca	86
Tabla 47.	GM de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca	86
Tabla 48.	GMRotD00 de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca.....	86
Tabla 49.	GMRotD50 de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca.....	87
Tabla 50.	GMRotD100 de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca.....	87
Tabla 51.	GMRotIpp de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca	87
Tabla 52.	SRSS de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca.....	88
Tabla 53.	RotD100 de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca	88
Tabla 54.	GM del desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca.....	88
Tabla 55.	GMRotD00 del desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca	89
Tabla 56.	GMRotD50 del desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca	89
Tabla 57.	GMRotD100 del desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca	89
Tabla 58.	GMRotI50 del Desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca.....	90
Tabla 59.	SRSS del Desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca	90
Tabla 60.	RotD100 del Desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca.....	90

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Acelerógrafo de movimiento	11
Figura 2.	Dibujo esquemático de un instrumento para medir vibraciones y registrar movimiento.	11
Figura 3.	Zonificación Sísmica.	12
Figura 4.	Sistema de un grado de libertad: (a) fuerza aplicada $p(t)$ (b) movimiento del terreno inducido por un sismo.	20
Figura 5.	Relación fuerza-desplazamiento	21
Figura 6.	Relación fuerza-deformación para un elemento estructural de acero.....	22
Figura 7.	Fuerza de amortiguamiento	23
Figura 8.	Segunda ley del movimiento de Newton	24
Figura 9.	Excitación sísmica	25
Figura 10.	Fuerza sísmica efectiva: movimiento horizontal del terreno.....	26
Figura 11.	Vibración libre de un sistema sin amortiguamiento.	33
Figura 12.	Vibración libre de sistemas subamortiguado, críticamente amortiguado y sobreamortiguado.	35
Figura 13.	Efectos del amortiguamiento sobre la vibración libre.	38
Figura 14.	(a) Impulso unitario, (b) respuesta al impulso unitario.....	40
Figura 15.	Explicación esquemática de la integral de convolución.	41
Figura 16.	(a) Sistema de 1GDL; (b) fuerza escalonada; (c) respuesta dinámica.....	42
Figura 17.	Relación de frecuencias ω/ω_n	43
Figura 18.	(a) Sistema de 1GDL, (b) fuerza creciente, (c) respuestas dinámica y estática.	46
Figura 19.	Notación para una excitación interpolada linealmente.	47
Figura 20.	Espectros de respuesta que muestran ángulos de rotación independientes .	51
Figura 21.	Media geométrica de los movimientos registrados en la Presa Pacoima	54
Figura 22.	Ángulos de rotación correspondientes al máximo y mínimo valor de la media geométrica.....	56
Figura 23.	Relación de la media geométrica de un conjunto de periodos con respecto al GMRotDpp en función del ángulo de rotación.....	57
Figura 24.	Comparación de los espectros de respuesta de las componentes EO y NS con el método de combinación espectral SRSS de la estación ALOR perteneciente al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.....	59
Figura 25.	componentes horizontales del terremoto de Tabas de 1978 en la estación de Tabas. RotI50 es casi igual a RotD100 para periodos de 1,7 a 3,3 seg.	61
Figura 26.	Espectro de la Aceleración para la ciudad de Cajamarca	67
Figura 27.	Espectro de la Velocidad para la ciudad de Cajamarca	67

Figura 28. Espectro del Desplazamiento para la ciudad de Cajamarca	68
Figura 29. MEDIA GEOMETRICA (GM) - ACELERACIÓN - UNC.....	99
Figura 30. MEDIA GEOMETRICA (GM) – VELOCIDAD - UNC.....	100
Figura 31. MEDIA GEOMETRICA (GM) – DESPLAZAMIENTO – UNC	101
Figura 32. RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) - ACELERACIÓN – UNC.....	102
Figura 33. RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) - VELOCIDAD – UNC.....	103
Figura 34. RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) - DESPLAZAMIENTO – UNC.....	104
Figura 35. RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) – ACELERACIÓN – UNC.....	105
Figura 36. RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) – VELOCIDAD – UNC.....	106
Figura 37. RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) – DESPLAZAMIENTO – UNC.....	107
Figura 38. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) – ACELERACIÓN – UNC.....	108
Figura 39. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) – VELOCIDAD – UNC.....	109
Figura 40. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) – DESPLAZAMIENTO – UNC	110
Figura 41. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) – ACELERACIÓN – UNC.....	111
Figura 42. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) – VELOCIDAD – UNC.....	112
Figura 43. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) – DESPLAZAMIENTO – UNC	113
Figura 44. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) – ACELERACIÓN – UNC.....	114
Figura 45. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) – VELOCIDAD – UNC.....	115
Figura 46. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) – DESPLAZAMIENTO – UNC	116
Figura 47. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) – ACELERACIÓN – UNC	117
Figura 48. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) – VELOCIDAD – UNC	118
Figura 49. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) – DESPLAZAMIENTO – UNC.....	119

Figura 50. GM – GMRotD50 - GMRotI50 (ACELERACIÓN) – UNC.....	120
Figura 51. GM – GMRotD50 - GMRotI50 (VELOCIDAD) – UNC	121
Figura 52. GM – GMRotD50 - GMRotI50 (DESPLAZAMIENTO) – UNC.....	122
Figura 53. SRSS - RotD100 (ACELERACIÓN) – UNC.....	123
Figura 54. SRSS - RotD100 (VELOCIDAD) – UNC	124
Figura 55. SRSS - RotD100 (DESPLAZAMIENTO) – UNC.....	125
Figura 56. GMRotD00 – 50 – 100 (ACELERACIÓN) – UNC.....	126
Figura 57. GMRotD00 – 50 – 100 (VELOCIDAD) – UNC.....	127
Figura 58. GMRotD00 – 50 – 100 (DESPLAZAMIENTO) – UNC	128
Figura 59. MEDIA GEOMETRICA (GM) - ACELERACIÓN – CIP	129
Figura 60. MEDIA GEOMETRICA (GM) - VELOCIDAD – CIP	130
Figura 61. MEDIA GEOMETRICA (GM) - DESPLAZAMIENTO – CIP	131
Figura 62. RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) - ACELERACIÓN – CIP	132
Figura 63. RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) - VELOCIDAD – CIP.....	133
Figura 64. RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) - DESPLAZAMIENTO – CIP	134
Figura 65. RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) – ACELERACIÓN – CIP	135
Figura 66. RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) – VELOCIDAD – CIP.....	136
Figura 67. RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) – DESPLAZAMIENTO – CIP	137
Figura 68. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) – ACELERACIÓN – CIP	138
Figura 69. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) – VELOCIDAD – CIP	139
Figura 70. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) – DESPLAZAMIENTO – CIP	140
Figura 71. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) – ACELERACIÓN – CIP	141
Figura 72. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) – VELOCIDAD – CIP	142
Figura 73. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) – DESPLAZAMIENTO – CIP	143
Figura 74. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) – ACELERACIÓN – CIP	144

Figura 75. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) – VELOCIDAD – CIP	145
Figura 76. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) – DESPLAZAMIENTO – CIP	146
Figura 77. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) – ACELERACIÓN – CIP.....	147
Figura 78. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) – VELOCIDAD – CIP.....	148
Figura 79. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) – DESPLAZAMIENTO – CIP	149
Figura 80. GM – GMRotD50 - GMRotI50 (ACELERACIÓN) – CIP	150
Figura 81. GM – GMRotD50 - GMRotI50 (VELOCIDAD) – CIP.....	151
Figura 82. GM – GMRotD50 - GMRotI50 (DESPLAZAMIENTO) – CIP	152
Figura 83. SRSS - RotD100 (ACELERACIÓN) – CIP	153
Figura 84. SRSS - RotD100 (VELOCIDAD) – CIP	154
Figura 85. SRSS - RotD100 (DESPLAZAMIENTO) – CIP	155
Figura 86. GMRotD00 – 50 – 100 (ACELERACIÓN) – CIP	156
Figura 87. GMRotD00 – 50 – 100 (VELOCIDAD) – CIP	157
Figura 88. GMRotD00 – 50 – 100 (DESPLAZAMIENTO) – CIP	158

RESUMEN

En la presente investigación se han comparado diferentes combinaciones de direccionalidad horizontal de movimiento del suelo, usando una base de datos del distrito de Cajamarca - Perú. Las combinaciones de direccionalidad se calcularon para las respuestas espectrales horizontales ortogonales de aceleraciones, velocidades y desplazamientos, de un sistema de un grado de libertad con 5% de amortiguamiento, rotados para todos los ángulos no redundantes entre 0° y 180° . Las combinaciones direccionales fueron obtenidas con el software SOF.I.P.S.Seismic. Se procesaron 86 pares de señales sísmicas de dos estaciones acelerográficas ubicadas en la ciudad de Cajamarca. Se obtuvieron 41 registros de la estación ubicada en los campus universitarios de la Universidad Nacional de Cajamarca (UNC) y 45 ubicadas en el Colegio de Ingenieros de Cajamarca (CIP). Las diferentes combinaciones de las componentes horizontales fueron comparadas con el espectro de la norma E.030 Diseño Sismorresistente. Se concluye que la combinación direccional asociada al 100% percentil de las combinaciones rotadas de pseudo aceleraciones (RotD100) es superior al espectro de la norma E.030. Así mismo, se calcularon los periodos predominantes del suelo correspondientes a los periodos para los valores pico de respuesta espectral de velocidades del 100% percentil de espectros rotados. Los periodos predominantes promedio varían alrededor del 1.75 seg. lo cual permite clasificar al suelo de estas zonas como un suelo blando S3, siendo mayor el periodo de la zona de la UNC en 17.14% respecto al del CIP.

Palabras clave – Acelerogramas, Aceleración Ortogonal Horizontal, Pseudo aceleración, Periodo, Suelo Blando, Percentil, Amortiguamiento.

ABSTRACT

In the present investigation, different combinations of horizontal ground motion directionality have been compared using a database from the district of Cajamarca - Peru. The directionality combinations were calculated for the orthogonal horizontal spectral responses of accelerations, velocities and displacements, of a one degree of freedom system with 5% damping, rotated for all non-redundant angles between 0 and 180°. The directional combinations were obtained with SOF.I.P.S.Seismic software. Eighty-six pairs of seismic signals were processed from two accelerometer-graphic stations located in the city of Cajamarca. Forty-one records were obtained from the station located at the university campus of the National University of Cajamarca (UNC) and 45 from the Cajamarca College of Engineers (CIP). The different combinations of the horizontal components were compared with the spectrum of the E.030 Seismic Resistant Design standard. It is concluded that the directional combination associated to the 100% percentile of the rotated combinations of pseudo-accelerations (RotD100) is superior to the spectrum of the E.030 standard. Likewise, the predominant periods of the soil corresponding to the periods for the peak values of spectral response of velocities of the 100% percentile of rotated spectra were calculated. The average predominant periods vary around 1.75 sec. which allows classifying the soil of these zones as a soft soil S3, with the period of the UNC zone being higher by 17.14% with respect to that of the CIP.

Keywords – Acceleration, Horizontal Orthogonal Acceleration, Pseudo acceleration, Period, Soft Soil, Percentile, Damping.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

Los sismos generan en el suelo un movimiento tridimensional, que con fines prácticos de ingeniería son captados y registrados con sensores de movimiento del suelo mediante tres componentes, dos componentes horizontales y una componente vertical. Sin embargo, las medidas registradas por los sensores pueden variar respecto a las intensidades reales de movimiento de suelo. Esta dependencia de la orientación de los sensores es más pronunciada para movimientos fuertemente correlacionados, tal como ocurre a menudo para períodos de 1 seg o mayores (Boore et al., 2006).

La media geométrica (geoman) de los espectros de respuesta de las dos componentes horizontales ortogonales de movimiento del suelo, depende de la orientación de los sensores de movimiento, lo que implica que la medida registrada de intensidad puede diferir del movimiento real del suelo. Además, la dependencia de orientación de los sensores es más pronunciado para movimientos fuertemente correlacionados, tal como ocurre a menudo en períodos de 1 seg o más. Para resolver este problema David Boore et.al definieron dos formas de determinar la media geométrica. “GMRotDpp, utiliza el ángulo de rotación dependiente del periodo y GMRotIpp utiliza el ángulo de rotación independiente del periodo” (Boore ,2010). Ambas medidas se basan en el conjunto de medias geométricas (geoman) calculadas a partir de los movimientos horizontales ortogonales registrados, rotados a través de todos los posibles ángulos de rotación no redundantes. GMRotDpp es determinado como el percentil (ppth) del conjunto de medias geométricas (geoma) para un período dado de un oscilador de 1GDL. Por ejemplo, GMRotD00, GMRotD50 y GMRotD100 corresponden a los valores mínimos, mediana, y máximos, respectivamente. Las rotaciones que conducen a GMRotDpp dependen de período, sin embargo, el GMRotIpp usa una rotación que es independiente del período, el ángulo inicialmente se seleccionada para minimizar la dispersión de la media geométrica que depende de la rotación (normalizado por GMRotDpp) en el rango utilizable de períodos del oscilador de 1 grado de libertad. (Arnold Ramsey Mendo Rodríguez, 2015)

GMRotI50 fue la medida de intensidad de movimiento del suelo inicialmente usado en el desarrollo de las ecuaciones de predicción de movimiento del suelo desarrolladas por el Pacific Earthquake Engineering Center Next Generation Attenuation project. Comparando los valores obtenidos con la media geométrica (geoman) y la medida GMRotI50 se obtuvo diferencias menores a 3% (Boore, 2010) Los mapas de peligro

sísmico con probabilidad uniforme propuestos por el USGS (2002) se calcularon usando leyes de atenuación calibradas para estimar la medida geométrica de las dos componentes horizontales (“geoman”). Sin embargo, las aceleraciones espectrales para cualquier componente horizontal, particularmente en zonas cercanas a fallas pueden ser sustancialmente mayores que la media geométrica (Luco, 2007). En consecuencia, el USGS (2008) para eliminar el sesgo poco conservador en la estimación las aceleraciones de diseño y aproximar la aceleración de demanda espectral para la máxima dirección, ajustó sus mapas de peligro sísmico. (Arnold Ramsey Mendo Rodríguez, 2015)

1.1. Planteamiento del problema

El movimiento del suelo es un fenómeno tridimensional que con fines de diseño en ingeniería estructural es descrito en términos de tres componentes: un componente en la dirección vertical y dos componentes horizontales ortogonales. En relación con una estructura, la dirección del terreno el movimiento y la aceleración espectral pueden basarse en diferentes combinaciones de respuesta espectral, tales como la Media Geométrica (“geomean”), la Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS) de los dos componentes horizontales, o la "dirección máxima" de las dos componentes, las combinaciones direccionales independientes de la dirección de los sensores propuestas por Boore, et. (2006), entre otras. Los movimientos del terreno del USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos) se basan en la media geométrica porque esa descripción está incrustada en la atenuación del movimiento del suelo modelos. Alternativamente, la dirección puede basarse en la aceleración espectral de dirección máxima es determinado calculando la aceleración espectral máxima basado en ambos componentes horizontales para una órbita completa (orientaciones de 0° a 360°). La dirección máxima es la orientación con la demanda espectral máxima (identificada por el punto de la órbita más alejado del origen).

La orientación del acelerógrafo al captar los registros es un factor que genera incertidumbre en la ingeniería sísmica, es por ende que en este trabajo de titulación se desea estudiar y comparar, al girar las componentes en un intervalo de 0° a 90° para combinarlas por los métodos: Media Geométrica(GM), Media Geométrica, Rotación, dependiente (GMRotD) y Media Geométrica, Rotación, Independiente (GMRotI); representaría una gran diferencia con los métodos de Respuesta Máxima en el Plano Horizontal (RotD100). (Boore, 2006)

Por ello los acelerógrafos cumplen un papel fundamental al momento que registran un sismo, ya que la vibración del suelo es transmitida a los acelerógrafos y los acelerógrafos registran la aceleración que produce el suelo durante un evento sísmico y lo representa mediante acelerogramas. Debido a ello se han desarrollado diferentes métodos de combinación de las componentes horizontales como: Respuesta Máxima en el Plano Horizontal (RotD100), Media Geométrica (GM), Media Geométrica, Rotación, dependiente, Percentil (GMRotDpp), Media Geométrica, Rotación, Independiente, Percentil (GMRotIpp) y Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS), para hallar los espectros de respuesta de varias estructuras de 1 grado de libertad.

En el estudio de los efectos sísmicos en las edificaciones debe ser considerado el efecto de la direccionalidad, lo que significa que la Media Geométrica (GM) de las dos componentes horizontales, como medida de la intensidad de un sismo, puede diferir para el mismo movimiento de tierra dependiendo de la orientación del registro (Boore et al. 2006).

El efecto de direccionalidad en la amenaza se debe a que, para obtener medidas de intensidad del movimiento del suelo, se utiliza la media geométrica de los espectros de respuesta de las componentes horizontales de los registros como medida de la intensidad, aunque existen otras medidas como la media cuadrática, la media aritmética o la mayor de ambas componentes (Douglas, 2003)

La media geométrica es una de las formas más usadas de combinación de las dos componentes horizontales de un acelerograma en el campo de la sismología para la ingeniería (Douglas, 2003) la razón del uso de la media geométrica es que reduce la dispersión en la regresión para la predicción de leyes de atenuación (Beyer & Bommer, 2006).

El Perú es un país altamente sísmico, ya que se encuentra en el cinturón de Fuego del Pacífico, esto puede ocasionar que las estructuras de las edificaciones, ante estas vibraciones, pueden llegar al colapsar o sufrir alguna falla estructural y en la ciudad de Cajamarca se han registrado en los últimos 5 años dos sismos que superan los 7 grados de magnitud en la escala de Ritter: el primero el 28/11/2021 a las 10:52:14 de magnitud 7.4 Mw. y el otro el 26/05/2019 a las 07:41:12 de magnitud de 7.5 Mw.

La base de datos de los registros sísmicos de gran magnitud en el Perú podría ser considerados escasos, más aún para zonas donde prácticamente la actividad sísmica es

poca o nula. Para el caso del distrito de Cajamarca donde cuenta con tan solo dos acelerógrafos, esto puede significar un impedimento para estimar el espectro de respuesta sísmica mediante análisis utilizando los diferentes métodos de combinación de las componentes horizontales como: Respuesta Máxima en el Plano Horizontal (RotD100), Media Geométrica (GM), Media Geométrica, Rotación, dependiente, Percentil (GMRotDpp), Media Geométrica, Rotación, Independiente, Percentil (GMRotIpp) y Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS).

La falta de registros sísmicos de gran magnitud, la incompatibilidad entre las señales reales junto a la falta de información de la norma sismorresistente peruana sobre la generación de registros sísmicos para el distrito de Cajamarca, son las causas principales para determinar el efecto de la direccionalidad en la respuesta espectral

1.2. Formulación del problema

Según la Norma de Diseño Sismorresistente E 030 (2018), el distrito de Cajamarca está ubicada en una zona sísmica alta (zona 3). Por lo que las estructuras están sujetas a un posible colapso, por lo que los diseños sísmicos deben realizarse de acuerdo a los datos de los espectros de respuesta

De lo anterior descrito, se tiene que el problema de la presente investigación se sintetiza en la siguiente interrogante:

¿Cuál es el efecto de la direccionalidad en la respuesta espectral del suelo flexible del distrito de Cajamarca?

1.3. Hipótesis

El efecto de la direccionalidad en la respuesta espectral del suelo flexible del distrito de Cajamarca cumple con la direccionalidad en la respuesta espectral propuesta por la Norma de Diseño Sismorresistente E 030 (2018)

1.4. Definición de Variables.

1.4.1. Variable Independiente.

- Los registros sísmicos.

1.4.2. Variable Dependiente.

- Espectro de diseño sísmico.

1.5. Justificación de la investigación

Cajamarca se encuentra ubicado en la Zona Sísmica 3, si bien es cierto no se ha producido liberación de energía de gran intensidad, existe la probabilidad de que ocurra uno de sismicidad alta y con intensidades que varían de severo a destructor, es por ello que queremos analizar el efecto de la amplificación de la respuesta espectral según la combinación direccional, para poder entender mejor el movimiento de nuestros suelos en un posible evento sísmico.

La elaboración de la combinación direccional se investigará evaluando las componentes Horizontales de los registros sísmicos brindados por los acelerogramas que tienen el suelo flexible. Usando los métodos de Respuesta Máxima en el Plano Horizontal (RotD100), Media Geométrica (GM), Media Geométrica, Rotación, dependiente, Percentil (GMRotDpp), Media Geométrica, Rotación, Independiente, Percentil (GMRotIpp) y Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS).

1.6. Alcances o Delimitaciones de la investigación

- Se estudio la base de datos de registros sísmicos disponibles del acelerógrafo ubicado en el distrito de Cajamarca
- Se calculo la respuesta de una estructura de 1 grado de libertad con un valor de amortiguamiento (ξ) constante de 5%, sometido simultáneamente a las 2 componentes horizontales ortogonales de los registros en estudio.
- Se obtuvo la combinación de la respuesta espectral, mediante los métodos: Respuesta Máxima en el Plano Horizontal (RotD100), Media Geométrica (GM), Media Geométrica, Rotación, dependiente, Percentil (GMRotDpp), Media Geométrica, Rotación, Independiente, Percentil (GMRotIpp) y Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS), para las señales sísmicas analizadas.

1.7. Limitaciones

- La cantidad de Acelerógrafos.

1.8. Objetivos

1.8.1. Objetivos General

- Determinar el efecto de direccionalidad en la respuesta espectral del suelo flexible, del distrito de Cajamarca para estructuras de un grado de libertad

1.8.2. Objetivos Específicos

- Elaborar los espectros de repuesta para la aceleración, velocidad y desplazamiento mediante los métodos de combinación: Respuesta Máxima en el Plano Horizontal (RotD100), Media Geométrica (GM), Media Geométrica, Rotación, dependiente, Percentil (GMRotDpp), Media Geométrica, Rotación, Independiente, Percentil (GMRotIpp) y Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS).
- Comparar el espectro que propone la Norma de Diseño Sismorresistente E 030 (2018) con el método moderno (RotD100)
- Determinar las diferencias entre los espectros de respuesta de los métodos GM, GMRotD y GMRotI.
- Determinar las diferencias entre los espectros de repuesta de los métodos RotD100 y SRSS.
- Calcular el factor de escala

1.9. Descripción de los capítulos

1.9.1. Capítulo I: Introducción.

Se ofrece una introducción que abarca desde el planteamiento y formulación del problema, hipótesis, justificación, alcances, limitaciones, objetivos y descripción del contenido de la tesis.

1.9.2. Capítulo II: Marco Teórico.

Se presentan los antecedentes teóricos del tema de investigación, se exponen las bases teóricas referentes al efecto de la direccionalidad en la respuesta espectral, y por último la definición de términos básicos usados en el documento.

1.9.3. Capítulo III. Materiales y Métodos.

En el tercer capítulo se hizo una descripción geográfica de la investigación y el periodo en el que se obtuvieron los datos, se explicó la metodología que se siguió, los procedimientos realizados para la obtención y análisis de datos y la presentación de resultados de la investigación.

1.9.4. Capítulo IV: Análisis y Discusión de Resultados.

En este capítulo se analizó y discutió el análisis comparativo entre los métodos: media geométrica (GM), media geométrica de la rotación dependiente del percentil (GMRotDpp), media geométrica de la rotación independiente del percentil (GMRotIpp). Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS), respuesta máxima en el plano horizontal (RotD100).

1.9.5. Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones.

Se exponen las conclusiones derivadas del análisis de resultados, además se muestran las recomendaciones necesarias sobre aspectos no incluidos en la investigación que servirán de referencia para futuras investigaciones similares.

Finalmente, se muestran las referencias bibliográficas de los documentos que se utilizaron para el desarrollo del trabajo de investigación.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes Teóricos

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Diaz et al. (2015) en su artículo científico “Efecto de la direccionalidad en la amenaza sísmica de la ciudad de México” presentado en el XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica desarrollado en Acapulco, México aborda que la Media Geométrica (GM) es la combinación de las dos componentes horizontales de un acelerograma en la ingeniería sísmica, esta medida depende de la orientación de los acelerógrafos (efecto de direccionalidad), para dar solución a este problema de la orientación se propuso dos medidas independientes de la orientación de los sensores, denominados: Media Geométrica, Rotación, dependiente, Percentil (GMRotDpp) y Media Geométrica, Rotación, Independiente, Percentil (GMRotIpp). La direccionalidad se basa en el cálculo de las dos medidas analíticas independiente de la orientación; la Media Geométrica (GM) da origen a la GMRotDpp y GMRotIpp, a través de los espectros de respuesta. En la investigación se llegaron a las siguientes conclusiones: la GMRotDpp y GMRotIpp son útiles para establecer ecuaciones de predicción del movimiento del suelo, por la razón de que no depende de la orientación del sensor.

Pinzon, Hidalgo y Pujades (2015) en su artículo “medidas de intensidad sísmica independientes de la orientación del sensor: aplicación a una base de datos con acelerogramas de Costa Rica, El Salvador y Nicaragua” proponen medidas que son independientes de la orientación de los sensores, denominadas: Media Geométrica, Rotación, dependiente, Percentil (GMRotDpp) y Media Geométrica, Rotación, Independiente, Percentil (GMRotIpp). Estas medidas se han originado por la dependencia que tiene la media geométrica de la respuesta espectral con las componentes horizontales con el ángulo de orientación del acelerógrafo. Para obtener GMRotIpp, se necesita el cálculo de GMRotDpp, entonces GMRotIpp ya es una medida que no depende del sensor ni del periodo y es útil para el análisis espectral, como para el análisis dinámico de las estructuras. En la investigación se llegaron a las siguientes conclusiones: La GMRotI50 por lo general es mayor que la GMRotD50 y la GM sin rotar, existe una diferencia mínima entre la GMRotD50, GMRotI50 y la GM sin rotar, se recomendable utilizar las medidas independientes de la orientación.

Suarez (2020) en su trabajo de titulación de la Universidad Católica de Santo Domingo Guayaquil titulada “Evaluación de combinación de componentes horizontales de registros sísmicos usando los métodos: GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS”. estudia los métodos de combinación de componentes horizontales como las siguientes: GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS; en la cual se estudiará la importancia del tiempo en donde se producen las máximas respuestas de estructuras de 1 grado de libertad. Su objetivo es calcular los espectros elásticos, para posteriormente compararlos entre sí, considerando los factores de: orientación del acelerógrafo, frecuencia de los registros, amortiguamiento considerado, etc. La media geométrica (GM) su finalidad es encontrar un espectro de respuesta que considera las máximas respuestas de cada componente horizontal, la media geométrica (GM) resulta ser cero cuando uno de los sensores esta alineado con la dirección de polarización. Para obtener el GMRotDpp, se utiliza todas las rotaciones no redundantes entre 0° y 90° , se ordena de menor a mayor los valores de la media geométrica (GM), para los ángulos, en función del periodo. Para obtener el GMRotIpp, se necesita primero el cálculo de GMRotDpp, el objetivo de la GMRotIpp es encontrar un espectro de respuesta correspondiente a un solo ángulo de rotación. En la investigación se llegó a las siguientes conclusiones: El método GMax en comparación con el método SRSS proporciona resultados más realistas. Debido a todos los registros sísmicos analizados, se obtuvo un factor de escala de 1.3 para cualquier periodo.

Boore (2006) en el artículo científico “Orientation-Independent, Nongeometric-Mean Measures of Seismic Intensity from Two Horizontal Components of Motion” presenta nuevas medidas de intensidad sísmica, basado en la combinación de las componentes horizontales del movimiento del suelo, que son independientes de la orientación de los sensores y corresponde a un solo ángulo de rotación para todos los periodos, en estas nuevas medidas no utilizan la media geométrica (GM). Estas nuevas medidas se denominan: RotInn y RotDnn. En la investigación se llegaron a las siguientes conclusiones: el percentil 50 basado en los ángulos de rotación dependientes del periodo son semejantes a los valores del percentil 50 del GMRot, los ángulos de rotación independientes del periodo son menos estables que las medidas de GMRot.

Boore, Watson y Abrahamson (2005) En el artículo “Orientation-Independent Measures of Ground Motion” presentan nuevas medidas de intensidad sísmica para el movimiento del suelo, que son independientes de la orientación de los sensores que registran el evento sísmico, el cálculo de estas nuevas medidas se obtienen a partir de la

media geométrica (GM) de los espectros de respuesta para todos los ángulos no redundantes para las componentes horizontales ortogonales, estas nuevas medidas son "GMRotDpp" y "GMRotIpp", estas nuevas medidas demuestran que son relativamente más grande que los espectros de respuesta de la media geométrica (GM). En la investigación se llegaron a las siguientes conclusiones: para el cálculo de la "GMRotDpp" y "GMRotIpp" se requiere mucho más tiempo en comparación con el cálculo de la media geométrica (GM), para "GMRotDpp" el periodo de las rotaciones son dependientes y para "GMRotIpp" es que requiere la elección de un rango de periodos para su cálculo.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Mendo (2015) en su tesis de posgrado "Bases para la implementación de la norma peruana de análisis y diseño de edificios con aislación sísmica" manifiesta que los sismos generan en el suelo un movimiento tridimensional, dos componentes horizontales y una componente vertical. Las medidas registradas por los sensores pueden variar respecto a las intensidades reales de movimiento de suelo. La media geométrica (GM) de las dos componentes horizontales ortogonales del movimiento del suelo, depende de la orientación de los sensores, lo que implica que la medida registrada de intensidad puede diferir del movimiento real del suelo, para resolver este problema David Boore propusieron dos formas de determinar la media geométrica, las cuales son: GMRotDnn, que usa el ángulo de rotación dependiente del periodo y GMRotInn, que usa el ángulo de rotación independiente del periodo, para un período dado de un oscilador de 1GDL. En la investigación se llegó a la siguiente conclusión: Al comparar los factores de amplificación de las aceleraciones (GM) para la máxima dirección, de 1,2 para periodos menores a 1,0 seg y 1,30 para periodos mayores a 1,0 seg, propuestos en este trabajo de investigación.

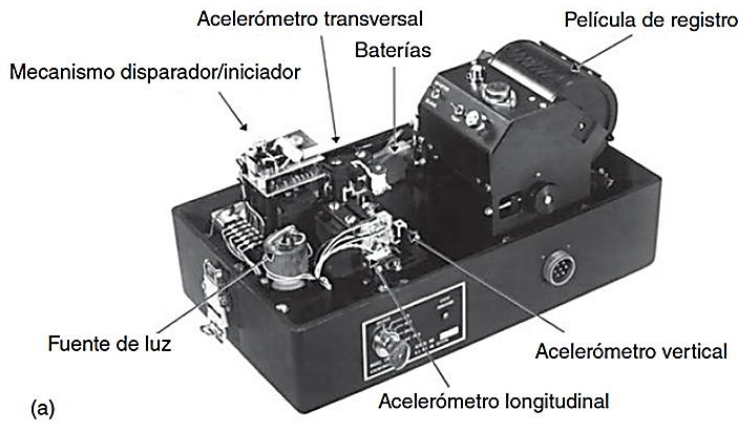
2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Registros Sísmicos.

Para propósitos de la ingeniería, la variación en el tiempo de la aceleración del terreno es la forma más útil de definir el movimiento del terreno durante un sismo. La aceleración del terreno aparece en la ecuación diferencial que rige la respuesta de las estructuras a la excitación sísmica. Así, para una aceleración del terreno dada, el problema a resolver se define por completo para un sistema de 1GDL con propiedades conocidas de masa, rigidez y amortiguamiento. (Chopra, 2014).

El instrumento básico para registrar las componentes tridimensionales del movimiento del terreno durante un sismo es el acelerógrafo de movimiento fuerte, que se activa con la llegada de las primeras ondas del Sismo. (Chopra, 2014).

Figura 1. Acelerógrafo de movimiento

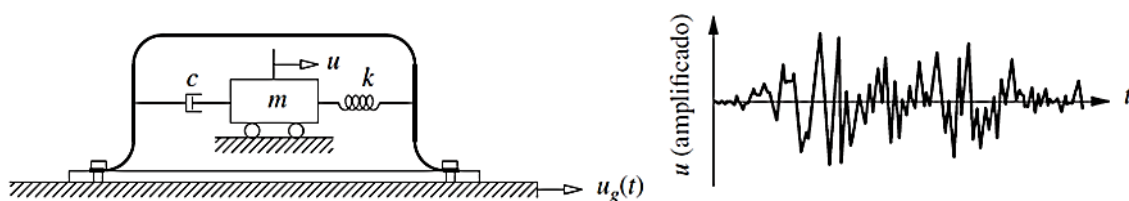


Fuente (Chopra,2014)

Los registros sísmicos o acelerogramas son una representación de las aceleraciones del suelo en el tiempo de un determinado sismo, en el lugar donde fueron registradas. Estos, además de proporcionar datos cuantitativos sobre la magnitud de las aceleraciones durante el movimiento, son utilizados en el campo de la dinámica de estructuras para obtener las respuestas dinámicas (desplazamientos, velocidades, aceleraciones) que un sistema de 1 GDL (grado de libertad) experimentará durante la excitación (Lascano, 2018).

Aunque los instrumentos de medición sean muy sofisticados y complejos, el elemento básico de estos instrumentos es en cierta forma un transductor. En su forma más simple, un transductor es un sistema de masa-resorte-amortiguador montado dentro de un marco rígido que está unido a la superficie de la cual se desea medir el movimiento (Chopra, 2014, p.95).

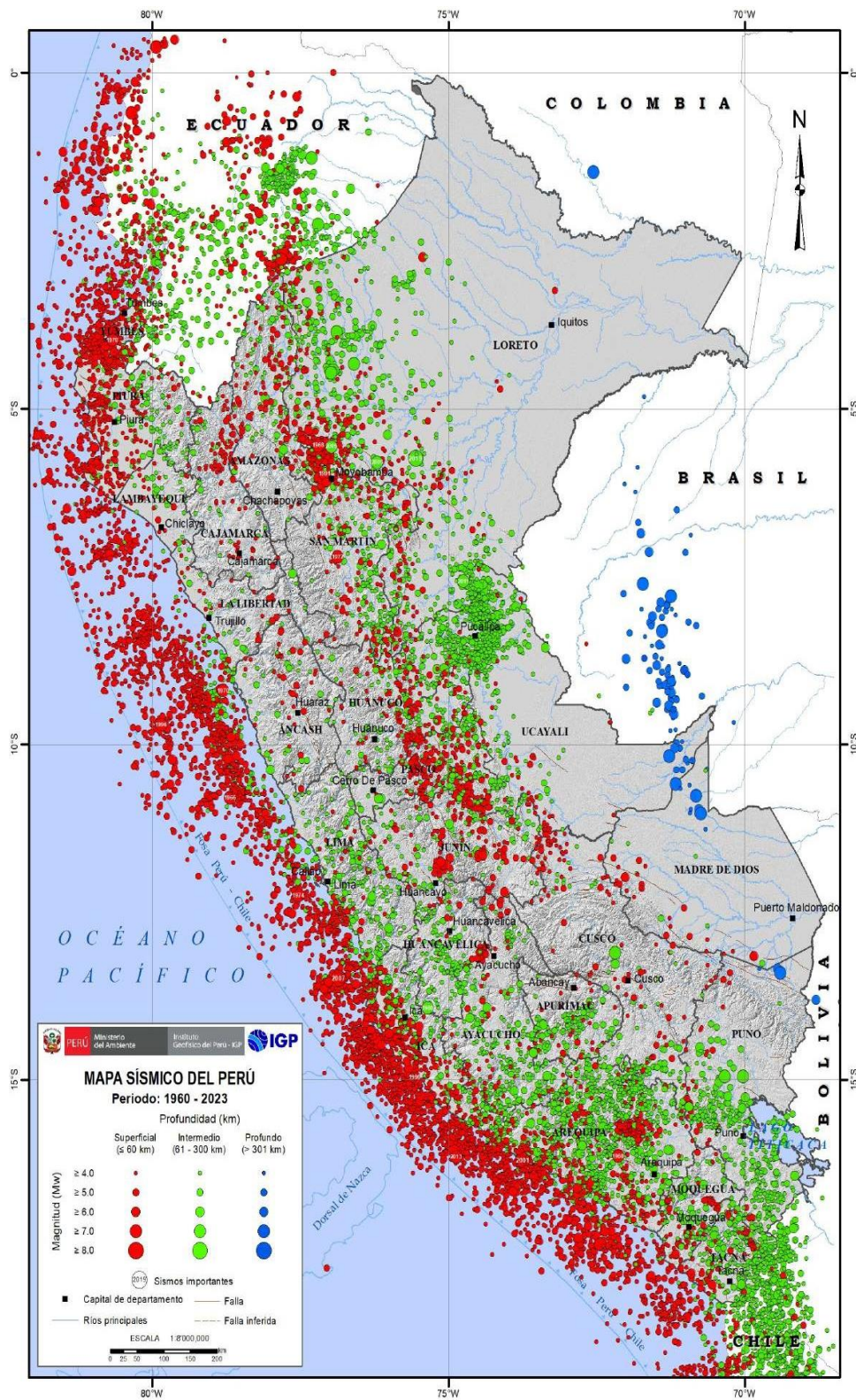
Figura 2. Dibujo esquemático de un instrumento para medir vibraciones y registrar movimiento.



Fuente: (Chopra, 2014, p.96).

2.2.2. Peligro Sísmico

Figura 3. Mapa sísmico del Perú.



Fuente: Instituto Geofísico del Perú Nota: Instituto Geofísico del Perú, mapa sísmico periodo 1960 - 2017 (2017).

2.2.2.1. Zonificación

El territorio peruano se divide en cuatro zonas sísmicas, a cada zona se asigna un factor Z según se indica en la Tabla 1. Este factor se interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años. El factor Z se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad.

Tabla 1. Factores de zona

ZONA	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Fuente: (Norma técnica E.030, 2016, p.95)

2.2.3. Perfiles del suelo.

2.2.3.1. Perfil Tipo S₀: Roca Dura.

A este tipo corresponden las rocas sanas con velocidad de propagación de ondas de corte $\bar{V}_S$ mayor que 1500 m/s. Las mediciones deberán corresponder al sitio del proyecto o a perfiles de la misma roca en la misma formación con igual o mayor intemperismo o fracturas. Cuando se conoce que la roca dura es continua hasta una profundidad de 30 m, las mediciones de la velocidad de las ondas de corte superficiales pueden ser usadas para estimar el valor de $\bar{V}_S$.

2.2.3.2. Perfil Tipo S₁: Roca o Suelos Muy Rígidos.

A este tipo corresponden las rocas con diferentes grados de fracturación, de macizos homogéneos y los suelos muy rígidos con velocidades de propagación de onda de corte $\bar{V}_S$, entre 500 m/s y 1500 m/s, incluyéndose los casos en los que se cimienta sobre:

- Roca fracturada, con una resistencia a la compresión no confinada *qu* mayor o igual que 500 kPa (5 kg/cm²).
- Arena muy densa o grava arenosa densa, con $\bar{N}_{60}$ (Promedio ponderado de los ensayos de penetración estándar). Mayor que 50.

- Arcilla muy compacta (de espesor menor que 20 m), con una resistencia al corte en condición no drenada $\bar{S}_u$ mayor que 100 kPa (1 kg/cm²) y con un incremento gradual de las propiedades mecánicas con la profundidad.

2.2.3.3. Perfil Tipo S₂: Suelos Intermedios.

A este tipo corresponden los suelos medianamente rígidos, con velocidades de propagación de onda de corte $\bar{V}_S$, entre 180 m/s y 500 m/s, incluyéndose los casos en los que se cimienta sobre:

- Arena densa, gruesa a media, o grava arenosa medianamente densa, con valores del SPT (Ensayo de penetración estándar) $\bar{N}_{60}$, entre 15 y 50.
- Suelo cohesivo compacto, con una resistencia al corte en condiciones no drenada $\bar{S}_u$ (Promedio ponderado de la resistencia al corte en condición no drenada), entre 50 kPa (0,5 kg/cm²) y 100 kPa (1 kg/cm²) y con un incremento gradual de las propiedades mecánicas con la profundidad.

2.2.3.4. Perfil Tipo S₃: Suelos Blandos.

Corresponden a este tipo los suelos flexibles con velocidades de propagación de onda de corte $\bar{V}_S$, menor o igual a 180 m/s, incluyéndose los casos en los que se cimienta sobre:

- Arena media a fina, o grava arenosa, con valores del SPT $\bar{N}_{60}$ menor que 15.
- Suelo cohesivo blando, con una resistencia al corte en condición no drenada $\bar{S}_u$, entre 25 kPa (0,25 kg/cm²) y 50 kPa (0,5 kg/cm²) y con un incremento gradual de las propiedades mecánicas con la profundidad.
- Cualquier perfil que no correspondan al tipo S₄ y que tenga más de 3 m de suelo con las siguientes características: índice de plasticidad P_I mayor que 20, contenido de humedad ω mayor que 40%, resistencia al corte en condición no drenada $\bar{S}_u$ menor que 25 kPa.

2.2.3.5. Perfil Tipo S₄: Condiciones Excepcionales.

A este tipo corresponden los suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables, en los cuales se requiere efectuar un estudio específico para el sitio. Sólo será necesario

considerar un perfil tipo S4 cuando el Estudio de Mecánica de Suelos (EMS) así lo determine.

Tabla 2. Resume valores típicos para los distintos tipos de perfiles de suelo:

Perfil	$\bar{V}_s$	$\bar{N}_{60}$	$\bar{S}_u$
S ₀	> 1500 m/s	-	-
S ₁	500 m/s a 1500 m/s	>50	>100kPa
S ₂	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S ₃	<180 m/s	<15	25 kPa a 50 kPa
S ₄	Clasificación basada en el EMS		

Fuente: (Norma técnica E.030, 2016, p.96)

2.2.3.6. Parámetros de Sitio (S, T_P, T_L y T_s)

S: Factor de amplificación del suelo

T_P, T_L y T_s: Periodos

Tabla 3. Parámetros de Sitio (S, TP y TL)

SUELO ZONA	S0	S1	S2	S3
Z4	0.8	1.0	1.05	1.10
Z3	0.8	1.0	1.15	1.20
Z2	0.8	1.0	1.20	1.40
Z1	0.8	1.0	1.60	2.0

Fuente: (Norma técnica E.030, 2016, p.97)

Tabla 4. Periodos “T_P” Y “T_L”

	Perfil de suelo			
	S0	S1	S2	S3
TP (S)	0.3	0.4	0.6	1.0
TL (S)	3.0	2.5	2.0	1.6

Fuente: (Norma técnica E.030, 2016, p.97)

Tabla 5. Periodo T_s

	Suelo Tipo	T_s (s)
S0	Roca dura	<0.15
S1	Roca o suelos muy rígidos	<0.30
S2	Suelos intermedios	<0.40
S3	Suelos blandos	<0.60

Fuente: (Norma técnica E.031, aislamiento sísmico del reglamento nacional de edificaciones, p.73)

2.2.3.7. Factores de amplificación sísmica

Este coeficiente se interpreta como el factor de amplificación de la aceleración estructural respecto de la aceleración en el suelo.

$$T < T_p \quad C = 2.5 \dots\dots\dots (1)$$

$$T_p < T < T_L \quad C = 2.5 \cdot \left(\frac{T_p}{T} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$T > T_L \quad C = 2.5 \cdot \left(\frac{T_p T_L}{T^2} \right) \dots\dots\dots (3)$$

2.2.3.8. Categoría de las edificaciones y factor de uso (U)

Tabla 6. Categoría de las edificaciones y factor de uso (U)

CATEGORIA DE LA EDIFICACIÓN	FACTOR DE USO
A	1.5
B	1.3
C	1.0
D	Criterio del proyectista

Fuente: (Norma técnica E.030, 2016, p.97-98)

2.2.3.9. Sistemas estructurales

Tabla 7. Categoría y sistema estructural de las edificaciones

Categoría de la Edificación	Zona	Sistema Estructural
A1	4 y 3	Aislamiento Sísmico con cualquier sistema estructural.
	2 y 1	Estructuras de acero tipo SCBF, OCBF y EBF. Estructuras de concreto: Sistema Dual, Muros de Concreto Armado. Albañilería Armada o Confinada.
A2	4, 3 y 2	Estructuras de acero tipo SCBF, OCBF y EBF. Estructuras de concreto: Sistema Dual, Muros de Concreto Armado. Albañilería Armada o Confinada.
	1	Cualquier sistema.
B	4, 3 y 2	Estructuras de acero tipo SMF, IMF, SCBF, OCBF y EBF. Estructuras de concreto: Pórticos, Sistema Dual, Muros de Concreto Armado. Albañilería Armada o Confinada. Estructuras de madera.
	1	Cualquier sistema.
C	4, 3, 2 y 1	Cualquier sistema.

Fuente: (Norma técnica E.030, 2016, p.98-99)

2.2.3.10. Sistemas estructurales y Coeficiente Básico de Reducción de las Fuerzas Sísmicas.

Tabla 8. *Sistemas estructurales y Coeficiente Básico de Reducción de las Fuerzas Sísmicas.*

Sistemas Estructurales	Coeficiente Básico de Reducción R_0
Acero:	
Pórticos Especiales Resistentes a Momentos (SMF)	8
Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos (IMF)	7
Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos (OMF)	6
Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados (SCBF)	8
Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados (OCBF)	6
Pórticos Excéntricamente Arriostrados (OCBF)	8
Concreto Armado:	
Pórticos	8
Dual	7
De muros estructurales	6
Muros de ductilidad limitada	4
Albañilería Armada o Confinada	3
Madera (por esfuerzos admisibles)	7

Fuente: (Norma técnica E.030, 2016, p.99)

2.2.3.11. Factores de Irregularidad (I_a , I_p).

Tabla 9. *Factores de Irregularidad (I_a).*

Irregularidades estructurales en altura	Factor de irregularidad I_a
Irregularidad de Rigidez – Piso Blando	0.75
Irregularidades de resistencia – piso débil	
Irregularidad Externa de Rigidez	0.50
Irregularidad Externa de Resistencia	
Irregularidad de Masa o Peso	0.90
Irregularidad Geométrica Vertical	0.90
Discontinuidad en los Sistemas Resistentes	0.80
Discontinuidad extrema de los Sistemas Resistentes	0.60

Fuente: (Norma técnica E.030, 2016, p.99-100)

Tabla 10. Factores de Irregularidad (I_p).

Irregularidades estructurales en planta	Factor de irregularidad I_p
Irregularidad Torsional	0.75
Irregularidad Torsional Extrema	0.60
Esquinas Entrantes	0.90
Discontinuidad del Diafragma	0.85
Sistemas no Paralelos	0.90

Fuente: (Norma técnica E.030, 2016, p.100)

2.2.3.12. Categoría de la Edificación e Irregularidad.

Tabla 11. Categoría de la Edificación e Irregularidad.

Categoría de la Edificación	Zona	Restricciones
A1 y A2	4, 3 y 2	No se permiten irregularidades
	1	No se permiten irregularidades extremas
B	4, 3 y 2	No se permiten irregularidades extremas
	1	Sin restricciones
C	4 y 3	No se permiten irregularidades extremas
		No se permiten irregularidades extremas
	2	excepto en edificios de hasta 2 pisos u 8m de altura total
	1	Sin restricciones

Fuente: (Norma técnica E.030, 2016, p.100)

2.2.3.13. Coeficiente de Reducción de las Fuerzas Sísmicas, R .

$$R = R_0 \cdot I_a \cdot I_p \dots\dots\dots (4)$$

2.2.3.14. Aceleración Espectral.

$$S_a = \frac{Z \cdot U \cdot C \cdot S}{R} \cdot g \dots\dots\dots (5)$$

2.2.4. Ecuación de movimiento: Fuerza externa

2.2.4.1. Sistemas de un grado de libertad

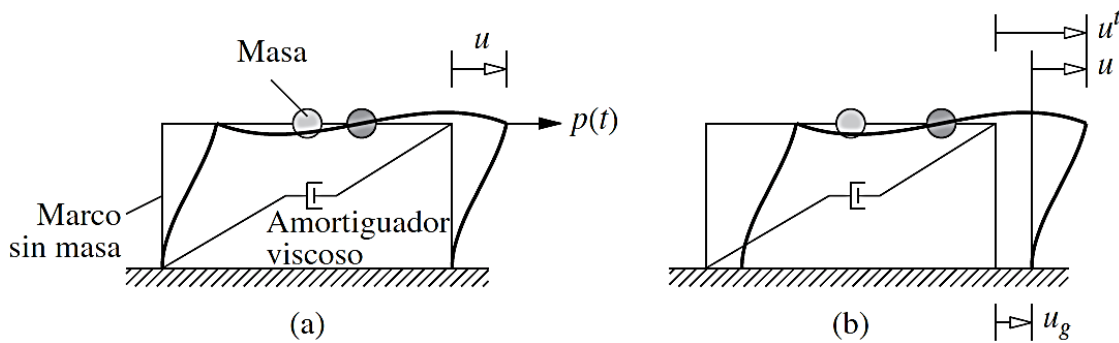
El sistema considerado se muestra esquemáticamente en la figura 4. Se compone de una masa m concentrada en el nivel del techo, un marco sin masa que proporciona rigidez al sistema, y un amortiguador viscoso que disipa la energía de vibración del sistema. Se supone que la viga y las columnas son axialmente indeformables.

El número de desplazamientos independientes requerido para definir las posiciones desplazadas de todas las masas en relación con su posición original se denomina el número de grados de libertad (GDL) para el análisis dinámico.

La estructura tiene un solo GDL (el desplazamiento lateral) para el análisis dinámico si se idealiza con la masa concentrada en una ubicación, por lo regular al nivel del techo. Por lo tanto, se le llama sistema de un grado de libertad (1GDL).

Se considerarán dos tipos de excitación dinámica: (1) la fuerza externa $p(t)$ en la dirección lateral (figura 4.a), y (2) el movimiento del terreno $u_g(t)$ inducido por un sismo (figura 4.b). En ambos casos u indica el desplazamiento relativo entre la masa y la base de la estructura.

Figura 4. Sistema de un grado de libertad: (a) fuerza aplicada $p(t)$ (b) movimiento del terreno inducido por un sismo.

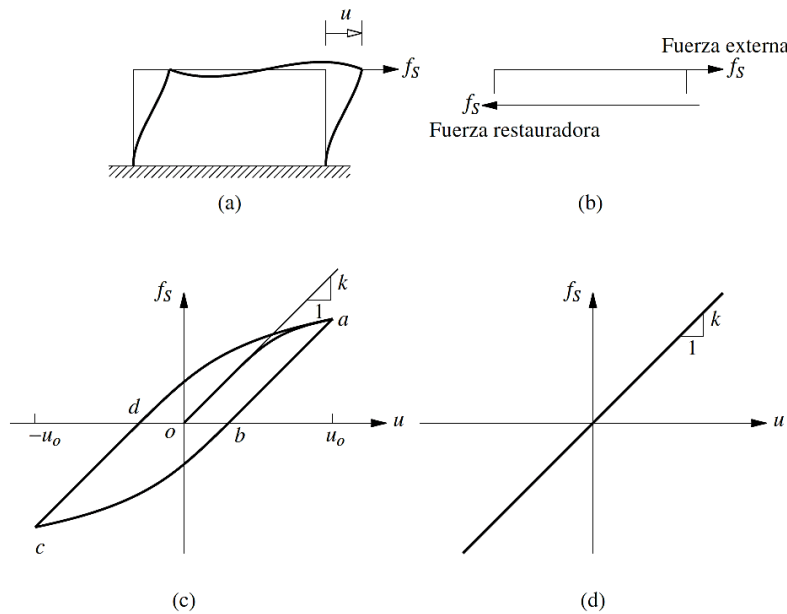


Fuente: (Chopra, 2014, p.7).

2.2.4.2. Relación fuerza-desplazamiento

Considere el sistema mostrado en la figura 5.a sin excitación dinámica, sometido a una fuerza externa estática f_s aplicada en la dirección del GDL u tal como se muestra. La fuerza interna que se opone al desplazamiento u es igual y opuesta a la fuerza externa f_s (figura 5.b). Se desea determinar la relación entre la fuerza f_s y el desplazamiento relativo u asociado con las deformaciones en la estructura durante el movimiento oscilatorio. Esta relación de fuerza-desplazamiento sería lineal para pequeñas deformaciones, pero volvería no lineal en el caso de grandes deformaciones (figura 5.c); se consideran tanto las relaciones lineales como las no lineales (figura 5.c y 5.d).

Figura 5. Relación fuerza-desplazamiento



Fuente: (Chopra, 2014, p.8).

a) Sistemas elástico lineales

Para un sistema lineal la relación entre la fuerza lateral f_s y la deformación resultante u es lineal, es decir:

$$f_s = ku \dots \dots \dots (6)$$

donde k es la rigidez lateral del sistema; sus unidades son fuerza/longitud. En la ecuación (6) está implícito el supuesto de que la relación lineal $f_s - u$ determinada para pequeñas deformaciones de la estructura también es válida para el caso de grandes deformaciones.

La ecuación (6) se determina por condensación estática o por eliminación de los GDL de rotación.

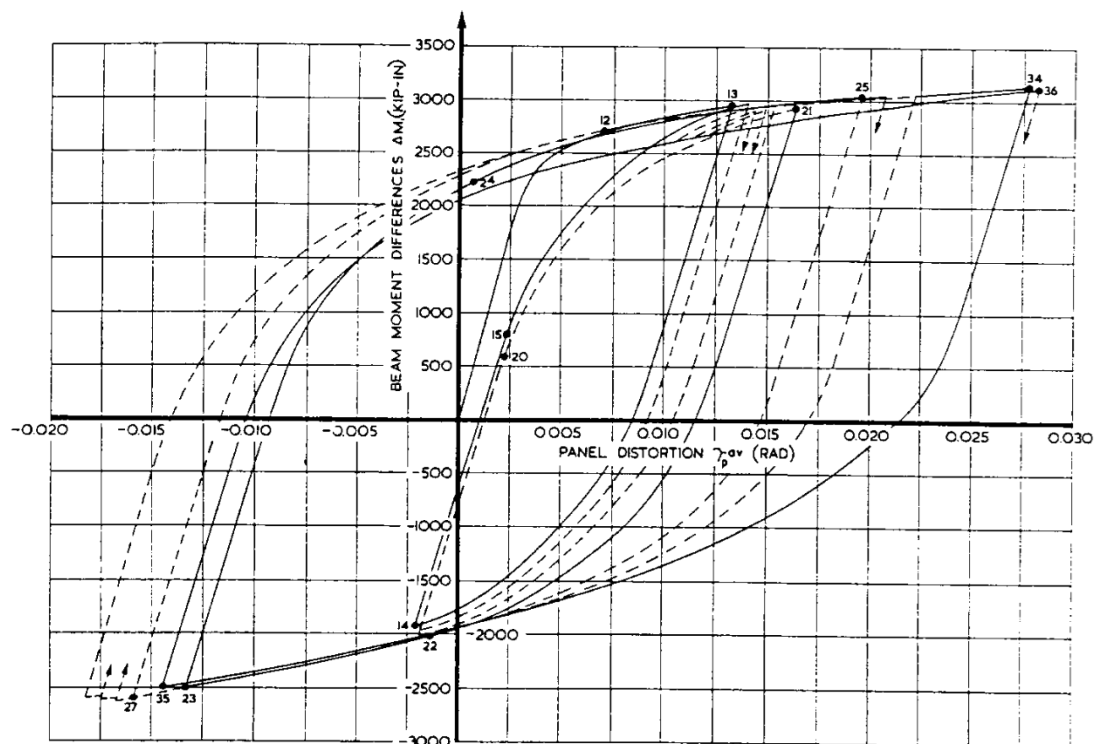
b) Sistemas inelásticos

En la figura 6 se muestra la relación experimental fuerza-deformación de un elemento estructural de acero sometido a niveles de deformación cíclicos esperados durante un sismo. La curva de carga inicial es no lineal a los niveles más grandes de deformación y las curvas de descarga y recarga difieren de la curva de carga inicial; se dice que un sistema así es inelástico. Esto implica que la relación fuerza-deformación depende de la dirección, es decir, depende de si la deformación está aumentando o

disminuyendo. De este modo, la fuerza restauradora es una función implícita de la deformación:

$$f_s = f_s(u) \dots \dots \dots (7)$$

Figura 6. Relación fuerza-deformación para un elemento estructural de acero.



Fuente: (Chopra, 2014, p.12). (Tomada de H. Krawinkler, V. V. Bertero y E. P. Popov, “comportamiento inelástico de subensambles de acero viga-columna”. Informe No. 71-7 CEIE, Universidad de California, Berkeley, 1971).

2.2.4.3. Fuerza de amortiguamiento

El proceso mediante el cual la amplitud de la vibración libre disminuye de manera constante se denomina amortiguamiento. En el amortiguamiento, la energía del sistema en vibración se disipa por diversos mecanismos y, con frecuencia, más de un mecanismo puede estar presente al mismo tiempo.

El amortiguamiento de las estructuras reales se representa por lo general en una forma muy idealizada. Para muchos fines, el amortiguamiento real en una estructura de 1GDL puede idealizarse de manera satisfactoria por medio de un amortiguador viscoso lineal. El coeficiente de amortiguamiento se selecciona de modo que la energía disipada sea equivalente a la energía disipada en todos los mecanismos de amortiguamiento,

combinados, presentes en la estructura real. Por lo anterior, esta idealización se denomina amortiguamiento viscoso equivalente.

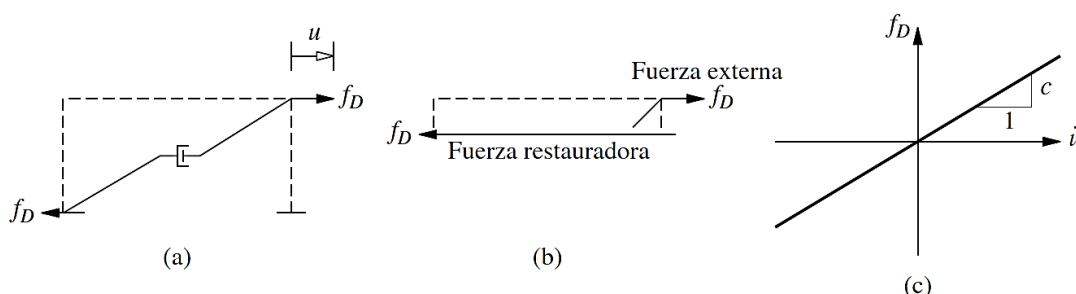
El amortiguador viscoso equivalente tiene la intención de modelar la disipación de energía para amplitudes de deformación dentro del límite elástico lineal de toda la estructura. Dentro de este intervalo de deformaciones, el coeficiente de amortiguamiento c determinado a partir de pruebas experimentales puede variar con la amplitud de la deformación.

En la figura 7 a se muestra un amortiguador viscoso lineal sometido a una fuerza f_D en la dirección del GDL u . La fuerza interna en el amortiguador es igual y opuesta a la fuerza externa f_D (figura 7 b). Como se muestra en la figura 7 c, la fuerza de amortiguamiento de f_D se relaciona con la velocidad $\dot{u}$ a través del amortiguador viscoso lineal por

$$f_D = c\dot{u} \dots \dots \dots (8)$$

c : Es el coeficiente de amortiguamiento viscoso; tiene unidades de fuerza $\times$ tiempo/longitud.

Figura 7. Fuerza de amortiguamiento

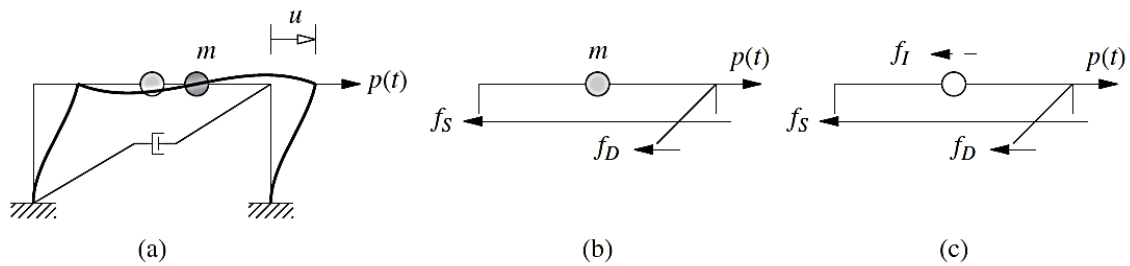


Fuente: (Chopra, 2014, p.13).

2.2.4.4. Uso de la Segunda ley del movimiento de Newton

En la figura 8 b se muestran las fuerzas que actúan sobre la masa en un cierto instante de tiempo. Éstas incluyen la fuerza externa $p(t)$, la fuerza restauradora elástica (o inelástica) f_s y la fuerza de amortiguamiento f_D . Se considera que la fuerza externa es positiva en la dirección del eje x , y que el desplazamiento $u(t)$, la velocidad $\dot{u}(t)$ y la aceleración $\ddot{u}(t)$ también son positivas en la dirección del eje x . Las fuerzas elásticas y de amortiguamiento se muestran actuando en la dirección opuesta, dado que son las fuerzas internas que se oponen a la deformación y a la velocidad respectivamente.

Figura 8. Segunda ley del movimiento de Newton



Fuente: (Chopra, 2014, p.14).

La fuerza resultante a lo largo del eje x es $p - f_s - f_D$, y a partir de la Segunda ley del movimiento de Newton se tiene

$$p - f_s - f_D = m\ddot{u} \quad \text{o} \quad p(t) = m\ddot{u} + f_s + f_D \dots\dots\dots (9)$$

Después de sustituir las ecuaciones (6) y (8), esta ecuación se convierte en

$$p(t) = m\ddot{u} + c\dot{u} + ku\dots\dots\dots (10)$$

Ésta es la ecuación de movimiento que controla la deformación o el desplazamiento $u(t)$, de la estructura idealizada en la figura 8 a, que se supone elástica lineal, sometida a una fuerza externa dinámica $p(t)$. Las unidades de masa son fuerza/aceleración.

Esta deducción puede extenderse con facilidad a sistemas inelásticos. La ecuación (9) todavía es válida y todo lo que debe hacerse es sustituir la ecuación (6), restringida a los sistemas lineales, por la ecuación (7), válida para los sistemas inelásticos. Por lo tanto, para tales sistemas, la ecuación de movimiento es

$$p(t) = m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u) \dots\dots\dots (11)$$

2.2.4.5. Ecuación de movimiento: Excitación sísmica

En las regiones propensas a sismos el principal problema de dinámica estructural que afecta a los ingenieros estructurales es el comportamiento de las estructuras sometidas a movimientos de la base de la estructura inducidos por sismos. El desplazamiento del terreno se indica por u_g , el desplazamiento total (o absoluto) de la masa por u^t , y el desplazamiento relativo entre la masa y el terreno por u (figura 9). En cada instante de tiempo, estos desplazamientos se relacionan mediante

$$u^t(t) = u_g(t) + u(t) \dots\dots\dots (12)$$

Tanto u^t como u_g se refieren al mismo marco de referencia inercial y sus direcciones positivas coinciden.

La ecuación de movimiento para el sistema idealizado de un nivel de la figura 9 a, sometido a la excitación sísmica. Se opta por utilizar el concepto de equilibrio dinámico. A partir del diagrama de cuerpo libre que incluye la fuerza de inercia f_I , mostrada en la figura 9 b, la ecuación de equilibrio dinámico es

$$f_I + f_D + f_S = 0 \dots \dots \dots (13)$$

Sólo el movimiento relativo u entre la masa y la base, debido a la deformación estructural, produce fuerzas elásticas y de amortiguamiento (es decir, el componente de cuerpo rígido del desplazamiento de la estructura no produce fuerzas internas). Así, para un sistema lineal, las ecuaciones (6) y (8) siguen siendo válidas. La fuerza de inercia f_I se relaciona con la aceleración $\ddot{u}^t$ de la masa mediante

$$f_I = m\ddot{u}^t \dots \dots \dots (14)$$

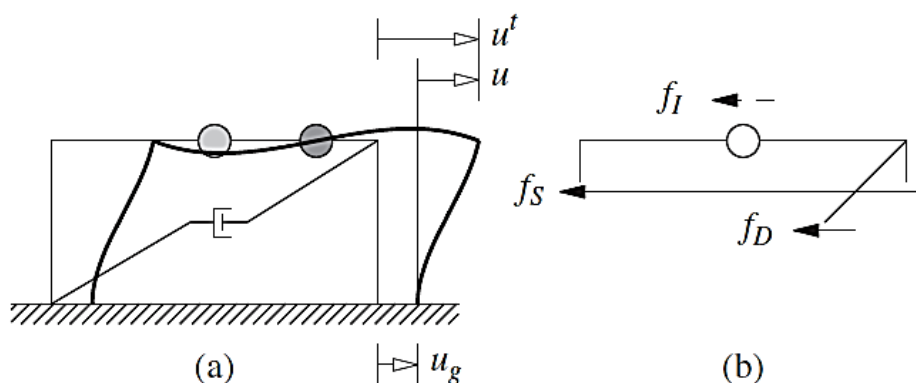
Al sustituir las ecuaciones (6), (8) y (14) en la ecuación (13) y utilizar la ecuación (12), se obtiene

$$m\ddot{u}^t + c\dot{u} + ku = 0$$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \dots \dots \dots (15)$$

Ésta es la ecuación de movimiento que controla el desplazamiento relativo o la deformación $u(t)$ de la estructura elástica lineal de la figura 9 a, sometida a la aceleración del terreno $\ddot{u}_g(t)$.

Figura 9. Excitación sísmica



Fuente: (Chopra, 2014, p.23).

Para los sistemas inelásticos, la ecuación (13) es válida, pero la ecuación (6) debe sustituirse por la ecuación (7). La ecuación de movimiento resultante es

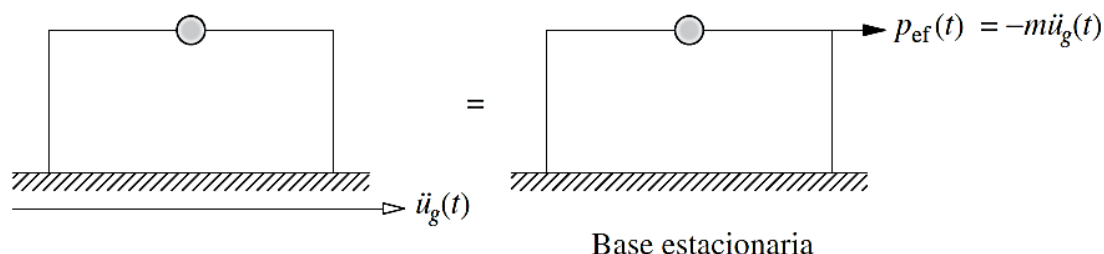
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u) = -m\ddot{u}_g(t) \dots \dots \dots (16)$$

Al comparar las ecuaciones (10) y (15), o las ecuaciones (11) y (16), se observa que las ecuaciones de movimiento para la estructura sometida a dos excitaciones distintas [la aceleración del terreno $\ddot{u}_g(t)$ y la fuerza externa $= -m\ddot{u}_g(t)$] son una misma. Así, el desplazamiento relativo o deformación $u(t)$ de la estructura debida a la aceleración del terreno $\ddot{u}_g(t)$ será idéntica al desplazamiento $u(t)$ de la estructura si su base fuese estacionaria y se sometiera a una fuerza externa $= -m\ddot{u}_g(t)$. Entonces, como se muestra en la figura 10, el movimiento del terreno puede sustituirse por la fuerza sísmica efectiva (que se indica mediante el subíndice “e f”):

$$p_{ef}(t) = -m\ddot{u}_g(t) \dots \dots \dots (17)$$

Esta fuerza es igual a la masa por la aceleración del terreno, que actúa opuesta a la aceleración. Es importante reconocer que la fuerza sísmica efectiva es proporcional a la masa de la estructura. Por lo tanto, si la masa estructural se incrementa, el diseñador estructural aumentará la fuerza sísmica efectiva.

Figura 10. Fuerza sísmica efectiva: movimiento horizontal del terreno.



Fuente: (Chopra, 2014, p.40).

2.2.4.6. Métodos de solución de la ecuación diferencial

La ecuación de movimiento para un sistema lineal de 1GDL sometido a una fuerza externa es la ecuación diferencial de segundo orden que se obtuvo con anterioridad:

$$p(t) = m\ddot{u} + c\dot{u} + ku \dots \dots \dots (10)$$

Para definir por completo el problema es necesario especificar el desplazamiento inicial $u(0)$ y la velocidad inicial $\dot{u}(0)$ en el tiempo cero. Por lo regular, la estructura está en reposo antes de la aparición de la excitación dinámica, de modo que la velocidad inicial

y el desplazamiento inicial son cero. En las siguientes secciones se realiza una revisión breve de los dos métodos de solución.

a) Solución clásica

La solución completa de la ecuación diferencial lineal de movimiento consiste en la suma de la solución complementaria $u_c(t)$ y la solución particular $u_p(t)$, es decir, $u(t) = u_c(t) + u_p(t)$. Como la ecuación diferencial es de segundo orden, se involucran dos constantes de integración. Éstas aparecen en la solución complementaria y se evalúan a partir del conocimiento de las condiciones iniciales.

Considere una fuerza escalonada: $p(t) = p_0, t \geq 0$. En este caso, la ecuación diferencial de movimiento para un sistema sin amortiguamiento (es decir, $c = 0$) es

$$p_0 = m\ddot{u} + 0\dot{u} + ku$$

$$p_0 = m\ddot{u} + ku \dots\dots\dots (b)$$

- Reconocemos que es una ecuación diferencial lineal y no homogénea de segundo orden con coeficientes constantes, y es no homogénea porque no es igualada a cero.
- Para resolver esta ecuación se tiene dos soluciones, la $u_c(t)$ y la $u_p(t)$.
- La $u_c(t)$ lo convierte en una ecuación diferencial lineal y homogénea de segundo orden con coeficientes constantes, y es homogénea porque ahora se iguala a cero.

$$m\ddot{u} + ku = 0 \dots\dots\dots (18)$$

- Vamos a suponer que una solución de la ecuación diferencial es:

$$u = e^{\lambda t} \dots\dots\dots (a)$$

- Vamos a derivar dos veces la ecuación (*), obteniendo:

$$\dot{u} = \lambda e^{\lambda t} \dots\dots\dots (a1)$$

$$\ddot{u} = \lambda^2 e^{\lambda t} \dots\dots\dots (a2)$$

- Luego (a) y (a2) reemplazamos en la ecuación 18

$$m\lambda^2 e^{\lambda t} + k e^{\lambda t} = 0$$

$$(m\lambda^2 + k)e^{\lambda t} = 0 \dots\dots\dots (a3)$$

- En la ecuación (a3) el término $e^{\lambda t}$ no puede ser cero, por lo tanto $(m\lambda^2 + k)$ tiene que ser cero, y se convierte en una ecuación cuadrática.

$$(m\lambda^2 + k) = 0, \text{ donde: } a = m, b = 0 \text{ y } c = k$$

- Para hallar los valores de $\lambda_{1,2}$ aplicamos la siguiente fórmula $\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$, en la cual vamos a reemplazar a, b y c.

$$\lambda_{1,2} = \frac{-0 \pm \sqrt{0^2 - 4mk}}{2m}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{\pm \sqrt{-4mk}}{2m}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{\pm 2i\sqrt{mk}}{2m}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{\pm i\sqrt{mk}}{m}$$

$$\lambda_{1,2} = \pm i \sqrt{\frac{k}{m}} \dots\dots\dots (a4)$$

- Recordamos que $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$, siendo ω_n la frecuencia circular natural de vibración. Entonces reemplazamos ω_n en la ecuación (a4).

$$\lambda_{1,2} = \pm i \omega_n$$

- Obtenemos dos soluciones $\lambda_1 = +i \omega_n$ y $\lambda_2 = -i \omega_n$
- La solución general de la ecuación 18 será:

$$u(t) = a_1 e^{\lambda_1 t} + a_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$u(t) = a_1 e^{i \omega_n t} + a_2 e^{-i \omega_n t} \dots\dots\dots (a5)$$

- Donde a_1 y a_2 son constantes con valores complejos aún por determinar. Mediante el uso de las relaciones de Euler.

$$e^{i x} = \cos(x) + i \sin(x)$$

$$e^{-i x} = \cos(x) - i \sin(x)$$

- Al utilizar la relación de Euler obtenemos que:

$$e^{i \omega_n t} = \cos(\omega_n t) + i \sin(\omega_n t)$$

$$e^{-i\omega_n t} = \cos(\omega_n t) - i\sin(\omega_n t)$$

- Al reemplazar la relación de Euler en la ecuación (a5) obtenemos la siguiente ecuación:

$$u(t) = A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t) \dots \dots \dots (a6)$$

- Ahora vamos a hallar la $u_p(t)$.

$$u_p(t) = \frac{p_0}{k}$$

- La solución completa es:

$$u(t) = A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t) + \frac{p_0}{k} \dots \dots \dots (a7)$$

$$\dot{u}(t) = -\omega_n A \sin(\omega_n t) + \omega_n B \cos(\omega_n t)$$

- Si el sistema está inicialmente en reposo, $u(0) = 0$ y $\dot{u}(0) = 0$ en $t = 0$. Es posible determinar las constantes A y B para estas condiciones iniciales:

$$u(0) = A \cos(\omega_n 0) + B \sin(\omega_n 0) + \frac{p_0}{k}$$

$$0 = A(1) + B(0) + \frac{p_0}{k}$$

$$A = -\frac{p_0}{k}$$

$$\dot{u}(0) = -\omega_n A \sin(\omega_n 0) + \omega_n B \cos(\omega_n 0)$$

$$0 = -\omega_n A(0) + \omega_n B(1)$$

$$0 = \omega_n B$$

$$0 = B$$

- Ahora A y B reemplazamos en la ecuación a7

$$u(t) = -\frac{p_0}{k} \cos(\omega_n t) + (0) \sin(\omega_n t) + \frac{p_0}{k}$$

$$u(t) = -\frac{p_0}{k} \cos(\omega_n t) + \frac{p_0}{k}$$

$$u(t) = \frac{p_0}{k} [1 - \cos(\omega_n t)] \dots \dots \dots (19)$$

b) Integral de Duhamel

Otro método muy conocido para resolver ecuaciones diferenciales lineales, como la ecuación de movimiento de un sistema de 1GDL, se basa en la representación de la

fuerza aplicada como una secuencia infinitesimal de pulsos cortos. La respuesta del sistema a una fuerza $p(t)$, aplicada en el tiempo t , se obtiene al sumar las respuestas a todos los pulsos hasta ese instante.

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_n} \int_0^t p(\tau) \operatorname{sen}[\omega_n(t - \tau)] d\tau \dots\dots\dots (20)$$

La respuesta de un sistema de 1GDL, que se supone inicialmente en reposo, a una fuerza escalonada $p(t) = p_0, t \geq 0$, se determina usando la integral de Duhamel.

$$u(t) = \frac{p_0}{m\omega_n} \left[\frac{\cos\omega_n(t - \tau)}{\omega_n} \right]_{\tau=0}^{\tau=t}$$

$$u(t) = \frac{p_0}{m\omega_n} \left[\frac{\cos\omega_n(t - t)}{\omega_n} - \frac{\cos\omega_n(t - 0)}{\omega_n} \right]$$

$$u(t) = \frac{p_0}{m\omega_n} \left[\frac{\cos\omega_n(0)}{\omega_n} - \frac{\cos\omega_n(t)}{\omega_n} \right]$$

$$u(t) = \frac{p_0}{m\omega_n} \left[\frac{1}{\omega_n} - \frac{\cos\omega_n(t)}{\omega_n} \right]$$

$$u(t) = \frac{p_0}{m\omega_n^2} [1 - \cos(\omega_n t)]$$

$$u(t) = \frac{p_0}{m \frac{k}{m}} [1 - \cos(\omega_n t)]$$

$$u(t) = \frac{p_0}{k} [1 - \cos(\omega_n t)]$$

Este resultado es igual al obtenido en la ecuación (19)

2.2.4.7. Vibración libre no amortiguada

El movimiento de los sistemas lineales de 1GDL, visualizados como un marco idealizado de un nivel o un sistema masa-resorte-amortiguador, sometido a la fuerza externa $p(t)$ se rige por la ecuación (10). Si se establece $p(t) = 0$, se obtiene la ecuación diferencial que rige la vibración libre del sistema, que para los sistemas sin amortiguamiento ($c = 0$) se especifica como

$$m\ddot{u} + ku = 0 \dots\dots\dots (21)$$

La vibración libre se inicia al sacar al sistema de su posición de equilibrio estático, impartiendo a la masa cierto desplazamiento $u(0)$ y velocidad $\dot{u}(0)$ en el tiempo cero, definido como el instante en que se inicia el movimiento:

Vamos a dar solución a la ecuación diferencial (21).

- Reconocemos que es una ecuación diferencial lineal y homogénea de segundo orden con coeficientes constantes, y es homogénea porque esta igualada a cero.
- Vamos a suponer que una solución de la ecuación diferencial es:

$$u = e^{\lambda t} \dots\dots\dots (a)$$

- Vamos a derivar dos veces la ecuación (*), obteniendo:

$$\dot{u} = \lambda e^{\lambda t} \dots\dots\dots (a1)$$

$$\ddot{u} = \lambda^2 e^{\lambda t} \dots\dots\dots (a2)$$

- Luego (a) y (a2) reemplazamos en la ecuación (21)

$$m\lambda^2 e^{\lambda t} + k e^{\lambda t} = 0$$

$$(m\lambda^2 + k)e^{\lambda t} = 0 \dots\dots\dots (a3)$$

- En la ecuación (a3) el termino $e^{\lambda t}$ no puede ser cero, por lo tanto $(m\lambda^2 + k)$ tiene que ser cero, y se convierte en una ecuación cuadrática.

$$(m\lambda^2 + k) = 0, \text{ donde: } a = m, b = 0 \text{ y } c = k$$

- Para hallar los valores de $\lambda_{1,2}$ aplicamos la siguiente formula $\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$, en la cual vamos a reemplazar a, b y c.

$$\lambda_{1,2} = \frac{-0 \pm \sqrt{0^2 - 4mk}}{2m}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{\pm \sqrt{-4mk}}{2m}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{\pm 2i\sqrt{mk}}{2m}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{\pm i\sqrt{mk}}{m}$$

$$\lambda_{1,2} = \pm i \sqrt{\frac{k}{m}} \dots\dots\dots (a4)$$

- Recordamos que $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$, siendo ω_n la frecuencia circular natural de vibración. Entonces reemplazamos ω_n en la ecuación (a4).

$$\lambda_{1,2} = \pm i \omega_n$$

- Obtenemos dos soluciones $\lambda_1 = +i \omega_n$ y $\lambda_2 = -i \omega_n$
- La solución general de la ecuación 18 será:

$$u(t) = a_1 e^{\lambda_1 t} + a_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$u(t) = a_1 e^{i \omega_n t} + a_2 e^{-i \omega_n t} \dots\dots\dots (a5)$$

- Donde a_1 y a_2 son constantes con valores complejos aún por determinar. Mediante el uso de las relaciones de Euler.

$$e^{i x} = \cos(x) + i \operatorname{sen}(x)$$

$$e^{-i x} = \cos(x) - i \operatorname{sen}(x)$$

- Al utilizar la relación de Euler obtenemos que:

$$e^{i \omega_n t} = \cos(\omega_n t) + i \operatorname{sen}(\omega_n t)$$

$$e^{-i \omega_n t} = \cos(\omega_n t) - i \operatorname{sen}(\omega_n t)$$

- Al reemplazar la relación de Euler en la ecuación (a5) obtenemos la siguiente ecuación:

$$u(t) = A \cos(\omega_n t) + B \operatorname{sen}(\omega_n t) \dots\dots\dots (a6)$$

- Derivamos la ecuación (a6) y obtenemos lo siguiente:

$$\dot{u}(t) = -\omega_n A \operatorname{sen}(\omega_n t) + \omega_n B \cos(\omega_n t) \dots\dots\dots (a7)$$

- La evaluación de las ecuaciones (a6) y (a7) en el tiempo cero proporciona las constantes A y B en términos del desplazamiento inicial $u(0)$ y la velocidad inicial $\dot{u}(0)$:

$$u(0) = A \cos(\omega_n 0) + B \operatorname{sen}(\omega_n 0)$$

$$u(0) = A \cos(0) + B \operatorname{sen}(0)$$

$$u(0) = A(1) + B(0), \quad u(0) = A$$

$$\dot{u}(0) = -\omega_n A \operatorname{sen}(\omega_n 0) + \omega_n B \cos(\omega_n 0)$$

$$\dot{u}(0) = -\omega_n A \operatorname{sen}(0) + \omega_n B \cos(0)$$

$$\dot{u}(0) = -\omega_n A(0) + \omega_n B(1), \quad B = \frac{\dot{u}(0)}{\omega_n}$$

- Al sustituir A y B en la ecuación (a6) resulta la solución dada en la ecuación (21).

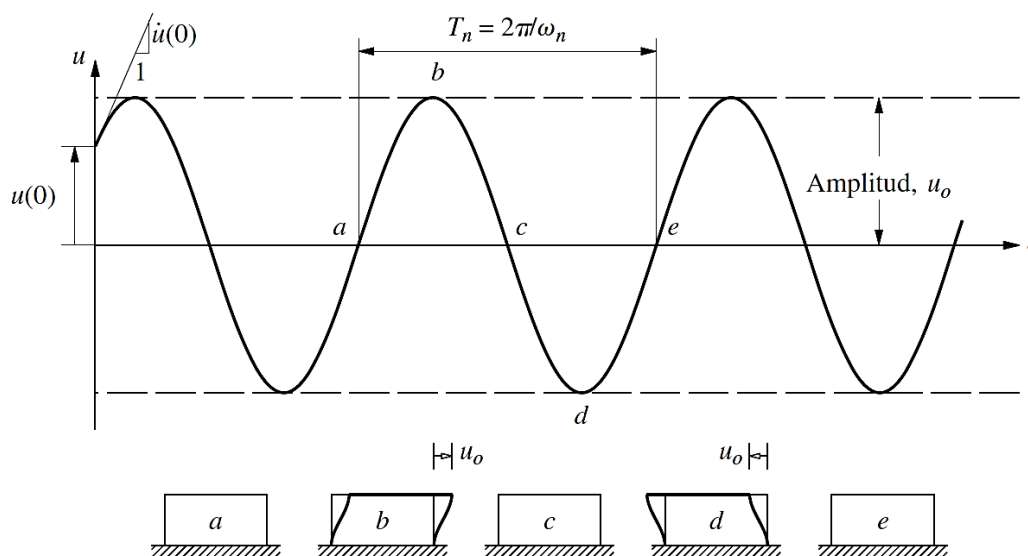
$$u(t) = u(0) \cos(\omega_n t) + \frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \dots \dots \dots (22)$$

La ecuación (22) se representa con la gráfica en la figura 11. Ésta muestra que el sistema experimenta un movimiento vibratorio (u oscilatorio) alrededor de su posición de equilibrio estático (o no deformada, $u = 0$); y que este movimiento se repite después de cada $\frac{2\pi}{\omega_n}$ segundos.

La porción a-b-c-d-e de la curva de tiempo-desplazamiento describe un ciclo de vibración libre del sistema. A partir de su posición de equilibrio estático (o no deformada) en a, la masa se mueve a la derecha, alcanzando su desplazamiento positivo máximo u_0 en b, momento en el cual la velocidad es cero y el desplazamiento comienza a decrecer; luego la masa vuelve de nuevo a su posición de equilibrio c, momento en el cual la velocidad es máxima y por lo tanto la masa continúa moviéndose a la izquierda; después, la masa llega a su desplazamiento mínimo $-u_0$ en d, momento en el cual la velocidad es cero de nuevo y el desplazamiento comienza a disminuir otra vez hasta que la masa vuelve a su posición de equilibrio en e.

El tiempo requerido para que el sistema no amortiguado complete un ciclo de vibración libre es el periodo natural de vibración del sistema, que se denomina como T_n y cuyas unidades son segundos.

Figura 11. Vibración libre de un sistema sin amortiguamiento.



Fuente: (Chopra, 2014, p.40).

2.2.4.8. Vibración libre viscosamente amortiguada

Si se establece $p(t) = 0$ en la ecuación (10), se obtiene la ecuación diferencial que rige la vibración libre de los sistemas de 1GDL con amortiguamiento:

$$0 = m\ddot{u} + c\dot{u} + ku \dots \dots \dots (23)$$

Luego al dividir entre m, obtenemos

$$\begin{aligned} \frac{0}{m} &= \frac{m\ddot{u}}{m} + \frac{c\dot{u}}{m} + \frac{ku}{m} \\ 0 &= \ddot{u} + \frac{c\dot{u}}{m} + \frac{ku}{m}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \rightarrow \omega_n^2 = \frac{k}{m} \\ 0 &= \ddot{u} + \frac{c\dot{u}}{m} + \omega_n^2 u, \quad \zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}} \rightarrow \frac{c}{m} = 2\zeta\omega_n \\ c_{cr} &= 2m\omega_n = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{\omega_n} \\ 0 &= \ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u \dots \dots \dots (24) \end{aligned}$$

ζ es la razón o fracción del amortiguamiento crítico. La constante de amortiguamiento c es una medida de la energía disipada en un ciclo de vibración libre o en un ciclo de vibración forzada armónica. Sin embargo, la fracción de amortiguamiento (una medida dimensional de amortiguamiento) es una propiedad del sistema que depende también de su masa y rigidez.

a) Tipos de movimiento

En la figura 12 se muestra una gráfica del movimiento $u(t)$ debido al desplazamiento inicial $u(0)$ para tres valores de ζ .

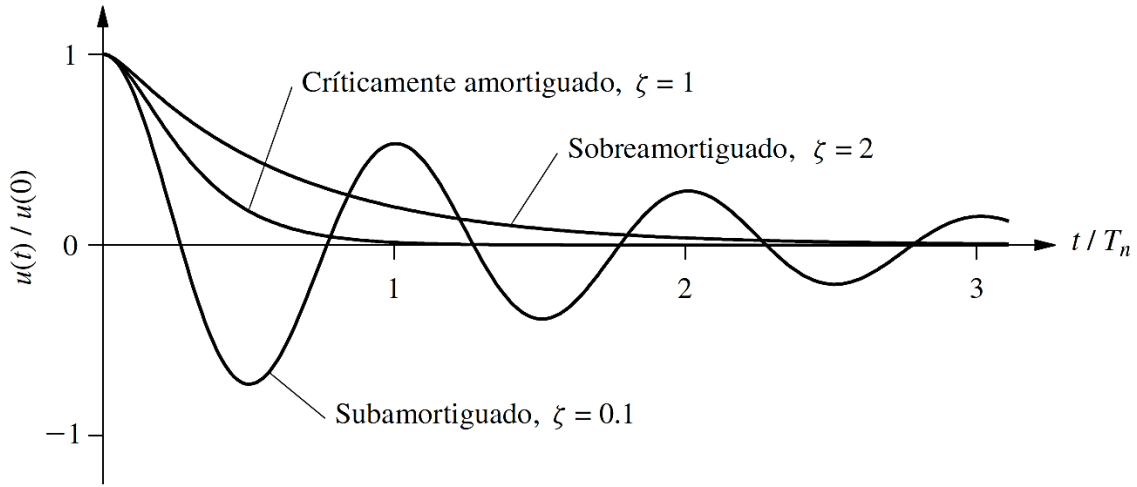
Si $c < c_{cr}$ o $\zeta < 1$, el sistema oscila alrededor de su posición de equilibrio con una amplitud que disminuye progresivamente.

Si $c = c_{cr}$ o $\zeta = 1$, el sistema vuelve a su posición de equilibrio sin oscilar.

Si $c > c_{cr}$ o $\zeta > 1$, de nuevo el sistema no oscila y regresa a su posición de equilibrio, como en el caso de $\zeta = 1$, pero a un ritmo más lento.

El amortiguamiento c_{cr} se denomina amortiguamiento crítico debido a que es el valor más pequeño de c que inhibe por completo la oscilación. Representa la línea divisoria entre el movimiento oscilatorio y no oscilatorio.

Figura 12. Vibración libre de sistemas subamortiguado, críticamente amortiguado y sobreamortiguado.



Fuente: (Chopra, 2014, p.49).

b) Sistemas subamortiguados

La solución de la ecuación (23) sujeta a las condiciones iniciales de $u(0) = 0, \dot{u}(0) = \dot{u}$

Para sistemas con $c < c_{cr}$ o $\zeta < 1$ es

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[u(0)\cos\omega_D t + \frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \text{sen}\omega_D t \right] \dots \dots \dots (25)$$

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \dots \dots \dots (26)$$

Ahora vamos a deducir la ecuación diferencial (25)

- Al sustituir la ecuación (a, a1 y a2) en la ecuación (24) resulta:

$$0 = \lambda^2 e^{\lambda t} + 2\zeta\omega_n \lambda e^{\lambda t} + \omega_n^2 e^{\lambda t}$$

$$0 = e^{\lambda t} (\lambda^2 + 2\zeta\omega_n \lambda + \omega_n^2)$$

- Como el $e^{\lambda t}$ no puede ser cero, $\lambda^2 + 2\omega_n \lambda + \omega_n^2$ tiene que ser cero.

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_n \lambda + \omega_n^2 = 0, \quad a = 1, b = 2\zeta\omega_n \text{ y } c = \omega_n^2$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{-2\zeta\omega_n \pm \sqrt{(2\zeta\omega_n)^2 - 4(1)(\omega_n^2)}}{2(1)}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{-2\zeta\omega_n \pm \sqrt{4\zeta^2\omega_n^2 - 4\omega_n^2}}{2}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{-2\zeta\omega_n \pm \sqrt{4\omega_n^2(\zeta^2 - 1)}}{2}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{-2\zeta\omega_n \pm 2\omega_n\sqrt{(\zeta^2 - 1)}}{2}$$

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{(\zeta^2 - 1)}$$

$$\lambda_{1,2} = \omega_n(-\zeta \pm \sqrt{(\zeta^2 - 1)})$$

$$\lambda_{1,2} = \omega_n(-\zeta \pm i\sqrt{(1 - \zeta^2)})$$

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm i\omega_D \dots \dots \dots (b)$$

$$\lambda_1 = -\zeta\omega_n + i\omega_D \text{ y } \lambda_2 = -\zeta\omega_n - i\omega_D$$

- Que tienen valores complejos para $\zeta < 1$. La solución general de la ecuación (18) es

$$u(t) = a_1 e^{\lambda_1 t} + a_2 e^{\lambda_2 t} \dots \dots \dots (c)$$

$$u(t) = a_1 e^{(-\zeta\omega_n + i\omega_D)t} + a_2 e^{(-\zeta\omega_n - i\omega_D)t}$$

$$u(t) = a_1 e^{-\zeta t\omega_n + it\omega_D} + a_2 e^{-\zeta t\omega_n - it\omega_D}$$

$$u(t) = a_1 e^{-\zeta t\omega_n} e^{it\omega_D} + a_2 e^{-\zeta t\omega_n} e^{-it\omega_D}$$

$$u(t) = e^{-\zeta t\omega_n} (a_1 e^{it\omega_D} + a_2 e^{-it\omega_D}) \dots \dots \dots (d)$$

- Al utilizar la relación de Euler obtenemos que:

$$e^{i\omega_D t} = \cos(\omega_D t) + i\text{sen}(\omega_D t)$$

$$e^{-i\omega_D t} = \cos(\omega_D t) - i\text{sen}(\omega_D t)$$

- Al reemplazar la relación de Euler en la ecuación (d) obtenemos la siguiente ecuación:

$$u(t) = e^{-\zeta t\omega_n} [A \cos(\omega_D t) + B \text{sen}(\omega_D t)] \dots \dots \dots (e)$$

$$\dot{u}(t) = e^{-\zeta t\omega_n} [A \cos(\omega_D t) + B \text{sen}(\omega_D t)]' + [e^{-\zeta t\omega_n}]' [A \cos(\omega_D t) + B \text{sen}(\omega_D t)]$$

$$\begin{aligned} \dot{u}(t) = e^{-\zeta t\omega_n} & \left[-\omega_D A \text{sen}(\omega_D t) + \omega_D B \cos(\omega_D t) \right] \\ & + [-\zeta \omega_n e^{-\zeta t\omega_n}] [A \cos(\omega_D t) + B \text{sen}(\omega_D t)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{u}(t) = e^{-\zeta t\omega_n} & \left[-\omega_D A \text{sen}(\omega_D t) + \omega_D B \cos(\omega_D t) \right] \\ & - \zeta \omega_n e^{-\zeta t\omega_n} [A \cos(\omega_D t) + B \text{sen}(\omega_D t)] \end{aligned}$$

$$\dot{u}(t) = e^{-\zeta t \omega_n} [-\omega_D A \sin(\omega_D t) + \omega_D B \cos(\omega_D t) - \zeta \omega_n A \cos(\omega_D t) - \zeta \omega_n B \sin(\omega_D t)]$$

$$\dot{u}(t) = e^{-\zeta t \omega_n} [B(\omega_D \cos(\omega_D t) - \zeta \omega_n \sin(\omega_D t)) - A(\omega_D \sin(\omega_D t) + \zeta \omega_n \cos(\omega_D t))] \dots \dots \dots (e1)$$

- La evaluación de las ecuaciones (e) y (e1) en el tiempo cero proporciona las constantes A y B en términos del desplazamiento inicial $u(0)$ y la velocidad inicial $\dot{u}(0)$:

$$u(0) = e^{-\zeta(0)\omega_n} [A \cos(\omega_D 0) + B \sin(\omega_D 0)]$$

$$u(0) = e^{(0)} [A \cos(0) + B \sin(0)]$$

$$u(0) = [A(1) + B(0)]$$

$$u(0) = A$$

$$\dot{u}(0) = e^{-\zeta(0)\omega_n} [B(\omega_D \cos(\omega_D 0) - \zeta \omega_n \sin(\omega_D 0)) - A(\omega_D \sin(\omega_D 0) + \zeta \omega_n \cos(\omega_D 0))]$$

$$\dot{u}(0) = [B(\omega_D \cos(0) - \zeta \omega_n \sin(0)) - A(\omega_D \sin(0) + \zeta \omega_n \cos(0))]$$

$$\dot{u}(0) = [B(\omega_D(1) - \zeta \omega_n(0)) - A(\omega_D(0) + \zeta \omega_n(1))]$$

$$\dot{u}(0) = [B(\omega_D) - A(\zeta \omega_n)]$$

$$\dot{u}(0) + A(\zeta \omega_n) = [B(\omega_D)]$$

$$B = \frac{\dot{u}(0) + \zeta \omega_n u(0)}{\omega_D}$$

$$A = u(0), B = \frac{\dot{u}(0) + \zeta \omega_n u(0)}{\omega_D} \dots \dots \dots (f)$$

- Al sustituir A y B en la ecuación (e) resulta la solución dada en la ecuación (19)

$$u(t) = e^{-\zeta \omega_n t} \left[u(0) \cos \omega_D t + \frac{\dot{u}(0) + \zeta \omega_n u(0)}{\omega_D} \sin \omega_D t \right] \dots \dots \dots (25)$$

La ecuación (25) se representa con una gráfica en la figura 13, que muestra la respuesta a la vibración libre de un sistema de 1GDL con fracción de amortiguamiento $\zeta = 0.05$, o 5%. Se incluye, con propósitos comparativos, la respuesta a la vibración libre del mismo sistema que se presentó anteriormente en la figura 11, pero sin amortiguamiento. La vibración libre de ambos sistemas inicia por el mismo desplazamiento inicial $u(0)$ y la misma velocidad inicial $\dot{u}(0)$ y, por lo tanto, ambas

gráficas de desplazamiento en el tiempo inician en el instante $t = 0$ con las mismas ordenada y pendiente.

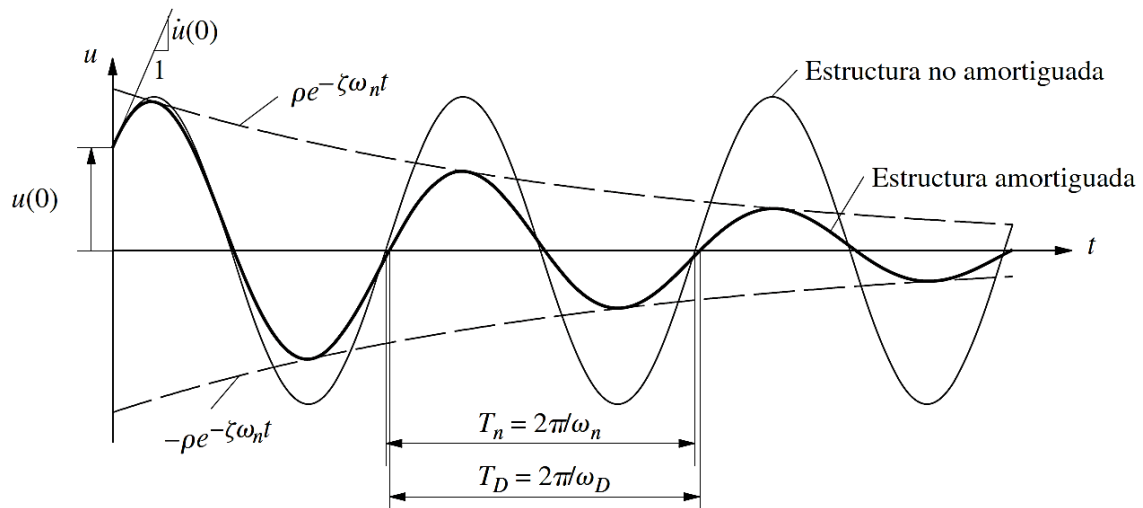
La ecuación (25) y la figura 13 indican que la frecuencia natural de vibración amortiguada es ω_D y que se relaciona mediante la ecuación (26) con la frecuencia natural ω_n del sistema sin amortiguamiento. El periodo natural de vibración amortiguada, $T_D = \frac{2\pi}{\omega_D}$, se relaciona con el periodo natural T_n sin amortiguamiento mediante

$$T_D = \frac{T_n}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \dots \dots \dots (27)$$

La amplitud de desplazamiento del sistema no amortiguado es la misma en todos los ciclos de vibración, pero el sistema amortiguado oscila con amplitud decreciente en cada ciclo de vibración. La ecuación (25) indica que la amplitud de desplazamiento disminuye exponencialmente con el tiempo, como se muestra en la figura 11. Las curvas envolventes $\pm \rho e^{-\zeta \omega_n t}$, donde

$$\rho = \sqrt{[u(0)]^2 + \left[\frac{\dot{u}(0) + \zeta \omega_n u(0)}{\omega_D} \right]^2} \dots \dots \dots (28)$$

Figura 13. Efectos del amortiguamiento sobre la vibración libre.



Fuente: (Chopra, 2014, p.50).

2.2.4.9. Respuesta a un impulso unitario

Una fuerza muy grande que actúa durante un tiempo muy corto, pero con un tiempo integral que es finito, se denomina fuerza impulsiva. En la figura 14 se muestra la

fuerza $p(t) = 1/\varepsilon$, con una duración de tiempo ε que inicia en el instante de tiempo $t = \tau$. A medida que ε se acerca a cero, la fuerza se vuelve infinita; sin embargo, la magnitud del impulso, que se define mediante la integral en el tiempo de $p(t)$, sigue siendo igual a la unidad. Tal fuerza en el caso limitante $\varepsilon \rightarrow 0$ se llama impulso unitario. La función delta de Dirac $\delta(t - \tau)$ define matemáticamente un impulso unitario centrado en $t = \tau$.

De acuerdo con la segunda ley del movimiento de Newton, si una fuerza p actúa sobre un cuerpo de masa m , la razón de cambio de la cantidad de movimiento del cuerpo es igual a la fuerza aplicada, es decir

$$\frac{d}{dt}(m\dot{u}) = p \dots \dots \dots (29)$$

Para una masa constante, esta ecuación se convierte en

$$p = m\ddot{u} \dots \dots \dots (30)$$

Si se integran ambos lados con respecto a t resulta

$$\int_{t_1}^{t_2} p dt = m(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = m\Delta\dot{u} \dots \dots \dots (31)$$

La integral en el lado izquierdo de esta ecuación es la magnitud del impulso. El producto de la masa y la velocidad es la cantidad de movimiento. Así la ecuación (31) indica que la magnitud del impulso es igual al cambio en la cantidad de movimiento.

Este resultado también se aplica a un sistema de masa-resorte-amortiguador de 1GDL si el resorte o amortiguador no tiene ningún efecto. Tal es el caso aquí, puesto que la fuerza impulsiva actúa durante un tiempo de duración infinitesimal. Así, un impulso unitario en $t = \tau$ imparte a la masa, m , la velocidad (a partir de la ecuación 31)

$$\dot{u}(\tau) = \frac{1}{m} \dots \dots \dots (32)$$

Pero el desplazamiento es cero antes de, y hasta ocurrido, el impulso:

$$u(\tau) = 0 \dots \dots \dots (33)$$

Un impulso unitario ocasiona una vibración libre del sistema de 1GDL debido a la velocidad y al desplazamiento inicial dados por las ecuaciones (32) y (33). Si se sustituyen éstas en la ecuación (25), se obtiene la respuesta de los sistemas viscosamente amortiguados:

$$h(t - \tau) \equiv u(t) = e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \left[u(0)\cos\omega_D(t - \tau) + \frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \text{sen}\omega_D(t - \tau) \right]$$

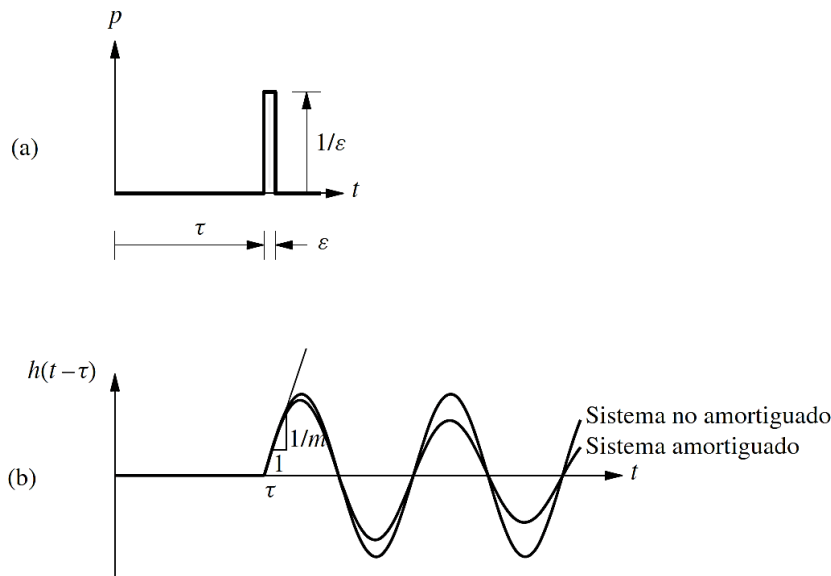
$$h(t - \tau) \equiv u(t) = e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \left[\frac{1}{m\omega_D} \text{sen}\omega_D(t - \tau) \right] \quad t \geq \tau \dots \dots \dots (34)$$

Esta función de respuesta al impulso unitario, indicada por $h(t - \tau)$, se muestra en la figura 14 b, junto con el caso especial de $\zeta = 0$.

Si la excitación es un impulso unitario del movimiento del suelo, con base en la ecuación (17), $p_{ef}(t) = -m\delta(t - \tau)$; entonces, la ecuación (32) se convierte en $\dot{u}(\tau) = -1$ y la ecuación (34) cambia a

$$h(t - \tau) = e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \left[-\frac{1}{\omega_D} \text{sen}\omega_D(t - \tau) \right] \quad t \geq \tau \dots \dots \dots (35)$$

Figura 14. (a) Impulso unitario, (b) respuesta al impulso unitario.



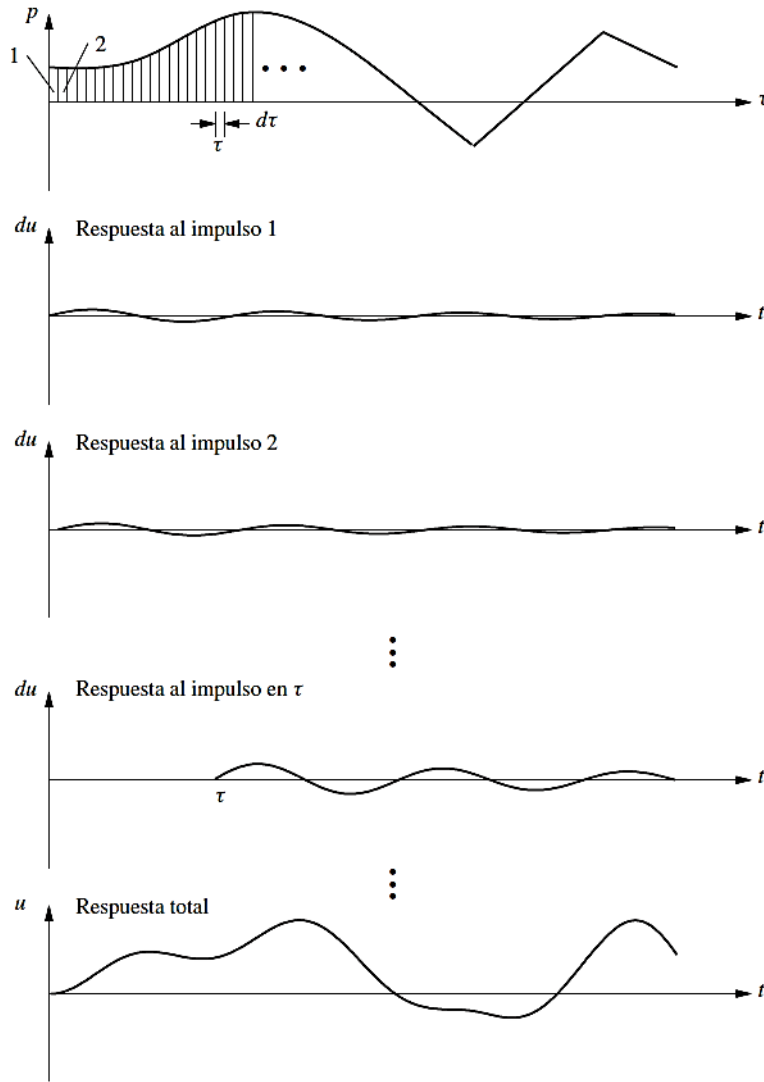
Fuente: (Chopra, 2014, p.126).

2.2.4.10. Respuesta a una fuerza arbitraria

Una fuerza $p(t)$ que varía en forma arbitraria con el tiempo puede representarse como una secuencia de impulsos demasiado cortos (figura 15). La respuesta de un sistema dinámico lineal a uno de estos impulsos, aquél en el tiempo τ con magnitud $p(\tau)d\tau$, es esta magnitud multiplicada por la función de respuesta al impulso unitario:

$$du(t) = [p(\tau)d\tau]h(t - \tau), \quad t > \tau \dots \dots \dots (36)$$

Figura 15. Explicación esquemática de la integral de convolución.



Fuente: (Chopra, 2014, p.128).

La respuesta del sistema en el tiempo t es la suma de las respuestas a todos los impulsos hasta ese momento (figura 15). Así

$$u(t) = \int_0^t p(\tau)h(t - \tau)d\tau \dots \dots \dots (37)$$

Esto se conoce como la integral de convolución, un resultado general que es aplicable a cualquier sistema dinámico lineal.

Si se especifica la ecuación (37) para el sistema de 1GDL al sustituir la ecuación (34) por la función de respuesta al impulso unitario, resulta la integral de Duhamel:

$$u(t) = \int_0^t p(\tau)e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \left[\frac{1}{m\omega_D} \text{sen}\omega_D(t - \tau) \right] d\tau$$

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_D} \int_0^t p(\tau) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \text{sen}[\omega_D(t-\tau)] d\tau \dots \dots \dots (38)$$

Para un sistema no amortiguado este resultado se simplifica como $\zeta = 0$

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_n} \int_0^t p(\tau) \text{sen}[\omega_n(t-\tau)] d\tau \dots \dots \dots (39)$$

La integral de Duhamel proporciona un resultado general para evaluar la respuesta de un sistema lineal de 1GDL a una fuerza arbitraria. Este resultado se restringe a los sistemas lineales, puesto que se basa en el principio de superposición. Por lo tanto, no es aplicable a estructuras que se deforman más allá de su límite elástico lineal.

2.2.4.11. Fuerza escalonada

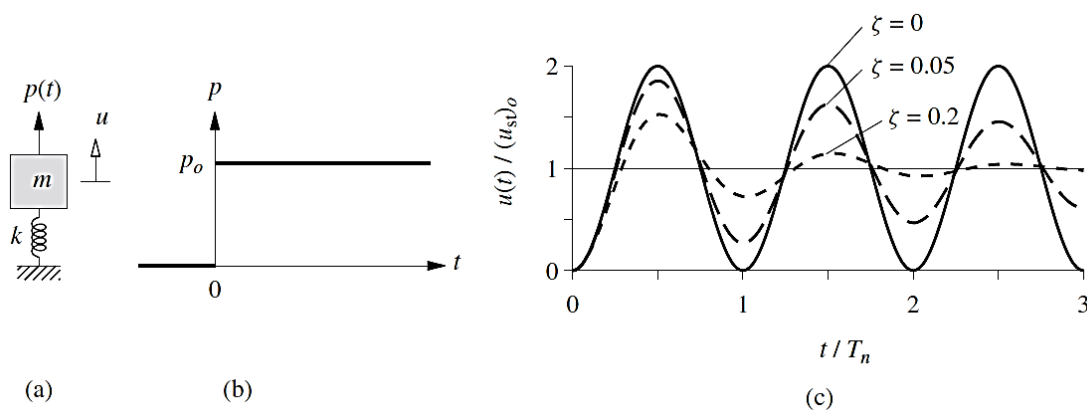
Una fuerza escalonada salta de repente de cero a p_0 y se mantiene constante en ese valor (figura 16 b). Se desea determinar la respuesta de un sistema de 1GDL no amortiguado (figura 16 a) que inicia desde el reposo a la fuerza escalonada:

$$p(t) = p_0 \dots \dots \dots (40)$$

La ecuación de movimiento se resolvió (sección 2.2.4.10.) utilizando la integral de Duhamel para obtener

$$u(t) = (u_{st})_0 (1 - \cos\omega_n t), u(t) = (u_{st})_0 \left(1 - \cos\frac{2\pi t}{T_n}\right), \omega_n = \frac{2\pi}{T_n} \dots \dots \dots (41)$$

Figura 16. (a) Sistema de 1GDL; (b) fuerza escalonada; (c) respuesta dinámica.



Fuente: (Chopra, 2014, p.130).

La respuesta dinámica en estado estacionario, una oscilación sinusoidal con la frecuencia de la excitación, puede expresarse como

$$u(t) = (u_{st})_0 \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right) \text{sen}\omega t \dots \dots \dots (42)$$

Si se hace caso omiso de los efectos dinámicos representados por el término de aceleración en la ecuación $m\ddot{u} + ku = p_0 \text{sen}\omega t$, se obtiene la deformación estática (indicada por el subíndice “st”) en cada instante:

$$u_{st}(t) = \frac{p_0 \text{sen}\omega t}{k} \dots \dots \dots (43)$$

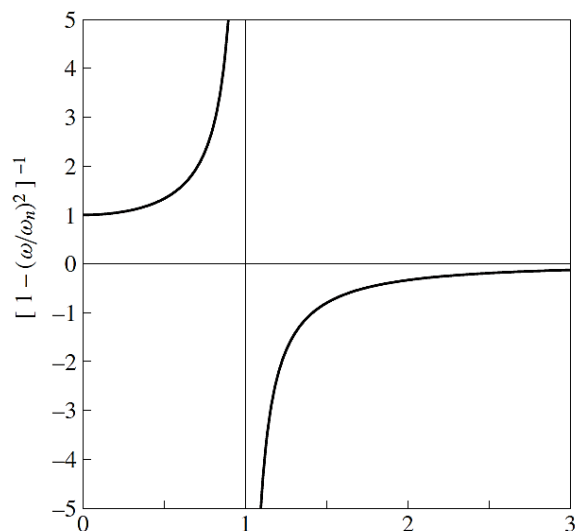
El valor máximo de la deformación estática es

$$(u_{st})_0 = \frac{p_0}{k} \dots \dots \dots (44)$$

donde p_0 es la amplitud o valor máximo de la fuerza y su frecuencia ω se denomina frecuencia de excitación o frecuencia de forzamiento.

Que puede interpretarse como la deformación estática producida por la amplitud p_0 de la fuerza; por razones de brevedad, se referirá a $(u_{st})_0$ como la deformación estática. El factor que está entre paréntesis en la ecuación (40) se grafica en la figura 17 contra ω/ω_n , la relación de la frecuencia de excitación sobre la frecuencia natural.

Figura 17. Relación de frecuencias ω/ω_n .



Fuente: (Chopra, 2014, p.68).

En la figura 16c se grafica la deformación normalizada o el desplazamiento normalizado, $u(t)/(u_{st})_0$, contra el tiempo normalizado, t/T_n . Se observa que el sistema oscila en su periodo natural alrededor de una nueva posición de equilibrio, que se desplaza

una distancia $(u_{st})_0$ desde la posición de equilibrio original de $u = 0$. El desplazamiento máximo puede determinarse al diferenciar la ecuación (41) e igualar $\dot{u}(t)$ a cero, lo que resulta en $\omega_n \text{sen} \omega t = 0$. Los valores t_0 de t que satisfacen esta condición son

$$\begin{aligned}\dot{u}(t) &= (\dot{u}_{st})_0 - (u_{st})_0 \dot{\cos} \omega_n t = 0 \\ \dot{u}(t) &= 0 - (u_{st})_0 (-\text{sen} \omega_n t) \omega_n = 0 \\ \omega_n (\text{sen} \omega_n t) &= 0 \\ \omega_n t_0 &= j\pi \quad \text{o} \quad t_0 = \frac{jT_n}{2} \dots \dots \dots (45)\end{aligned}$$

Donde j es un número entero impar; los enteros pares corresponden a los valores mínimos de $u(t)$. El valor máximo u_0 de $u(t)$ está dado por la ecuación (41) evaluada en $t_0 = t$; estos máximos son todos iguales:

$$u(t) = 2(u_{st})_0 \dots \dots \dots (46)$$

Así, una fuerza aplicada repentinamente produce el doble de la deformación que podría haber causado una fuerza aplicada lentamente.

La respuesta de un sistema con amortiguamiento puede determinarse al sustituir la ecuación (40) en la ecuación (38) y evaluar la integral de Duhamel para obtener

$$u(t) = (u_{st})_0 \left(1 - e^{-\zeta \omega_n t} \left(\cos \omega_D t + \frac{\zeta \text{sen} \omega_D t}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \right) \right) \dots \dots \dots (47)$$

La ecuación diferencial que debe solucionarse es

$$p_0 = m\ddot{u} + c\dot{u} + ku \dots \dots \dots (48)$$

Su solución complementaria está dada por la ecuación (f), la solución particular es $u_p = p_0/k$ y la solución completa es

$$A = u(0), \quad B = \frac{\dot{u}(0) + \zeta \omega_n u(0)}{\omega_D} \dots \dots \dots (f)$$

$$u(t) = e^{-\zeta \omega_n t} (A \cos \omega_D t + B \text{sen} \omega_D t) + \frac{p_0}{k} \dots \dots \dots (49)$$

Donde las constantes A y B deben determinarse a partir de las condiciones iniciales. Para un sistema que inicia desde el reposo, $u(0) = \dot{u}(0) = 0$

$$A = -\frac{p_0}{k} \quad B = -\frac{p_0}{k} \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$$

Si se sustituyen estas constantes en la ecuación (49), se obtiene el mismo resultado que en la ecuación (47).

$$u(t) = (u_{st})_0 \left(1 - e^{-\zeta \omega_n t} \left(\cos \omega_D t + \frac{\zeta \operatorname{sen} \omega_D t}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \right) \right)$$

2.2.4.12. Fuerza tipo rampa o linealmente creciente

En la figura 18 b la fuerza aplicada $p(t)$ aumenta linealmente con el tiempo. Por supuesto, no puede aumentar de manera indefinida, pero el interés aquí se limita al lapso de tiempo en el que $p(t)$ todavía es lo suficientemente pequeña para que la fuerza resultante del resorte esté dentro de su límite elástico lineal.

Aunque la ecuación de movimiento puede resolverse mediante varios métodos, aquí se ilustra el uso de la integral de Duhamel para obtener la solución. La fuerza aplicada

$$p(t) = p_0 \frac{t}{t_r} \dots \dots \dots (50)$$

se sustituye en la ecuación (39) para obtener

$$u(t) = \frac{1}{m \omega_n} \int_0^t p(\tau) \operatorname{sen}[\omega_n(t - \tau)] d\tau \dots \dots \dots (39)$$

$$u(t) = \frac{1}{m \omega_n} \int_0^t \frac{p_0}{t_r} \tau \operatorname{sen}[\omega_n(t - \tau)] d\tau \dots \dots \dots (51)$$

Esta integral se evalúa y se simplifica para obtener

$$u(t) = (u_{st})_0 \left(\frac{t}{t_r} - \frac{\operatorname{sen} \omega_n t}{\omega_n t_r} \right) = (u_{st})_0 \left(\frac{t}{T_n} \frac{T_n}{t_r} - \frac{\frac{\operatorname{sen} 2\pi t}{T_n}}{\frac{2\pi t_r}{T_n}} \right) \dots \dots \dots (52)$$

donde $(u_{st})_0 = \frac{p_0}{k}$, la deformación estática debida a la fuerza p_0 .

En la figura 18 c, se grafica la ecuación (52) para $\frac{t_r}{T_n} = 2.5$, donde también se muestra la deformación estática en cada instante de tiempo,

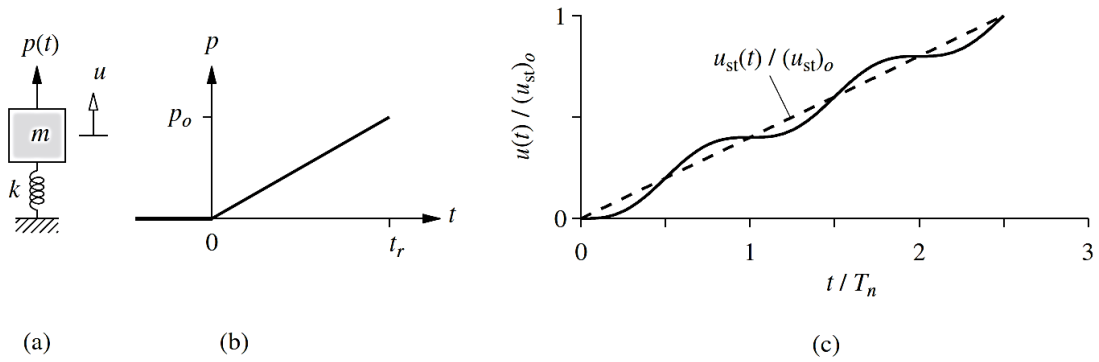
$$u(t) = (u_{st})_0 \left(\frac{t}{T_n} \frac{1}{2.5} - \frac{\frac{\operatorname{sen} 2\pi t}{T_n}}{2\pi(2.5)} \right)$$

$$u(t) = (u_{st})_0 \left(\frac{t(0.4)}{T_n} - \frac{\text{sen}2\pi t}{T_n(5)} \right)$$

$$u_{st}(t) = \frac{p(t)}{k} = (u_{st})_0 \frac{t}{T_n} \dots \dots \dots (53)$$

$u_{st}(t)$ varía con el tiempo de la misma manera que $p(t)$ y las dos difieren por el factor de escala $1/k$. Se observa que el sistema oscila en su periodo natural T_n alrededor de la solución estática.

Figura 18. (a) Sistema de 1GDL, (b) fuerza creciente, (c) respuestas dinámica y estática.



Fuente: (Chopra, 2014, p.131).

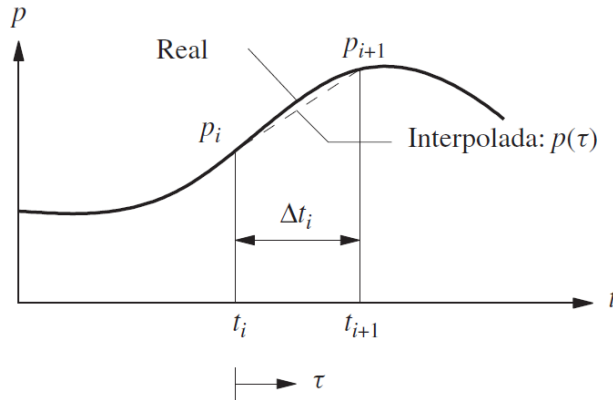
2.2.5. Evaluación numérica de la respuesta dinámica

Por lo general, la solución analítica de la ecuación de movimiento para un sistema de un solo grado de libertad no es posible si la excitación [fuerza $p(t)$ o aceleración del terreno $\ddot{u}_g(t)$] varía arbitrariamente con el tiempo o si el sistema no es lineal. Tales problemas pueden abordarse mediante métodos numéricos paso a paso en el tiempo para la integración de ecuaciones diferenciales.

2.2.5.1. Métodos basados en la interpolación de la excitación

En la figura 19 se muestra que durante el intervalo de tiempo $t_i \leq t \leq t_{i+1}$, la función de excitación está dada por

Figura 19. Notación para una excitación interpolada linealmente.



Fuente: (Chopra, 2014, p.131).

$$p(\tau) = p_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \tau \dots \dots \dots (54)$$

Donde

$$\Delta p_i = p_{i+1} - p_i \dots \dots \dots (55)$$

y la variable de tiempo τ varía de 0 a Δt_i . Por simplicidad algebraica, se consideran primero los sistemas sin amortiguamiento; más tarde, el procedimiento se ampliará para incluir este parámetro. La ecuación a resolver es

$$m\ddot{u} + ku = p_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \tau \dots \dots \dots (56)$$

sometida a las condiciones iniciales $u(t) = u_i$ y $\dot{u}(0) = \dot{u}_i$. La respuesta $u(\tau)$ durante el intervalo de tiempo $0 \leq \tau \leq \Delta t_i$ es la suma de tres partes:

- 1) la vibración libre debida al desplazamiento inicial u_i y la velocidad $\dot{u}_i$ en $\tau = 0$.
- 2) la respuesta a la fuerza de paso p_i con condiciones iniciales nulas.
- 3) la respuesta a la fuerza incremental $(\frac{\Delta p_i}{\Delta t_i})\tau$ con condiciones iniciales nulas.

Al adaptar las soluciones disponibles para estos tres casos en los puntos 2.2.4.7, 2.2.4.11 y 2.2.4.12, respectivamente, se obtiene

$$u(\tau) = u_i \cos(\omega_n \tau) + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \text{sen}(\omega_n \tau) + \frac{p_i}{k} (1 - \cos(\omega_n \tau)) + \frac{\Delta p_i}{k} \left(\frac{\tau}{\Delta t_i} - \frac{\text{sen}(\omega_n \tau)}{\omega_n \Delta t_i} \right) \dots \dots \dots (57)$$

Y la diferenciación de $u(\tau)$ conduce a

$$\frac{\dot{u}(\tau)}{\omega_n} = -u_i \text{sen}(\omega_n \tau) + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \cos(\omega_n \tau) + \frac{p_i}{k} \text{sen}(\omega_n \tau) + \frac{\Delta p_i (1 - \cos(\omega_n \tau))}{k \omega_n \Delta t_i} \dots \dots (58)$$

Si se evalúan estas ecuaciones en $\tau = \Delta t_i$, se obtiene el desplazamiento u_{i+1} y velocidad $\dot{u}_{i+1}$ en el instante $i + 1$:

$$u_{i+1} = u_i \cos(\omega_n \Delta t_i) + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \text{sen}(\omega_n \Delta t_i) + \frac{p_i}{k} (1 - \cos(\omega_n \Delta t_i)) + \frac{\Delta p_i}{k} \frac{1}{\omega_n \Delta t_i} (\omega_n \Delta t_i - \text{sen}(\omega_n \Delta t_i)) \dots \dots \dots (59)$$

$$\frac{\dot{u}_{i+1}}{\omega_n} = -u_i \text{sen}(\omega_n \Delta t_i) + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \cos(\omega_n \Delta t_i) + \frac{p_i}{k} \text{sen}(\omega_n \Delta t_i) + \frac{\Delta p_i}{k} \frac{1}{\omega_n \Delta t_i} (1 - \cos(\omega_n \Delta t_i)) \dots \dots \dots (60)$$

Estas ecuaciones pueden reescribirse después de sustituir la ecuación (55) como fórmulas de recurrencia:

$$u_{i+1} = Au_i + B\dot{u}_i + Cp_i + Dp_{i+1} \dots \dots \dots (61 a)$$

$$\dot{u}_{i+1} = A'\dot{u}_i + B'\dot{u}_i + C'p_i + D'p_{i+1} \dots \dots \dots (61 b)$$

Al repetir la deducción anterior para los sistemas amortiguados por debajo del nivel crítico (es decir, $\zeta < 1$), se observa que las ecuaciones (61) también son aplicables a los sistemas amortiguados con las expresiones para los coeficientes A, B, ... , D' dadas en la tabla 12.

Los coeficientes dependen de los parámetros del sistema ω_n , k y ζ , y del intervalo de tiempo $\Delta t \equiv \Delta t_i$.

La solución exacta de la ecuación de movimiento necesaria en este procedimiento numérico es factible sólo para los sistemas lineales. Está convenientemente desarrollada para los sistemas de 1GDL.

Tabla 12. Coeficientes en las fórmulas de recurrencia($\zeta < 1$)

COEFICIENTE	FORMULA
A	$A = e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen}(\omega_D\Delta t) + \cos(\omega_D\Delta t) \right)$
B	$B = e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{1}{\omega_D} \operatorname{sen}(\omega_D\Delta t) \right)$
C	$C = \frac{1}{k} \left\{ \frac{2\zeta}{\omega_D\Delta t} + e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left[\left(\frac{1-2\zeta^2}{\omega_D\Delta t} - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right) \operatorname{sen}(\omega_D\Delta t) - \left(1 + \frac{2\zeta}{\omega_D\Delta t} \right) \cos(\omega_D\Delta t) \right] \right\}$
D	$D = \frac{1}{k} \left[1 - \frac{2\zeta}{\omega_D\Delta t} + e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{2\zeta^2-1}{\omega_D\Delta t} \operatorname{sen}(\omega_D\Delta t) + \frac{2\zeta}{\omega_D\Delta t} \cos(\omega_D\Delta t) \right) \right]$
A'	$A' = -e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen}(\omega_D\Delta t) \right)$
B'	$B' = e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\cos(\omega_D\Delta t) - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen}(\omega_D\Delta t) \right)$
C'	$C' = \frac{1}{k} \left\{ -\frac{1}{\Delta t} + e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left[\left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} + \frac{\zeta}{\Delta t\sqrt{1-\zeta^2}} \right) \operatorname{sen}(\omega_D\Delta t) + \frac{1}{\Delta t} \cos(\omega_D\Delta t) \right] \right\}$
D'	$D' = \frac{1}{k\Delta t} \left[1 - e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen}(\omega_D\Delta t) + \cos(\omega_D\Delta t) \right) \right]$

2.2.6. Métodos de combinación de componentes horizontales

2.2.6.1. Media Geométrica (Geometric Mean) “GM”

Debido a la dependencia que posee la Media Geométrica (GM) de la respuesta espectral al ángulo de rotación, (Boore, 2006), se origina dos medidas del movimiento del suelo, las cuales son GMRotDpp (GM: Media Geométrica, Rot: Rotación, D: Dependiente, pp: percentil) y GMRotIpp (GM: Media Geométrica, Rot: Rotación, I: Independiente, pp: percentil) pertenecientes a cierto percentil del conjunto de medias geométricas adquiridas utilizando todas las rotaciones no redundantes.

La Media Geométrica (GM) depende de la orientación del sensor del acelerógrafo, cuando la dirección del registro y la del sensor sean la misma, es un problema ya que, en dicho caso, la Media Geométrica sería cero. Por eso se ha utilizado la metodología de Boore (Boore, 2006), en donde se utilizan dos medidas que sean independientes de la dirección en la que se encuentre el sensor.

Se utilizan combinaciones lineales de las componentes rectangulares entre 0 y 90 grados de rotación, debido a que las combinaciones lineales de la señal, poseen una periodicidad en este intervalo. La GM, al ser una combinación de las dos direcciones ortogonales, posee el mismo valor pues no depende del orden de los factores que la componen. (Luis A. Pinzón - Diego A. Hidalgo - Lluís G. Pujades, 2015).

Considerando un caso extremo, en el que, si uno de los sensores resulta estar alineado con la dirección de polarización, el espectro de respuesta del movimiento registrado en el sensor ortogonal sería cero y la media geométrica también, independientemente de la amplitud de la polarización del movimiento del suelo. “Esto podría ser una importante consideración cerca de fallas, donde la directividad de ruptura y el patrón de radiación puede producir movimientos fuertemente correlacionados en particularmente en períodos de 1 segundo o más” (Spudich, Chiou, Graves, Collins, & Somerville, 2004, p.11).

De acuerdo a la evaluación hecha por (Shahi & Baker, 2013) sobre la media aritmética y la media geométrica para obtener la tendencia central de cada medida de intensidad; se observó que la media aritmética tiene una distribución sesgada debido a que se ve muy influenciada por los valores extremos, mientras que la media geométrica tiene una distribución que se asemeja a una log-normal, el mismo tipo de distribución que

siguen las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (Boore & Joyner, 1982, Abrahamson & Youngs, 1992).

La Media Geométrica “GM” es un método que considera las máximas respuestas de cada componente horizontal ocurridos en distintos tiempos y luego las combina mediante la raíz cuadrada del producto de las dos demandas espectrales ortogonales, esto sucede en función de un período T_i y un valor constante de amortiguamiento.

A continuación, se presenta la fórmula de la Media Geométrica (GM):

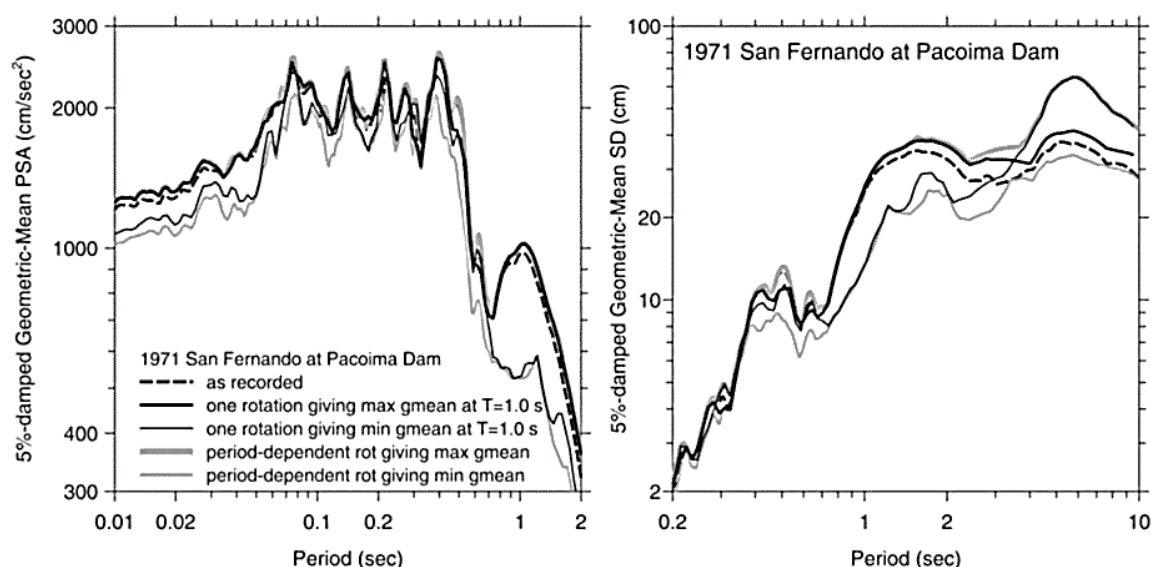
$$GM = \sqrt{RS(H_1) * RS(H_2)} \dots\dots\dots (62)$$

Donde:

$RS(H_1)$ = Respuesta espectral calculada para una componente horizontal.

$RS(H_2)$ = Respuesta espectral calculada para la componente horizontal ortogonal a H_1

Figura 20. Espectros de respuesta que muestran ángulos de rotación independientes



Fuente: (Boore et al., 2006, p.1505).

En la Figura 20 muestra los Espectros de respuesta de los ángulos de rotación independientes del periodo que minimizan y maximizan la media geométrica en el periodo 1 segundo ($T=1.0s$), también se muestran espectros de respuesta para los cuales se usa un ángulo de rotación diferente para cada periodo para minimizar y maximizar la media geométrica, utilizaron los registros sísmicos de la presa Pacoima suscitados en el terremoto de San Fernando de 1971.

- La línea negra discontinua simboliza el espectro de respuesta de la media geométrica del registro cuando $\theta=0^\circ$.
- La línea negra continua de mayor grosor y la de menor grosor simboliza la existencia de un ángulo de rotación que maximiza y minimiza respectivamente la media geométrica en el período 1 segundo ($T=1.0s$).
- La línea gris continua de mayor grosor y la de menor grosor simboliza la repuesta espectral que usa un distinto ángulo de rotación para cada período, de esta manera maximiza y minimiza la media geométrica.

Cabe mencionar que en la figura 20 se muestran los espectros de respuesta de pseudo-aceleraciones y de desplazamientos, teniendo en cuenta un 5% de amortiguamiento crítico para la horizontal tal como se registró movimientos en la presa de Pacoima por el terremoto de San Fernando de 1971.

2.2.6.2. Media Geométrica, Rotación, Dependiente, Percentil (GMRotDpp)

Para el cálculo del GMRotDpp se utiliza todas las rotaciones no redundantes entre 0° y 90° , cabe destacar que si excede este rango las componentes horizontales toman valores simétricos; el término “GM” significa media geométrica, “Rot” indica que se usan rotaciones sobre los ángulos no redundantes, “D” indica que se usan rotaciones dependientes del período y “pp” indica el valor del percentil utilizado para la medida (0, 50 y 100 que corresponden al mínimo, mediano y máximo valor respectivamente; el valor mediano probablemente será la medida comúnmente utilizada, en cuyo caso la nueva medida es llamada GMRotD50)(Boore, Watson- Lamprey, & Abrahamson, 2006, p.1505).

Según la Real Academia Española, el percentil es el “valor que divide un conjunto ordenado de datos estadísticos de forma que un porcentaje de tales datos sea inferior a dicho valor”. Un individuo en el percentil 80 está por encima del 80 % del grupo a que pertenece.

A continuación, se presenta los pasos para calcular el GMRotDpp:

Paso 1. A cada una de las componentes horizontales de aceleraciones se las nombra $Osc1(t, \eta, 0)$ y $Osc2(t, \eta, 0)$, donde “Osc” es el Oscilador, “t” es el tiempo de registro, “ η ” es el porcentaje de amortiguamiento crítico de estudio y “0” indica el ángulo de rotación original del registro.

Paso 2. Establecer el ángulo de rotación θ de partida.

Paso 3. Definir los acelerogramas de las componentes horizontales con sus aceleraciones y el tiempo en que estas ocurren, luego utilizar las combinaciones lineales para girar estos registros sísmicos en función de un ángulo de rotación θ . Las ecuaciones que precisan estas combinaciones lineales son:

$$Osc_1(t, \theta) = Osc_1(t, 0) * \cos(\theta) + Osc_2(t, 0) * \sin(\theta) \dots\dots\dots (63)$$

$$Osc_2(t, \theta) = -Osc_1(t, 0) * \sin(\theta) + Osc_2(t, 0) * \cos(\theta) \dots\dots\dots (64)$$

Donde por simplicidad de notación se elimina “ η ”, puesto que en todos los casos se emplea el mismo valor de fracción de amortiguamiento ζ .

Paso 4. Calcular las respuestas espectrales de cada componente horizontal para un conjunto de períodos y para un ángulo de rotación en específico.

Paso 5. Calcular la media geométrica como se muestra en la ecuación (62), luego almacenar estos valores en una matriz que estará en función del ángulo rotacional y del período para un valor constante de amortiguamiento ($GM(\theta, T_i)$).

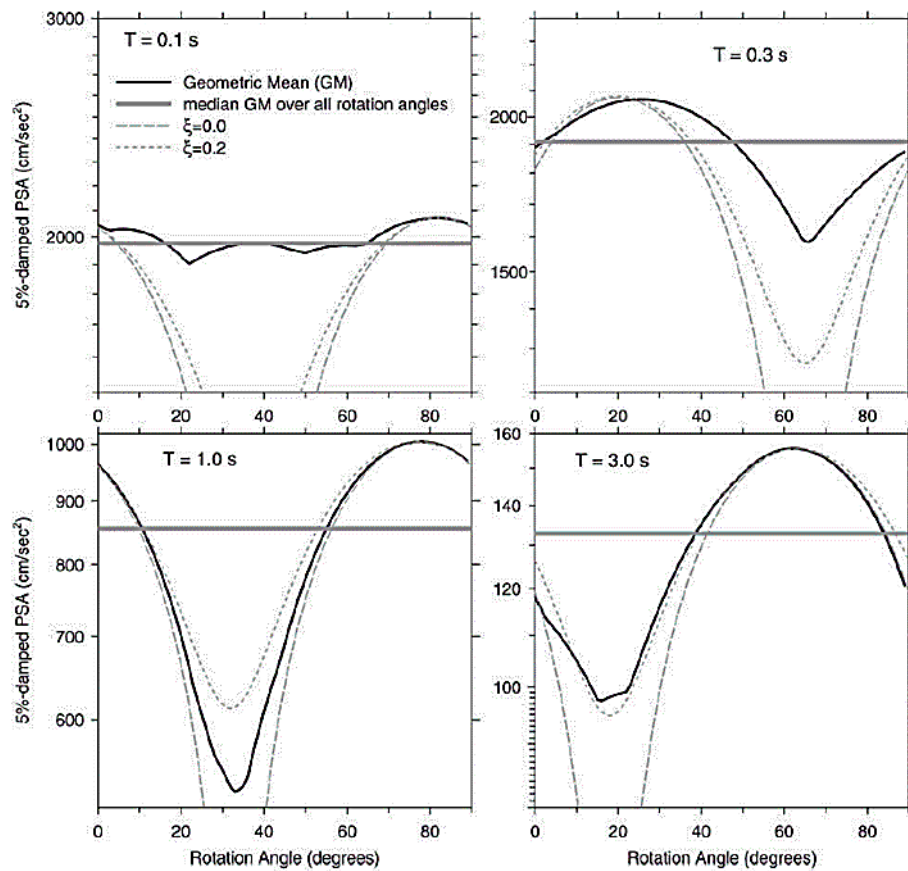
Paso 6. Incrementar el ángulo de rotación θ en $\Delta\theta$ (Se recomienda que $\Delta\theta = 1^\circ$ es suficiente para la precisión del método).

Paso 7. Repetir los pasos del 3 al 5 hasta que el ángulo de rotación sea igual a 90° .

Paso 8. “Clasificar el conjunto correspondiente de $GM(\theta, T_i)$ para todos los valores de θ y un valor fijo de T_i , de menor a mayor valor” (Boore et al., 2006, p.1506).

Paso 9. Establecer $GMRotDpp$ en el valor de GM correspondiente al valor del percentil deseado para cada período T_i . El percentil más utilizado es el 50 (para un conjunto de rotaciones de 0 a 90° con un $\Delta\theta = 1^\circ$, el valor del percentil 50 se calcula como el promedio de los valores entre los ángulos 45 y 46). Debido a la periodicidad del ángulo de 90° , $GMRotDpp$ será independiente de la orientación original del acelerógrafo (Boore et al., 2006, p.1506).

Figura 21. Media geométrica de los movimientos registrados en la Presa Pacoima



Fuente:(Boore et al., 2006, p.1506).

En la Figura 21 muestra la Media geométrica de los movimientos registrados en la Presa Pacoima para el terremoto de San Fernando ocurrido en 1971, se calculó para 4 periodos como una función del ángulo rotacional. se puede observar la media geométrica para los periodos 0.1, 0.3, 1 y 3 segundos calculados a partir de un 5% de amortiguamiento crítico y pseudo aceleraciones. La línea continua negra representa la media geométrica sobre todos los ángulos de rotación no redundantes, la línea continua gris representa el valor de la media geométrica utilizando el percentil 50, el cual es llamado GMRotD50 y las líneas discontinuas grises “representan las predicciones basadas entre la relación de la media geométrica y la amplitud de la respuesta espectral en la dirección de la componente que haya registrado la mayor amplitud de respuesta” (Boore et al., 2006, p.1503).

2.2.6.3. Media Geométrica, Rotación, Independiente, Percentil (GMRotIpp)

El análisis dinámico requiere un espectro de respuesta que represente las respuestas máximas de estructuras de 1GDL, por lo tanto, la definición de GMRotDpp satisface el requerimiento que es independiente de la orientación del acelerógrafo, pero

los valores de la media geométrica por período corresponden a diferentes ángulos de rotación, es por tal motivo que el objetivo del GMRotIpp es encontrar un espectro de respuesta correspondiente a un solo ángulo de rotación.

A continuación, se presenta los pasos para calcular el GMRotIpp:

Paso 1. Calcular el GMRotDpp para un rango de períodos (donde la frecuencia más baja es controlada por el procesamiento requerido para eliminar el ruido de largo período).

Paso 2. “Para cada período, se normaliza el conjunto de medias geométricas para todos los ángulos de rotación con respecto a GMRotDpp”(Boore et al., 2006, p.1507).

$$\frac{GM(\theta, T_i)}{GMRotDpp(T_i)} \dots\dots\dots (65)$$

Paso 3. Calcule la función de penalización o de error definida por la ecuación:

$$penalty(\theta) = \frac{1}{N_{per}} \sum_{i=1}^h \left[\frac{GM(\theta, T_i)}{GMRotDpp(T_i)} - 1 \right]^2 \dots\dots\dots (66)$$

Donde el rango de períodos se extiende de T_1 a T_h , $GM(\theta, T_i)$ es la media geométrica del espectro de respuesta para el período T_i calculado para el ángulo de rotación θ y $GMRotDpp(T_i)$ es el valor del percentil de $GM(\theta, T_i)$ sobre todos los ángulos no redundantes, como se definió previamente (Boore et al., 2006, p.1507).

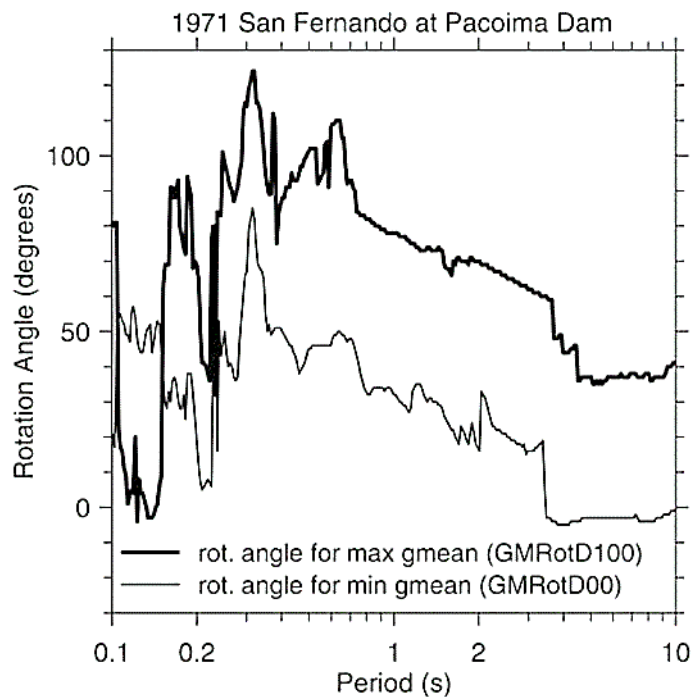
Paso 4. Se encuentra el ángulo de rotación correspondiente al mínimo valor de la función $penalty(\theta_{min})$.

Paso 5. Gire los movimientos registrados en este ángulo.

Paso 6. Finalmente, como en el cálculo de GMRotDpp ya se obtuvieron los espectros de repuesta para el rango de rotaciones en estudio, se selecciona el espectro de respuesta correspondiente al ángulo mínimo de la función $penalty(\theta_{min})$. Este espectro de respuesta se le denomina GMRotIpp, donde la “I” significa que el ángulo de rotación es independiente del período.

“La selección de θ_{min} . busca evitar extremas variaciones lejos del valor del percentil deseado en todos los períodos” (Boore et al., 2006, p.1507).

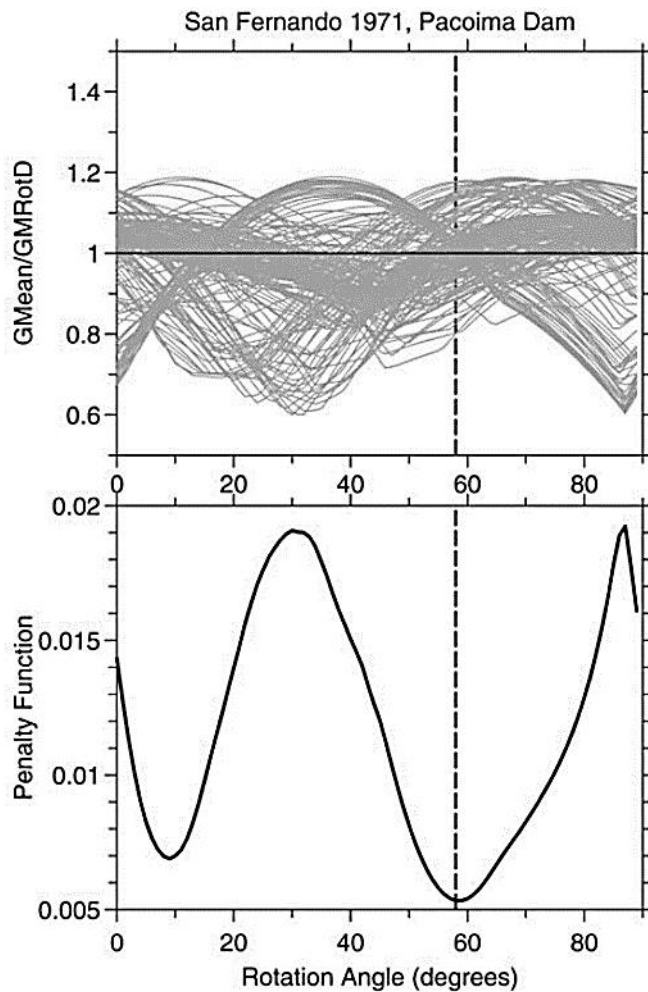
Figura 22. Ángulos de rotación correspondientes al máximo y mínimo valor de la media geométrica.



Fuente: (Boore et al., 2006, p.1507).

En la Figura 22: se puede apreciar que la línea negra continua representa la máxima media geométrica (GMRotD100) y la línea gris continua representa la mínima media geométrica (GMRotD00), evidentemente el mediano valor de la media geométrica (GMRotD50) estaría posicionado en la mitad de las líneas descritas anteriormente. Cabe resaltar que la gráfica se calculó en base a los datos de los movimientos registrados en la Presa Pacoima para el terremoto de San Fernando ocurrido en 1971.

Figura 23. Relación de la media geométrica de un conjunto de periodos con respecto al GMRotDpp en función del ángulo de rotación.



Fuente: (Boore et al., 2006, p.1508).

En la figura 23 El grafico superior muestra la relación de la media geométrica de un conjunto de periodos con respecto al GMRotDpp en función del ángulo de rotación. muestra la función de penalización construida en base al conjunto de medias geométricas normalizadas, el mínimo valor de la función representa el ángulo de rotación que presento la menor dispersión entre la media geométrica y el GMRotDpp, de este ángulo resulta un espectro de respuesta el cual es llamado GMRotIpp. Fuente: (Boore et al., 2006, p.1508).

En la figura 23 muestra específicamente en el gráfico superior una relación de las medias geométricas con el GMRotD50 para 200 períodos individuales logarítmicamente espaciados de 0.01s a 10.0s; consecuentemente el gráfico inferior muestra la función de penalización construida con las 200 medias geométricas normalizadas, el valor mínimo de la función muestra un ángulo de rotación aproximadamente igual a 58°, este ángulo otorga un espectro de respuesta de la media geométrica denominado GMRotI50. Los

resultados fueron calculados en base a los datos obtenidos del movimiento registrado en la Presa Pacoima para el terremoto de San Fernando de 1971.

2.2.6.4. Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS)

El método SRSS considera las máximas respuestas de cada componente horizontal en distintos tiempos en que estas ocurren, por ende, se considera que los resultados obtenidos son sobredimensionados con respecto a lo ocurrido en los movimientos sísmicos.

El método SRSS de combinar máximos modales ha encontrado una amplia aceptación entre los ingenieros estructurales que se dedican al análisis sísmico. Para la mayoría de los análisis bidimensionales, el método SRSS parece producir buenos resultados en comparación con los cálculos de respuesta de la historia del tiempo. (Wilson, 2000)

El método SRSS o CQC se aplica a la carga en una dirección a la vez. Donde se requiere una consideración explícita de efectos de carga ortogonal, los resultados de una dirección de la carga se puede agregar al 30% de los resultados de carga en una dirección ortogonal. (Wilson, 2000).

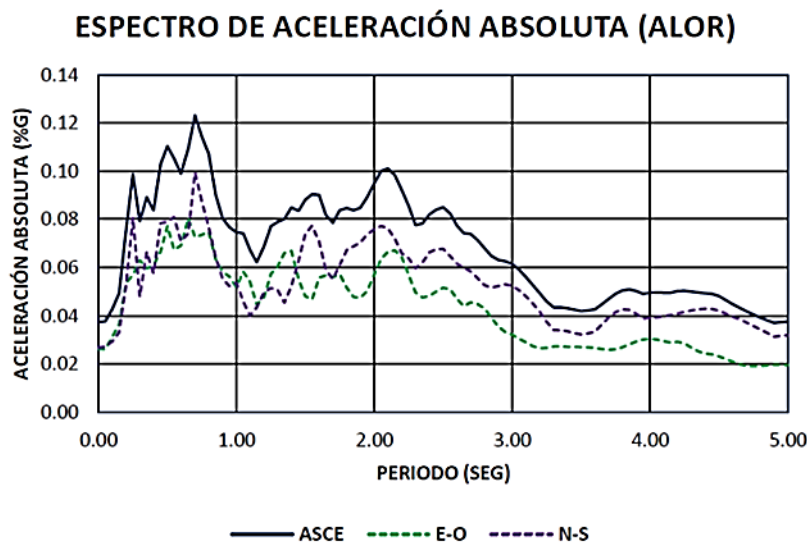
Sugiere que un enfoque más preciso es utilizar el método SRSS para combinar 100% de los resultados de cada una de las dos direcciones ortogonales donde los resultados direccionales individuales han sido combinados por SRSS o CQC, según corresponda. (Wilson, 2000).

“Se realiza la combinación espectral mediante la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS) de los espectros elásticos de cada una de las componentes horizontales” (Lascano, 2018, p.11).

“La mayoría de los códigos recomiendan analizar la estructura de forma independiente en dos direcciones ortogonales para obtener y combinar las máximas respuestas unidireccionales que interesen ($R_{x\ max}$ y $R_{y\ max}$), de esta manera estimar la máxima respuesta bidireccional (Valdés González & Ordaz Schroeder, 2008, p.92).

$$SRSS = \sqrt{R_{x\ max}^2 + R_{y\ max}^2} \dots\dots\dots (67)$$

Figura 24. Comparación de los espectros de respuesta de las componentes EO y NS con el método de combinación espectral SRSS de la estación ALOR perteneciente al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.



Fuente: (Lascano, 2018, p.10).

2.2.6.5. Respuesta Máxima en el Plano Horizontal (RotD100)

La respuesta espectral máxima, conocida como RotD100, corresponde al punto en la respuesta espectral de la órbita espectral de un SDOF desde los componentes espectrales horizontales para una órbita completa más alejada del origen desde 0° hasta 360 (Boore, 2010). La orientación o ángulo para este punto se define como el eje de respuesta significativo, y su orientación perpendicular es el eje de respuesta menor.

Según la “NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures” (FEMA, 2015), para el diseño estructural se busca considerar una dirección máxima en el plano horizontal que de un parámetro de intensidad del movimiento del terreno que sea apropiado, para el cual, el diseño sísmico utilizando los procedimientos lineales o no lineales, evite el colapso del sistema estructural., que se usaron para la obtención de los espectros de peligro uniforme, están definidas en términos de la respuesta horizontal promedio (media geométrica sin rotar o geomean), sin ninguna consideración de direccionalidad. La máxima respuesta es mayor que esta respuesta horizontal promedio, variando la relación entre estas según el periodo. La dirección máxima se adopta en las normativas para su uso en el diseño sísmico en lugar de la consideración explícita de los efectos de direccionalidad.),

la máxima respuesta se puede calcular al multiplicar todas las aceleraciones que se han obtenido mediante la media geométrica sin rotar, por 1.1 esto se realiza cuando los periodos son ≤ 0.2 segundos y se multiplica por 1.3 cuando los periodos son ≥ 1.0 segundos, con estos valores se realiza la interpolación para periodos comprendidos entre 0.2 y 1.0 segundo. Se tiene que tener en consideración que estos factores para hallar la máxima respuesta en el plano horizontal no se podría aplicar a otros países de distintas características de Estados Unidos, puesto que los valores no serán los más convenientes ni representativos para los demás países considerando que los distintos mecanismos que forjan los movimientos sísmicos

El RotD100 se calculan de una forma casi idéntico al descrito en Boore et al. (2006), salvo que las medias geométricas no se calculan. Las dos componentes horizontales se combinan en una sola serie temporal correspondiente a un acimut dado por un incremento del ángulo de rotación.

$$a_{ROT}(t; \theta) = a_1(t) \cos(\theta) + a_2(t) \sin(\theta) \dots \dots \dots (68)$$

donde

a_1 y a_2 : componentes horizontales registradas en la serie de tiempo de la aceleración.

θ : ángulo de rotación

$a_{ROT}(t; \theta)$: espectro de respuesta

Se calcula θ y el proceso se repite para un rango de 0° a un incremento de ángulo de rotación menos de 180° .

RotD100 y la orientación de la dirección máxima se calculan utilizando las ecuaciones (69) y (70). Alternativamente, RotD100 se puede determinar utilizando las ecuaciones (71) y (72) combinando primero las dos respuestas horizontales registradas en la serie de tiempo única $u(t, \theta)$ asociada con un acimut y luego rotando 180° paso a paso. Sin embargo, el cálculo con las ecuaciones (69) y (70) es significativamente más rápido que con (71) y (72).

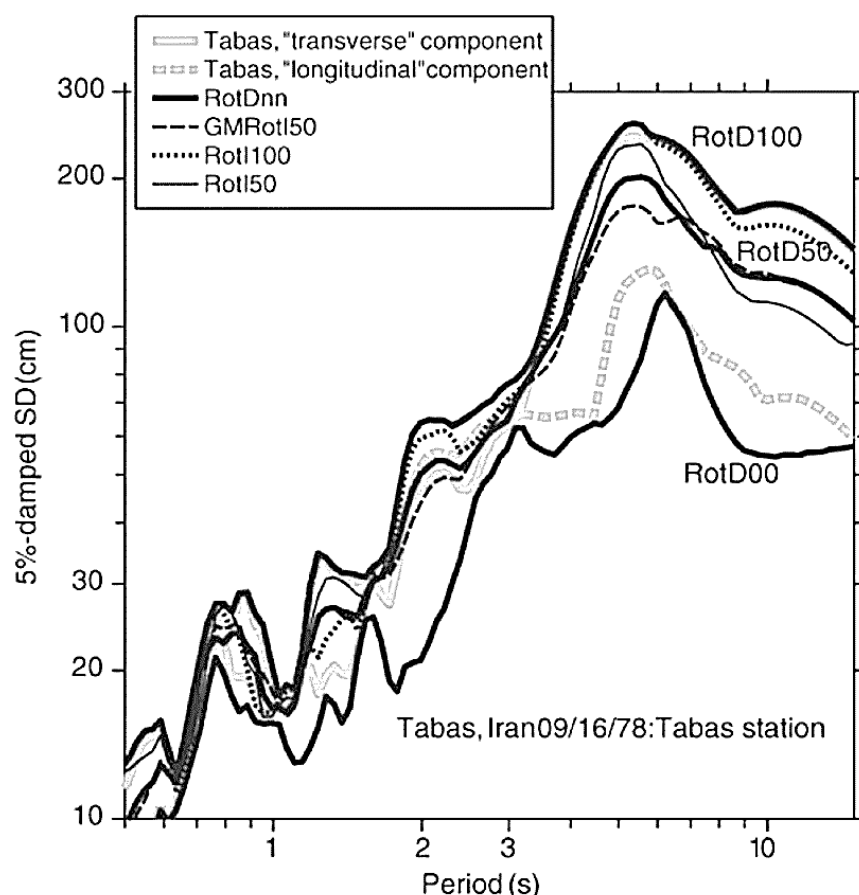
$$RotD100 = \max(\sqrt{u_x(t)^2 + u_y(t)^2}) \dots \dots \dots (69)$$

$$\theta_{RotD100} = \text{atan}\left(\frac{u_y(t_{max})}{u_x(t_{max})}\right) \dots \dots \dots (70)$$

$$u(t, \theta) = u_x(t) \cdot \cos(\theta) + u_y(t) \cdot \sin(\theta) \dots \dots \dots (71)$$

$$RotD100 = \max|u(t, \theta)| \dots \dots \dots (72)$$

Figura 25. componentes horizontales del terremoto de Tabas de 1978 en la estación de Tabas. RotI50 es casi igual a RotD100 para periodos de 1,7 a 3,3 seg.



Fuente: (Boore et al., 2006, p.1831).

2.3. Definición de términos básicos

Acelerograma: Es una representación temporal de la aceleración que experimenta el suelo en un determinado punto durante un terremoto. Los valores de la aceleración se obtienen mediante unos instrumentos llamados acelerógrafos, que registran la aceleración del suelo según tres direcciones perpendiculares; dos horizontales y una vertical. siendo los registros de las componentes horizontales los más representativos para el estudio de la ingeniería sísmica. Estas componentes se combinan para formar un único espectro de respuesta.

Acelerógrafo: Instrumento que registra la aceleración del suelo durante un terremoto.

Grados de libertad (GL): Es definido como el número de desplazamientos independientes requerido para definir las posiciones desplazadas de todas las masas

relativas a sus posiciones originales. Un grado de libertad corresponde a cualquier movimiento posible de los nodos de los elementos en una dirección no restringida.

Grados de libertad dinámicos (GLD): Son los grados de libertad que tienen asociada masa y para los cuales puede conocerse las vibraciones o movimientos a lo largo del tiempo.

Ondas sísmicas: Son vibraciones que se propagan a través de la corteza terrestre causadas por la repentina liberación de energía en el foco. Se pueden clasificar en ondas de cuerpo (P y S) y superficiales (Love y Rayleigh). Las primeras se transmiten en el interior de la tierra, en todas direcciones.

Periodo de vibración: Se define como el intervalo de tiempo necesario para que el sistema efectúe un ciclo completo de movimiento.

Sismo: Es una sacudida del terreno que se produce debido al choque de las placas tectónicas y a la liberación de energía en el curso de una reorganización brusca de materiales de la corteza terrestre.

Vibración: Es la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio.

Espectro de respuesta: Los espectros de respuestas, definidos brevemente, son diagramas que representan la respuesta máxima (de aceleración, velocidad, desplazamiento u otra magnitud de interés) a una excitación dada. En el eje de las abscisas, contienen la frecuencia o el periodo fundamental del sistema y en el eje de las ordenadas, la respuesta máxima.

Direccionalidad: La intensidad de movimiento del suelo dentro de un plano horizontal, varía con los cambios de orientación.

Respuesta espectral: es el movimiento de la masa en un instante de tiempo sometida a una excitación sísmica.

Suelo flexible: son los suelos que tienen la capacidad de deformarse bajo la acción de una carga y volver a su estado original al retiro de la carga, también tienen la capacidad de absorber y reducir impactos.

.

CAPITULO III MATERIALES Y METODOS.

3.1. Ubicación del proyecto

3.1.1. Ubicación política

- País: Perú
- Región: Cajamarca
- Provincia: Cajamarca
- Distrito: Cajamarca

3.2. Recursos, equipos, materiales y herramientas utilizados en la investigación

3.2.1. Recursos humanos

- Bachiller
- Asesor

3.2.2. Equipos

- Computadora (hardware)
- Fotocopiadora
- Impresora.
- Memoria USB.

3.2.3. Softwares

- Microsoft Word
- Microsoft Excel
- SOF.I.P.S.Signal

3.3. Tipo, nivel, diseño y método de investigación

El nivel de investigación empieza en el aspecto descriptivo. Asimismo, el Espectro de diseño sísmico se ajusta a una investigación no experimental ya que no se manipulan las variables de espectros de respuesta de aceleración para distintas definiciones de la componente horizontal del movimiento y finalmente un nivel Correlacional.

Tabla 13. Tipo de Investigación.

Criterio	Investigación
Finalidad	Aplicada
Estrategia o enfoque teórico metodológico	Cuantitativo
Objetivos	Descriptiva
Fuente de datos	Mixta
Control de diseño de la prueba	No experimental
Temporalidad	Transversal

3.4. Población de estudio

La población de la presente investigación son acelerógrafos (Registros Sísmicos) en el Perú

3.5. Muestra

La muestra para la presente investigación son los dos acelerógrafos, el primero ubicados en la Universidad Nacional de Cajamarca y el segundo ubicado del Colegio de Ingenieros del Perú – Consejo Departamental de Cajamarca.

3.6. Unidad de análisis

La unidad de análisis se considera a los registros sísmicos.

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Datos secundarios: son información que ya ha sido recolectada y publicada por fuentes confiables. Estos datos pueden provenir de estudios previos, informes gubernamentales, bases de datos en línea y otras fuentes accesibles al público.

La base de datos se obtuvo de:

3.7.1. Acelerógrafo UNC-Cajamarca:

El Acelerógrafo es de la marca TRIMBLE REFTEK registrador modelo 130-SMA; el cual tiene como característica principal el uso del protocolo de comunicación Ethernet para el envío de la información. El acelerógrafo 130-SMA además cuenta con una batería interna de 48 horas de duración, lo cual es muy conveniente en zonas donde el suministro eléctrico es inestable.

Tabla 14. Datos del Acelerógrafo – UNC CAJAMARCA

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN
Código	D921
Nombre	UNC-CAJAMARCA
Ubicación	Cajamarca-Cajamarca-Cajamarca
Altura	2691.00 msnm
Latitud Sur	-7.167°
Longitud Oeste	-78.495°
Orientación	V – EO - NS
Instituciones	UNC, UPG-FIC-UNI
Asiento	LIMO – ARCILLOSO

- **Servidor:** En el servidor modelo PROLIANT DL380 G9 se encuentran instalados los softwares para el manejo de los registradores acelerométricos sísmicos marca Trimble Reftek, modelo 130- SMA: RT VIEW, RT_DISPLAY y RTCC.
- Para el protocolo de comunicación Ethernet, el CTIC ha proporcionado a la Unidad de Posgrado una IP Pública para el servidor y ha habilitado aproximadamente diez puertos de comunicación.

Por lo cual para la instalación y conexión de los registradores acelerométricos en diferentes localidades y para cumplir con los protocolos de comunicación, se configuraron estos equipos con el número IP del servidor y con los puertos habilitados.

3.7.2. Acelerógrafo CIP- Cajamarca:

Tabla 15. Datos Acelerógrafo CIP-CAJAMARCA

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN
Código	C131
Nombre	CIP-CAJAMARCA
Ubicación	Cajamarca-Cajamarca-Cajamarca
Altura	2747.00msnm
Latitud Sur	-7.174°
Longitud Oeste	-78.509°
Orientación	V – EO - NS
Instituciones	UNC, UPG-FIC-UNI
Asiento	GRAVA – ARCILLOSO

3.8. Técnicas de procesamiento de datos.

Para el presente trabajo es necesario la aplicación de programas informáticos como:

- SOF.I.P.S.Signal: Programa elaborado por el ingeniero ARNOLD RAMSEY MENDO RODRIGUEZ.
- Microsoft Excel 2019: Sirve para obtener los resultados de las señales sísmicas procesadas por el programa SOF.I.P.S.Signal.

3.9. Procedimiento Metodológico

3.9.1. Cálculo del Espectro Según Norma E 030

Para la ciudad que se realizó esta investigación es la ciudad Cajamarca, Distrito, Provincia y Departamento de Cajamarca

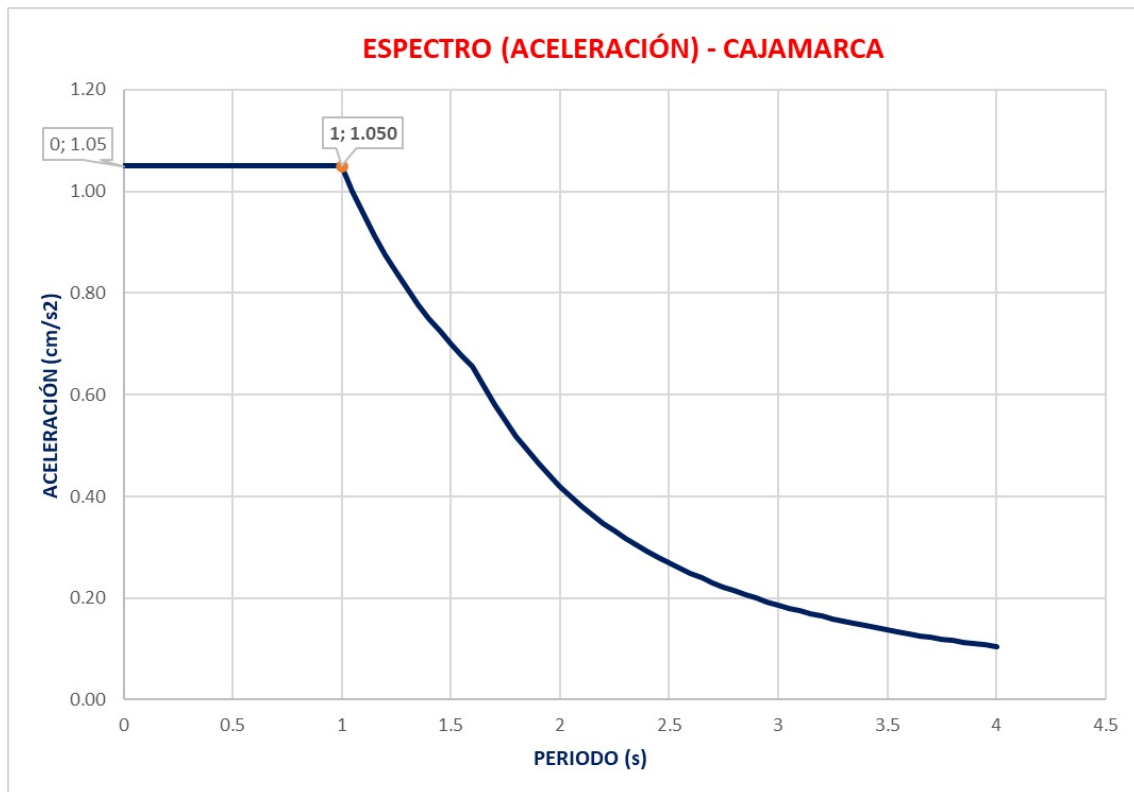
Para el cálculo del espectro según la norma E 030 para la ciudad de Cajamarca tiene los siguientes datos

Tabla 16. Datos Generales de Diseño Espectro E030

Datos Generales de Diseño		
Ubicación	Departamento	Cajamarca
	Zona Sísmica	Z3
	Factor de Zona	0.35
	Edificación	Uso General
Tipo de edificación	Categoría de la Edificación	C
	Factor de Uso (U)	1.00
Sistema Estructural	Albañilería Armada o Confinada	
	R =	1.00
Ductilidad global	Ia =	1.00
	Ip =	1.00
Configuración estructural: Regular	Coeficiente de Reducción (R)	1.00
Tipo de suelo: blandos (S3)	S3	1.20
	Tp	1.00
	TL	1.60

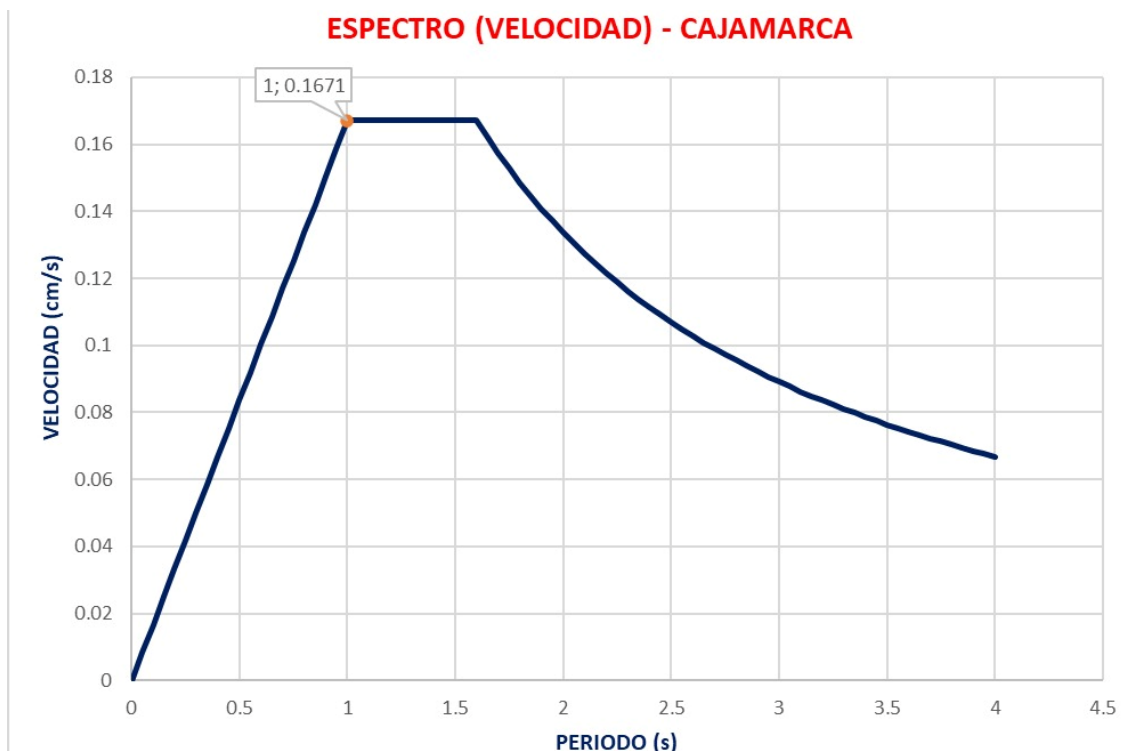
3.9.1.1. Espectro de la Aceleración

Figura 26. Espectro de la Aceleración para la ciudad de Cajamarca



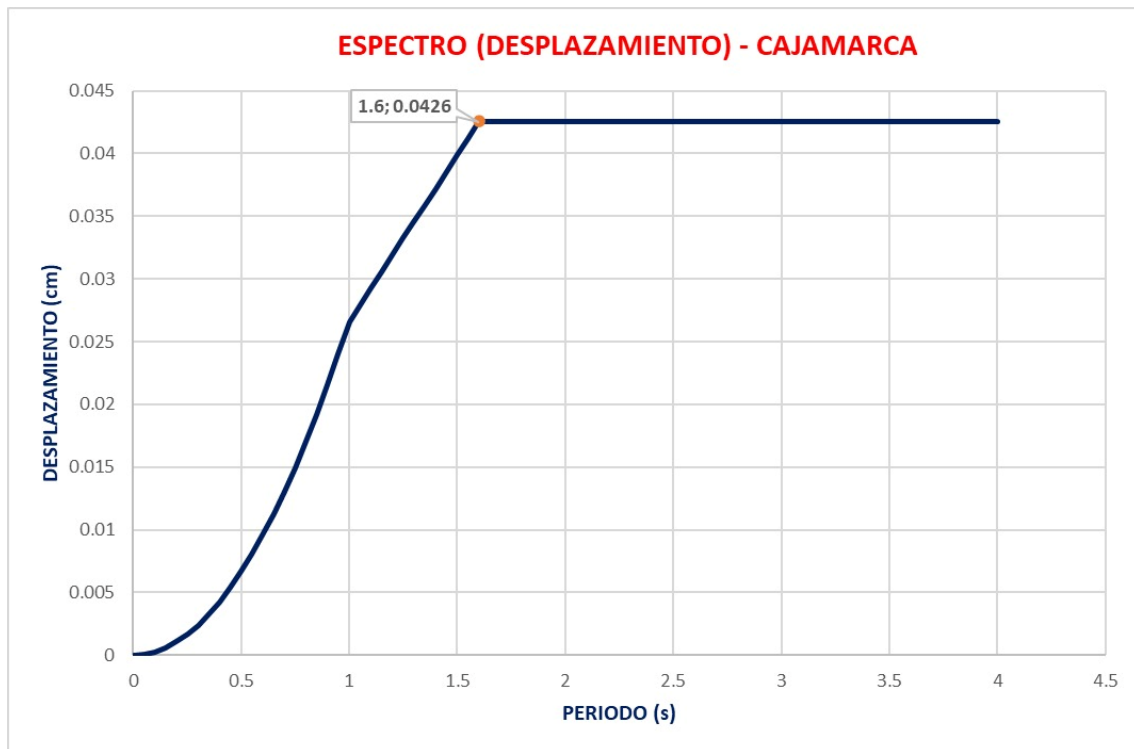
3.9.1.2. Espectro de la Velocidad

Figura 27. Espectro de la Velocidad para la ciudad de Cajamarca



3.9.1.3. Espectro del Desplazamiento

Figura 28. Espectro del Desplazamiento para la ciudad de Cajamarca



3.9.2. Obtención de la Base de datos

La recopilación de los registros de las señales sísmicas se realizó mediante la página del CISMID (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres), para la ciudad de Cajamarca. Se obtuvieron los datos de dos acelerógrafos: el primero ubicado en la UNC Cajamarca y el segundo en CIP-Cajamarca.

3.9.3. Selección de la Base de Datos

Una vez definida la base de datos de la página del CISMID (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres) solo se seleccionó los sismos de magnitud 4, 5 y 7

- **Acelerógrafo Ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA:** Se cuenta con una base inicial de 41 Registros Sísmicos desde el 26 de mayo de 2019 al 6 de diciembre del 2021.

Tabla 17. Registros Sísmicos Acelerógrafo UNC Cajamarca

N°	Nombre de la Estación	Fecha (d-m-a)	Hora (h:min:s)	Magnitud (Mw)	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (Km)
1	UNC	21-11-2020	02:52:24	4.0	-7.26	-80.33	46.0
2	UNC	02-07-2021	15:17:03	4.0	-6.23	-80.72	35.0
3	UNC	30-06-2021	22:23:30	4.1	-5.31	-78.8	26.0
4	UNC	05-12-2021	08:59:54	4.1	-6.47	-79.94	61.0
5	UNC	01-12-2021	22:56:53	4.2	-8.14	-80.08	34.0
6	UNC	17-08-2021	18:59:34	4.3	-4.88	-80.79	35.0
7	UNC	11-08-2021	17:09:44	4.3	-4.83	-80.87	42.0
8	UNC	01-01-2021	13:15:39	4.4	-8.25	-79.78	30.0
9	UNC	23-09-2021	04:06:03	4.4	-7.07	-80.78	30.0
10	UNC	30-07-2021	20:14:08	4.4	-4.9	-80.79	33.0
11	UNC	25-09-2020	12:59:51	4.5	-8.85	-79.95	22.0
12	UNC	05-11-2021	23:19:47	4.5	-5.97	-81.72	32.0
13	UNC	23-04-2021	01:20:43	4.5	-10.35	-78.79	35.0
14	UNC	09-05-2021	03:14:16	4.5	-8.65	-79.17	46.0
15	UNC	29-07-2021	00:54:12	4.6	-8.49	-79.92	41.0
16	UNC	04-12-2021	11:41:27	4.6	-5.79	-77.43	146.0
17	UNC	09-05-2020	04:27:38	4.7	-5.67	-76.79	39.0
18	UNC	08-11-2020	10:46:30	4.7	-5.7191	-76.6854	45.08
19	UNC	21-02-2020	06:44:46	4.8	-9.1	-79.36	23.0
20	UNC	24-06-2020	15:40:15	4.8	-1.82	-77.9	180.0
21	UNC	06-04-2021	19:36:16	4.8	-5.6896	-80.7383	10.0
22	UNC	08-05-2021	19:42:07	4.8	-8.75	-79.86	31.0
23	UNC	16-08-2021	06:50:00	4.8	-4.93	-80.78	34.0

Nº	Nombre de la Estación	Fecha (d-m-a)	Hora (h:min:s)	Magnitud (M)	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (Km)
24	UNC	25-07-2020	21:16:12	4.9	-3.44	-81.03	5.0
25	UNC	23-03-2021	06:42:57	4.9	-9.78	-78.83	45.0
26	UNC	04-12-2021	11:41:13	5.0	-7.11	-76.9	110.0
27	UNC	29-07-2021	00:46:07	5.1	-8.47	-79.99	43.0
28	UNC	26-11-2020	21:48:35	5.1	-6.58	-75.93	117.0
29	UNC	09-02-2021	01:40:57	5.2	-5.44	-77.5	20.0
30	UNC	21-07-2021	15:07:31	5.2	-5.18	-79.22	25.0
31	UNC	16-07-2021	20:42:44	5.2	-3.4	-77.3	38.0
32	UNC	06-12-2021	06:30:51	5.3	-2.83	-77.4	6.0
33	UNC	09-03-2021	19:16:30	5.4	-8.87	-75.94	132.0
34	UNC	25-08-2020	05:18:04	5.5	-3.94	-81.34	45.0
35	UNC	07-05-2020	00:49:10	5.7	-5.66	-76.81	34.0
36	UNC	29-07-2021	00:32:15	5.7	-8.3413	-79.8947	31.32
37	UNC	15-08-2021	05:40:01	5.7	-3.68	-77.23	121.0
38	UNC	23-06-2021	02:54:18	5.8	-12.77	-76.91	32.0
39	UNC	07-06-2020	10:31:18	5.9	-4.34	-77.39	126.0
40	UNC	28-11-2021	10:52:14	7.4	-4.5	-76.7	99.0
41	UNC	26-05-2019	07:41:12	7.5	-5.7	-75.27	141.0

Fuente: Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID)

- **Acelerógrafo Ubicado en el Colegio de Ingenieros del Perú – Consejo Departamental de Cajamarca:** Se cuenta con una base inicial de 45 Registros Sísmicos del 26 de mayo de 2019 al 6 de diciembre del 2021

Tabla 18. Registros Sísmicos Acelerógrafo CIP-Cajamarca

Nº	Nombre de la Estación	Fecha (d-m-a)	Hora (h:min:s)	Magnitud (Mw)	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (Km)
1	CIP Cajamarca	27-05-2021	18:42:02	4.0	-9.42	-79.21	20.0
2	CIP Cajamarca	27-05-2021	06:56:15	4.0	-9.21	-75.73	24.0
3	CIP Cajamarca	02-07-2021	15:17:03	4.0	-6.23	-80.72	35.0
4	CIP Cajamarca	06-03-2021	10:54:58	4.0	-7.55	-79.91	36.0
5	CIP Cajamarca	30-06-2021	22:23:30	4.1	-5.31	-78.8	26.0
6	CIP Cajamarca	25-08-2021	02:45:09	4.1	-4.91	-80.83	29.0
7	CIP Cajamarca	05-12-2021	08:59:54	4.1	-6.47	-79.94	61.0
8	CIP Cajamarca	01-12-2021	22:56:53	4.2	-8.14	-80.08	34.0
9	CIP Cajamarca	21-05-2021	18:00:10	4.2	-6.0	-81.0	36.0
10	CIP Cajamarca	24-03-2021	10:39:42	4.2	-11.02	-78.13	37.0
11	CIP Cajamarca	24-05-2021	08:09:45	4.2	-8.69	-79.48	38.0
12	CIP Cajamarca	01-08-2021	07:07:12	4.3	-4.92	-80.81	34.0
13	CIP Cajamarca	01-01-2021	13:15:39	4.4	-8.25	-79.78	30.0
14	CIP Cajamarca	05-11-2021	23:19:47	4.5	-5.97	-81.72	32.0
15	CIP Cajamarca	23-04-2021	01:20:43	4.5	-10.35	-78.79	35.0
16	CIP Cajamarca	09-05-2021	03:14:16	4.5	-8.65	-79.17	46.0
17	CIP Cajamarca	25-09-2020	12:59:51	4.5	-8.85	-79.95	22.0
18	CIP Cajamarca	05-05-2021	07:47:12	4.5	-8.11	-74.65	136.0
19	CIP Cajamarca	15-02-2021	10:32:42	4.6	-8.65	-80.72	35.0
20	CIP Cajamarca	29-07-2021	00:54:12	4.6	-8.49	-79.92	41.0
21	CIP Cajamarca	08-11-2020	10:46:03	4.7	-5.7191	-76.6854	45.08
22	CIP Cajamarca	09-05-2020	04:27:38	4.7	-5.67	-76.79	39.0
23	CIP Cajamarca	19-09-2021	12:23:16	4.8	-3.08	-78.46	5.0

Nº	Nombre de la Estación	Fecha (d-m-a)	Hora (h:min:s)	Magnitud (Mw)	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (Km)
24	CIP Cajamarca	06-04-2021	19:36:16	4.8	-5.6896	-80.7383	10.0
25	CIP Cajamarca	21-02-2020	06:44:46	4.8	-9.1	-79.36	23.0
26	CIP Cajamarca	08-05-2021	19:42:07	4.8	-8.75	-79.86	31.0
27	CIP Cajamarca	16-08-2021	06:50:00	4.8	-4.93	-80.78	34.0
28	CIP Cajamarca	22-05-2021	19:45:12	4.8	-3.91	-77.52	107.0
29	CIP Cajamarca	23-03-2021	06:42:57	4.9	-9.78	-78.83	45.0
30	CIP Cajamarca	29-07-2021	00:46:07	5.1	-8.47	-79.99	43.0
31	CIP Cajamarca	26-11-2021	21:48:35	5.1	-6.58	-75.93	117.0
32	CIP Cajamarca	09-02-2021	01:40:57	5.2	-5.44	-77.5	20.0
33	CIP Cajamarca	21-07-2021	15:07:31	5.2	-5.18	-79.22	25.0
34	CIP Cajamarca	16-07-2021	20:42:44	5.2	-3.4	-77.3	38.0
35	CIP Cajamarca	23-9-2021	04:06:03	5.2	-7.07	-80.78	33.0
36	CIP Cajamarca	06-12-2021	06:30:51	5.3	-2.83	-77.4	6.0
37	CIP Cajamarca	09-03-2021	19:16:30	5.4	-8.87	-75.94	132.0
38	CIP Cajamarca	25-08-2020	05:18:04	5.5	-3.94	-81.34	45.0
39	CIP Cajamarca	07-05-2020	00:49:10	5.7	-5.66	-76.81	34.0
40	CIP Cajamarca	29-07-2021	00:32:15	5.7	-8.3413	-79.8947	31.32
41	CIP Cajamarca	15-08-2021	05:40:01	5.7	-3.68	-77.23	121.0
42	CIP Cajamarca	23-06-2021	02:54:18	5.8	-12.77	-76.91	32.0
43	CIP Cajamarca	07-06-2020	10:31:18	5.9	-4.34	-77.39	126.0
44	CIP Cajamarca	28-11-2021	10:52:14	7.4	-4.5	-76.7	99.0
45	CIP Cajamarca	26-05-2019	07:41:12	7.5	-5.7	-75.27	141.0

Fuente: Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID)

3.9.4. Procesamiento de la Base datos

La Direccionalidad es el cálculo de las medidas analíticas independientes de la orientación que tenga el registro de la aceleración. La GMRotDpp (GM: Media Geométrica, Rot: Rotación, D: Dependiente, pp: percentil) y GMRotIpp (GM: Media Geométrica, Rot: Rotación, I: Independiente, pp: percentil) se origina de la GM (Media Geométrica) de los espectros de respuesta para todos los ángulos no redundantes.

3.9.4.1. Media Geométrica (GM) de Espectro de Respuesta.

A continuación, se presenta la fórmula para el cálculo de la Media Geométrica (GM):

$$GM = \sqrt{RS(H_1) * RS(H_2)} \dots\dots\dots (62)$$

Donde:

$RS(H_1)$ = Respuesta espectral calculada para una componente horizontal.

$RS(H_2)$ = Respuesta espectral calculada para la componente horizontal ortogonal a H_1

3.9.4.2. GMRotDpp (GM: Media Geométrica, Rot: Rotación, D: Dependiente, pp: percentil).

Para obtener el GMRotDpp (GM: Media Geométrica, Rot: Rotación, D: Dependiente, pp: percentil), para cada oscilador, se define un ángulo correspondiente al percentil deseado, se ordena de forma creciente los valores obtenidos para cada rotación, lo cual no se puede definir un solo ángulo valido para todos los periodos, por lo cual depende del período.

Para poder hallar el GMRotDpp (GM: Media Geométrica, Rot: Rotación, D: Dependiente, pp: percentil) se utilizó el programa (SignalProcess) elaborado por el ingeniero **Arnold Ramsey Mendo Rodríguez**.

A continuación, se presenta los pasos para calcular el GMRotDpp:

Paso 1. A cada una de las componentes horizontales de aceleraciones se las nombra $Osc_1(t, \eta, 0)$ y $Osc_2(t, \eta, 0)$, donde “Osc” es el Oscilador, “t” es el tiempo de registro, “ η ” es el porcentaje de amortiguamiento crítico de estudio y “0” indica el ángulo de rotación original del registro.

Paso 2. Establecer el ángulo de rotación θ de partida.

Paso 3. Definir los acelerogramas de las componentes horizontales con sus aceleraciones y el tiempo en que estas ocurren, luego utilizar las combinaciones lineales para girar estos registros sísmicos en función de un ángulo de rotación θ . Las ecuaciones que precisan estas combinaciones lineales son:

$$Osc_1(t, \theta) = Osc_1(t, 0) * \cos(\theta) + Osc_2(t, 0) * \sin(\theta) \dots \dots \dots (63)$$

$$Osc_2(t, \theta) = -Osc_1(t, 0) * \sin(\theta) + Osc_2(t, 0) * \cos(\theta) \dots \dots \dots (64)$$

Donde por simplicidad de notación se elimina “ η ”, puesto que en todos los casos se emplea el mismo valor de fracción de amortiguamiento ζ .

Paso 4. Calcular las respuestas espectrales de cada componente horizontal para un conjunto de períodos y para un ángulo de rotación en específico.

Paso 5. Calcular la media geométrica como se muestra en la ecuación (62), luego almacenar estos valores en una matriz que estará en función del ángulo rotacional y del período para un valor constante de amortiguamiento (GM (θ, T_i)).

Paso 6. Incrementar el ángulo de rotación θ en $\Delta\theta$ (Se recomienda que $\Delta\theta = 1^\circ$ es suficiente para la precisión del método).

Paso 7. Repetir los pasos del 3 al 5 hasta que el ángulo de rotación sea igual a 90° .

Paso 8. “Clasificar el conjunto correspondiente de GM (θ, T_i) para todos los valores de θ y un valor fijo de T_i , de menor a mayor valor” (Boore et al., 2006, p.1506).

Paso 9. Establecer GMRotDpp en el valor de GM correspondiente al valor del percentil deseado para cada período T_i . El percentil más utilizado es el 50 (para un conjunto de rotaciones de 0 a 90° con un $\Delta\theta = 1^\circ$, el valor del percentil 50 se calcula como el promedio de los valores entre los ángulos 45 y 46). Debido a la periodicidad del ángulo de 90° , GMRotDpp será independiente de la orientación original del acelerógrafo (Boore et al., 2006, p.1506).

3.9.4.3. **GMRotIpp (GM: Media Geométrica, Rot: Rotación, I: Independiente, pp: percentil)**

Para obtener el GMRotIpp (GM: Media Geométrica, Rot: Rotación, I: Independiente, pp: percentil) necesitas el cálculo del GMRotDpp (GM: Media

Geométrica, Rot: Rotación, D: Dependiente, pp: percentil), lo cual corresponde a un solo ángulo de rotación que es independiente del periodo.

Para poder hallar el GMRotIpp (GM: Media Geométrica, Rot: Rotación, I: Independiente, pp: percentil) se utilizó el programa (SignalProcess) elaborado por el ingeniero **Arnold Ramsey Mendo Rodríguez**.

A continuación, se presenta los pasos para calcular el GMRotIpp:

Paso 1. Calcular el GMRotDpp para un rango de períodos (donde la frecuencia más baja es controlada por el procesamiento requerido para eliminar el ruido de largo período).

Paso 2. “Para cada período, se normaliza el conjunto de medias geométricas para todos los ángulos de rotación con respecto a GMRotDpp”(Boore et al., 2006, p.1507).

$$\frac{GM(\theta, T_i)}{GMRotDpp(T_i)} \dots\dots\dots (73)$$

Paso 3. Calcule la función de penalización o de error definida por la ecuación:

$$penalty(\theta) = \frac{1}{N_{per}} \sum_{i=1}^h \left[\frac{GM(\theta, T_i)}{GMRotDpp(T_i)} - 1 \right]^2 \dots\dots\dots (74)$$

Donde el rango de períodos se extiende de T_1 a T_h , $GM(\theta, T_i)$ es la media geométrica del espectro de respuesta para el período T_i calculado para el ángulo de rotación θ y $GMRotDpp(T_i)$ es el valor del percentil de $GM(\theta, T_i)$ sobre todos los ángulos no redundantes, como se definió previamente (Boore et al., 2006, p.1507).

Paso 4. Se encuentra el ángulo de rotación correspondiente al mínimo valor de la función $penalty(\theta_{min})$.

Paso 5. Gire los movimientos registrados en este ángulo.

Paso 6. Finalmente, como en el cálculo de GMRotDpp ya se obtuvieron los espectros de repuesta para el rango de rotaciones en estudio, se selecciona el espectro de respuesta correspondiente al ángulo mínimo de la función $penalty(\theta_{min})$. Este espectro de respuesta se le denomina GMRotIpp, donde la “I” significa que el ángulo de rotación es independiente del período.

3.9.4.4. Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS)

A continuación, se presenta la fórmula para el cálculo de la Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS):

$$SRSS = \sqrt{R_{x\max}^2 + R_{y\max}^2} \dots\dots\dots (67)$$

3.9.4.5. Respuesta Máxima en el Plano Horizontal (RotD100)

El RotD100 se calculan de una forma casi idéntico al descrito en Boore et al. (2006), salvo que las medias geométricas no se calculan. Las dos componentes horizontales se combinan en una sola serie temporal correspondiente a un acimut dado por un incremento del ángulo de rotación.

$$a_{ROT}(t; \theta) = a_1(t) \cos(\theta) + a_2(t) \sin(\theta) \dots\dots\dots (68)$$

donde

a_1 y a_2 : componentes horizontales registradas en la serie de tiempo de la aceleración.

θ : ángulo de rotación

$a_{ROT}(t; \theta)$: espectro de respuesta

Se calcula θ y el proceso se repite para un rango de 0° a un incremento de ángulo de rotación menos de 180° .

RotD100 y la orientación de la dirección máxima se calculan utilizando las ecuaciones (69) y (70). Alternativamente, RotD100 se puede determinar utilizando las ecuaciones (71) y (72) combinando primero las dos respuestas horizontales registradas en la serie de tiempo única $u(t, \theta)$ asociada con un acimut y luego rotando 180° paso a paso. Sin embargo, el cálculo con las ecuaciones (69) y (70) es significativamente más rápido que con (71) y (72).

$$RotD100 = \max(\sqrt{u_x(t)^2 + u_y(t)^2}) \dots\dots\dots (69)$$

$$\theta_{RotD100} = \text{atan}\left(\frac{u_y(t_{\max})}{u_x(t_{\max})}\right) \dots\dots\dots (70)$$

$$u(t, \theta) = u_x(t) \cdot \cos(\theta) + u_y(t) \cdot \sin(\theta) \dots\dots\dots (71)$$

$$RotD100 = \max|u(t, \theta)| \dots\dots\dots (72)$$

3.9.5. Presentación de resultados.

3.9.5.1. Acelerógrafo UNC Cajamarca

a) Aceleración

- Media Geométrica (GM)

Tabla 19. GM de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.66	1.0489
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.6	1.3987
Percentil 16	0.6	0.699
Señal 38 (Mw=5.8)	0.65	1.807
Escala	0.6095	

- GMRotDpp

Tabla 20. GMRotD00 de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.6	0.9813
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.6	1.3143
Percentil 16	0.6	0.6483
Señal 38 (Mw=5.8)	0.6	1.7383
Escala	0.6095	

Tabla 21. GMRotD50 de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.6	1.4207
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.6	1.4207
Percentil 16	0.6	0.7035
Señal 38 (Mw=5.8)	0.6	1.8619
Escala	0.6095	

Tabla 22. GMRotD100 de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.6	1.1113
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.6	1.4848
Percentil 16	0.6	0.7377
Señal 38 (Mw=5.8)	0.65	1.807
Escala	0.6095	

- GMRotIpp

Tabla 23. GMRotI50 de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.6	1.0683
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.6	1.4449
Percentil 16	0.6	0.6916
Señal 38 (Mw=5.8)	0.6	1.9783
Escala	0.6095	

- Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados

Tabla 24. SRSS de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.6	1.5166
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.6	2.0251
Percentil 16	0.6	1.0081
Señal 38 (Mw=5.8)	0.65	2.5621
Escala	0.6095	

- Respuesta Máxima en el Plano Horizontal

Tabla 25. RotD100 de la aceleración del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.6	1.2925
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.6	1.7484
Percentil 16	0.6	0.8366
Señal 38 (Mw=5.8)	0.6	2.1686
Escala	0.6095	

b) Velocidad

- Media Geométrica (GM)

Tabla 26. GM de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	1.05	0.109
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	2.2	0.1684
Percentil 16	0.65	0.0693
Señal 40 (Mw=7.4)	1.75	0.2879
Escala	0.0193	

- GMRotDpp

Tabla 27. GMRotD00 de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	1.1	0.1008
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	1.8	0.1511
Percentil 16	0.65	0.0633
Señal 40 (Mw=7.4)	1.8	0.2667
Escala	0.0193	

Tabla 28. GMRotD50 de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	1	0.1099
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	2.2	0.1662
Percentil 16	0.65	0.0703
Señal 40 (Mw=7.4)	1.75	0.2813
Escala	0.0193	

Tabla 29. GMRotD100 de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	1	0.1157
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	2.15	0.1768
Percentil 16	0.65	0.0745
Señal 40 (Mw=7.4)	1.75	0.2902
Escala	0.0193	

- GMRotIpp

Tabla 30. GMRotI50 de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	1	0.1111
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	2.2	0.1696
Percentil 16	0.65	0.0696
Señal 40 (Mw=7.4)	1.75	0.2828
Escala	0.0193	

- Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados

Tabla 31. SRSS de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	1.05	0.1578
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	2.2	0.2464
Percentil 16	0.65	0.1005
Señal 40 (Mw=7.4)	1.75	0.4181
Escala	0.0193	

- Respuesta Máxima en el Plano Horizontal

Tabla 32. RotD100 de la Velocidad del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	1	0.1333
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	1.8	0.2143
Percentil 16	0.65	0.0849
Señal 40 (Mw=7.4)	1.75	0.3414
Escala	0.0193	

c) Desplazamiento

- Media Geométrica (GM)

Tabla 33. GM del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	2.2	0.0284
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	2.25	0.0528
Percentil 16	0.95	0.0085
Señal 40 (Mw=7.4)	2.2	0.091
Escala	0.0193	

- GMRotDpp

Tabla 34. GMRotD00 del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	2.2	0.0252
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	2.2	0.0465
Percentil 16	1.1	0.0078
Señal 40 (Mw=7.4)	2.6	0.0801
Escala	0.0193	

Tabla 35. GMRotD50 del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	2.2	0.0281
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	2.2	0.0521
Percentil 16	1.1	0.0086
Señal 40 (Mw=7.4)	2.6	0.0872
Escala	0.0193	

Tabla 36. GMRotD100 del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	2.2	0.0301
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	2.2	0.056
Percentil 16	1.1	0.0091
Señal 40 (Mw=7.4)	2.2	0.0912
Escala	0.0193	

- GMRotIpp

Tabla 37. GMRotI50 del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	2.15	0.0282
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	2.2	0.052
Percentil 16	0.95	0.0086
Señal 40 (Mw=7.4)	2.65	0.0897
Escala	0.0193	

- Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados

Tabla 38. SRSS del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	2.2	0.0416
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	2.25	0.0776
Percentil 16	0.95	0.0121
Señal 40 (Mw=7.4)	2.25	0.1301
Escala	0.0193	

- Respuesta Máxima en el Plano Horizontal

Tabla 39. RotD100 del desplazamiento del Acelerógrafo UNC Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	2.2	0.0351
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	2.25	0.0657
Percentil 16	1.15	0.0102
Señal 40 (Mw=7.4)	2.3	0.1081
Escala	0.0193	

3.9.5.2. Acelerógrafo CIP Cajamarca

a) Aceleración

- Media Geométrica (GM)

Tabla 40. GM de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.25	0.8932
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.25	1.2852
Percentil 16	0.25	0.5012
Señal 31 (Mw=5.1)	0.4	1.784
Escala	0.7912	

- GMRotDpp

Tabla 41. GMRotD00 de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.25	0.8131
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.4	1.2344
Percentil 16	0.25	0.4604
Señal 31 (Mw=5.1)	0.4	1.772
Escala	0.7912	

Tabla 42. GMRotD50 de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.25	0.8887
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.4	1.3283
Percentil 16	0.25	0.4994
Señal 31 (Mw=5.1)	0.4	1.9237
Escala	0.7912	

Tabla 43. GMRotD100 de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.25	0.9383
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.25	1.3554
Percentil 16	0.25	0.5212
Señal 31 (Mw=5.1)	0.4	1.984
Escala	0.7912	

- GMRotIpp

Tabla 44. GMRotIpp de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.25	0.8865
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.4	1.3425
Percentil 16	0.25	0.5015
Señal 31 (Mw=5.1)	0.4	1.9623
Escala	0.7912	

- Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados

Tabla 45. SRSS de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.25	1.2452
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.4	1.8319
Percentil 16	0.25	0.66
Señal 31 (Mw=5.1)	0.4	2.7926
Escala	0.7912	

- Respuesta Máxima en el Plano Horizontal

Tabla 46. RotD100 de la aceleración del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	ACELERACIÓN (cm/s ²)
Promedio	0.25	1.0384
Espectro	1	1.05
Percentil 84	0.1	1.5622
Percentil 16	0.25	0.5259
Señal 31 (Mw=5.1)	0.4	2.6779
Escala	0.7912	

b) Velocidad

- Media Geométrica (GM)

Tabla 47. GM de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	1.05	0.0697
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	1.4	0.1172
Percentil 16	0.65	0.0319
Señal 45 (Mw=7.5)	1.45	0.2104
Escala	0.0201	

- GMRotDpp

Tabla 48. GMRotD00 de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	0.75	0.0644
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	1.35	0.1088
Percentil 16	0.65	0.0299
Señal 45 (Mw=7.5)	1.4	0.2066
Escala	0.0201	

Tabla 49. GMRotD50 de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	0.8	0.0698
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	1.35	0.1191
Percentil 16	0.65	0.0316
Señal 45 (Mw=7.5)	1.4	0.2268
Escala	0.0201	

Tabla 50. GMRotD100 de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	0.8	0.0732
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	1.35	0.1253
Percentil 16	0.7	0.0329
Señal 45 (Mw=7.5)	1.4	0.2429
Escala	0.0201	

- GMRotIpp

Tabla 51. GMRotIpp de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca

GMRotI50	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	0.75	0.0694
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	1.4	0.1178
Percentil 16	0.65	0.0316
Señal 45 (Mw=7.5)	1.45	0.2352
Escala	0.0201	

- Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados

Tabla 52. SRSS de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	1.05	0.1001
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	1.4	0.1677
Percentil 16	0.65	0.0465
Señal 45 (Mw=7.5)	1.45	0.3004
Escala	0.0201	

- Respuesta Máxima en el Plano Horizontal

Tabla 53. RotD100 de la Velocidad del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	VELOCIDAD (cm/s)
Promedio	0.75	0.0837
Espectro	1	0.1671
Percentil 84	1.4	0.1426
Percentil 16	0.65	0.0381
Señal 45 (Mw=7.5)	1.5	0.2957
Escala	0.0201	

c) Desplazamiento

- Media Geométrica (GM)

Tabla 54. GM del desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	4	0.0194
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	4	0.0341
Percentil 16	3.25	0.0049
Señal 44 (Mw=7.4)	4	0.0861
Escala	0.0275	

- GMRotDpp

Tabla 55. GMRotD00 del desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	4	0.018
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	3.95	0.0316
Percentil 16	3.25	0.0045
Señal 44 (Mw=7.4)	3.9	0.0821
Escala	0.0275	

Tabla 56. GMRotD50 del desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	4	0.0197
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	3.95	0.0347
Percentil 16	3.25	0.0049
Señal 44 (Mw=7.4)	3.9	0.0913
Escala	0.0275	

Tabla 57. GMRotD100 del desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	4	0.0209
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	4	0.0372
Percentil 16	3.25	0.0052
Señal 44 (Mw=7.4)	3.9	0.1004
Escala	0.0275	

- GMRotIpp

Tabla 58. GMRotI50 del Desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	4	0.0198
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	3.9	0.0347
Percentil 16	4	0.0051
Señal 44 (Mw=7.4)	3.85	0.0916
Escala	0.0275	

- Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados

Tabla 59. SRSS del Desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	4	0.0289
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	3.95	0.0517
Percentil 16	3.25	0.0071
Señal 44 (Mw=7.4)	3.95	0.1407
Escala	0.0275	

- Respuesta Máxima en el Plano Horizontal

Tabla 60. RotD100 del Desplazamiento del Acelerógrafo CIP Cajamarca

PARAMETROS	PERIODO (s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
Promedio	4	0.025
Espectro	1.6	0.0426
Percentil 84	3.95	0.046
Percentil 16	3.4	0.0062
Señal 44 (Mw=7.4)	3.95	0.1302
Escala	0.0275	

CAPITULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Comparaciones del espectro que propone la Norma de Diseño Sismorresistente E 030 (2018) con el método moderno RotD100

ESTACION UNC

- La aceleración para la norma E 030 es de 1.05 cm/s^2 para un periodo de 1.0 s y para RotD100 es de 1.2925 cm/s^2 con un periodo de 0.60 s con una variación de 18.76 % (ver tabla 25.)
- La velocidad para la norma E 030 es de 0.1671 cm/s para un periodo de 1.0 s y para RotD100 es de 0.1333 cm/s con un periodo de 1.0 s con una variación de 20.23% (ver tabla 32.)
- El desplazamiento para la norma E 030 es de 0.0426 cm/s para un periodo de 1.6 y para RotD100 es de 0.0351 cm con un periodo de 2.2 s con una variación de 17.60% (ver tabla 39.)

ESTACION CIP – CAJAMARCA

- La aceleración para la norma E 030 es de 1.05 cm/s^2 para un periodo de 1.0 s y para RotD100 es de 1.0384 cm/s^2 con un periodo de 0.25 s con una variación de 1.10 % (ver tabla 46.)
- La velocidad para la norma E 030 es de 0.1671 cm/s para un periodo de 1.0 s y para RotD100 es de 0.0835 cm/s con un periodo de 0.75 s con una variación de 49.91 % (ver tabla 53.)
- El desplazamiento para la norma E 030 es de 0.0426 cm/s para un periodo de 1.6 y para RotD100 es de 0.025 cm con un periodo de 4.0 s con una variación de 41.31% (ver tabla 60.)

Al realizar la comparación con respecto a la norma peruana E 030 2018 se obtuvieron datos de mayor porcentajes en todos los métodos trabajados lo que indicaría que la norma tiene registros sísmicos generalizados o cercanos a los de la ciudad de Cajamarca ya que su implementación es reciente la del CIP en julio del 2016 y de la UNC

Comparación de los métodos GM, GMRotD50 y GMRotI50 se tiene los siguientes valores

ESTACION UNC

- Tienen el mismo periodo de 0.6 s y las variaciones de las aceleraciones son pequeñas en promedio 1.06 cm/s^2 (ver figura 50)
- Tienen el mismo periodo GM Y GMRotI50 de 1.0 s y GMRotD50 es de 1.05 s varia 4.76% que está dentro del estándar y tienen la misma la velocidad de 0.1111 cm/s (ver figura 51)
- Tienen el mismo periodo GM Y GMRotI50 de 2.20 s y GMRotD50 es de 2.27 s varia 2.27% que está dentro del estándar y tienen la misma el desplazamiento de 0.028 cm (ver figura 52)

ESTACION CIP – CAJAMARCA

- Tienen el mismo periodo GM Y GMRotI50 de 0.25 s y GMRotD50 es de 0.4 s varia 37.5% y tienen la misma la aceleración de 0.89 cm/s^2 (ver figura 80.)
- El periodo GM es de 0.75, para GMRotI50 es de 0.80 y GMRotD50 es de 1.05 varia 28.57% y tienen la misma la velocidad de 0.06 cm/s (ver figura 81)
- Tienen el mismo periodo es de 4.0 s tienen la misma el desplazamiento de 0.02 cm (ver figura 82)

Al realizar las comparaciones de los espectros GM, GMRotD50 y GMRotI50. Aquí se puede determinar que para los datos procesados se obtuvieron que la variación en el desplazamiento es 2.27% en el Acelerógrafo de la UNC y del CIP tienen en mismo desplazamiento.

Comparación de los métodos SRSS y RotD100 se tiene los siguientes valores

ESTACION UNC

- Varia 15.36% para la aceleración siendo mayor SRSS con un valor de 2.5621 cm/s^2 y para RotD100 2.8216 cm/s^2 (ver figura 53.)
- Varia 18.34 % para la velocidad siendo mayor SRSS con un valor de 0.4181 cm/s y para RotD100 0.3414 cm/s (ver figura 54.)
- Varia 16.91 % para el desplazamiento siendo mayor SRSS con un valor de 0.1301 cm y para RotD100 0.1081 cm (ver figura 55.)

ESTACION CIP – CAJAMARCA

- Varía 4.10% para la aceleración siendo mayor SRSS con un valor de 2.7926 cm/s^2 y para RotD100 2.6779 cm/s^2 (ver figura 83.)
- Varía 1.56% para la velocidad siendo mayor SRSS con un valor de 0.3004 cm/s y para RotD100 0.2957 cm/s (ver figura 84.)
- Varía 7.46 % para el desplazamiento siendo mayor SRSS con un valor de 0.1407 cm y para RotD100 0.1302 cm (ver figura 85.)

Al realizar las comparaciones entre los espectros SRSS y RotD100 que buscan determinar la respuesta máxima en cualquier dirección. Se encontró una diferencia entre ambos métodos son bajas en la ESTACION CIP – CAJAMARCA donde el método SRSS es más conservador

El factor de escala con respecto a la media geometría del acelerógrafo de la UNC es de 0.6095 para la aceleración, 0.0193 para la velocidad y para el desplazamiento es 0.0193, mientras que para el Acelerógrafo del CIP se obtuvo de 0.7912 para la aceleración, 0.0201 para la velocidad y 0.0275 para el desplazamiento. Las diferencias de escalas aun al estar ubicadas en la misma ciudad se deben al tipo de suelo en lo que están instaladas, el de la UNC está instalado sobre un suelo limo-arcilloso mientras que la del CIP está en un suelo grava-arcilloso

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El espectro promedio de Pseudovelocidades obtenido con el total de señales sísmicas analizadas muestra que el periodo predominante del suelo (T_s) en las zonas del campus universitario de la Universidad Nacional de Cajamarca y el Colegio de Ingenieros varían alrededor de 1.75 seg, lo cual clasifica al suelo de estas zonas como un suelo blando S3, según la clasificación indicada en la Tabla 5 de la norma E.031 Aislamiento Sísmico.

Se logro la elaboración de los espectros de repuesta para la aceleración velocidad y desplazamiento mediante los métodos de combinación: Respuesta Máxima en el Plano Horizontal (RotD100), Media Geométrica (GM), Media Geométrica, Rotación, dependiente, Percentil (GMRotDpp), Media Geométrica, Rotación, Independiente, Percentil (GMRotIpp) y Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS).

Comparaciones del espectro que propone la Norma de Diseño Sismorresistente E 030 (2018) con el método moderno RotD100 se concluye que es más conservador y para estructuras sometidas a grandes cargas (hospitales, reservorios elevados y plantas nucleares) se recomienda que emplear este método

se concluye que el método SRSS es más conservador que el método RotD100 y que en la estación CIP – Cajamarca los valores de ambos métodos son bastante cercanos por lo tanto esta estación se considera que tiene mayor grado confiable para el tratamiento de datos

Los factores de escala calculados para la ciudad de Cajamarca de acuerdo a cada estación y parámetro se muestran a continuación

ESTACION UNC

- 0.6095 para la aceleración. (ver tabla 19.)
- 0.0193 para la velocidad. (ver tabla 26)
- 0.0193 para el desplazamiento, (ver tabla 33.)

ESTACION CIP – CAJAMARCA

- 0.7912 para la aceleración. (ver tabla 40.)
- 0.0201 para la velocidad. (ver tabla 47.)
- 0.0275 para el desplazamiento, (ver tabla 54.)

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda al comité técnico especializado del ministerio de construcción y saneamiento calibrar el espectro de diseño de la norma E.030 basado en una media geométrica mediante su amplificación por un factor de direccionalidad de tal manera de evitar sub estimar la demanda espectral por efecto de la direccionalidad.
- Se recomienda al comité técnico especializado del ministerio de construcción y saneamiento definir el rango de frecuencias predominantes en las zonas de estudio, de tal manera de identificar cuáles son los periodos de las estructuras que podrían sintonizar con las frecuencias predominantes del suelo.
- Se recomienda para el diseño de estructuras asimétricas, es decir, aquellas con simetría vertical cilíndricas y cuyas propiedades (masa, rigidez lateral y resistencia lateral) son igual al rotar con respecto al eje vertical. En estos casos el diseño basado en la dirección máxima (RotD100) del movimiento sísmico sustentara su diseño

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASCE. (2010). ASCE STANDARD Loads for Buildings. In Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures.
- Arnold Ramsey Mendo Rodríguez, 2015. Bases para la implementación de la Norma Peruana de análisis y diseño de edificios con aislación sísmica.
- Beyer, K., and J. J. Bommer (2006). Relationships between median values and between aleatory variabilities for different definitions of the horizontal component of motion, *Bull. Seism. Soc. Am.* 96, no. 4, 1512– 1522.
- Boore, D. M. (2010). TSPP—A collection of FORTRAN programs for processing and manipulating time series, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 2008-1111 (Revision 2.1).
- Boore, D. M., Watson-Lamprey, J., y Abrahamson, N. A. (2006). Orientation independent measures of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4 A), 1502–1511. <https://doi.org/10.1785/0120050209>.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (Pearson). México: 2014.
- Douglas, J. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates, *Earth-Sci. Rev.* 61, 43–104.
- Lascano, G. (2018). Combinación de componentes horizontales de registros sísmicos considerando la dirección y tiempo donde se producen las aceleraciones máximas. Comparación con el método de combinación espectral SRSS (ASCE 7). Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/10125>.
- Miguel Vicente Suarez Saigua. (2020). Evaluación de combinación de componentes horizontales de registros sísmicos usando los métodos: RotD100, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS.
- Spudich, B. P., Chiou, B. S. J., Graves, R., Collins, N., & Somerville, P. (2004). A Formulation of Directivity for Earthquake Sources Using Isochrone Theory. U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 2004-1268, 54.
- Wilson, E. L. 2000. Three-dimensional static and dynamic analysis of structures. Berkeley, CA: Computers and Structures.

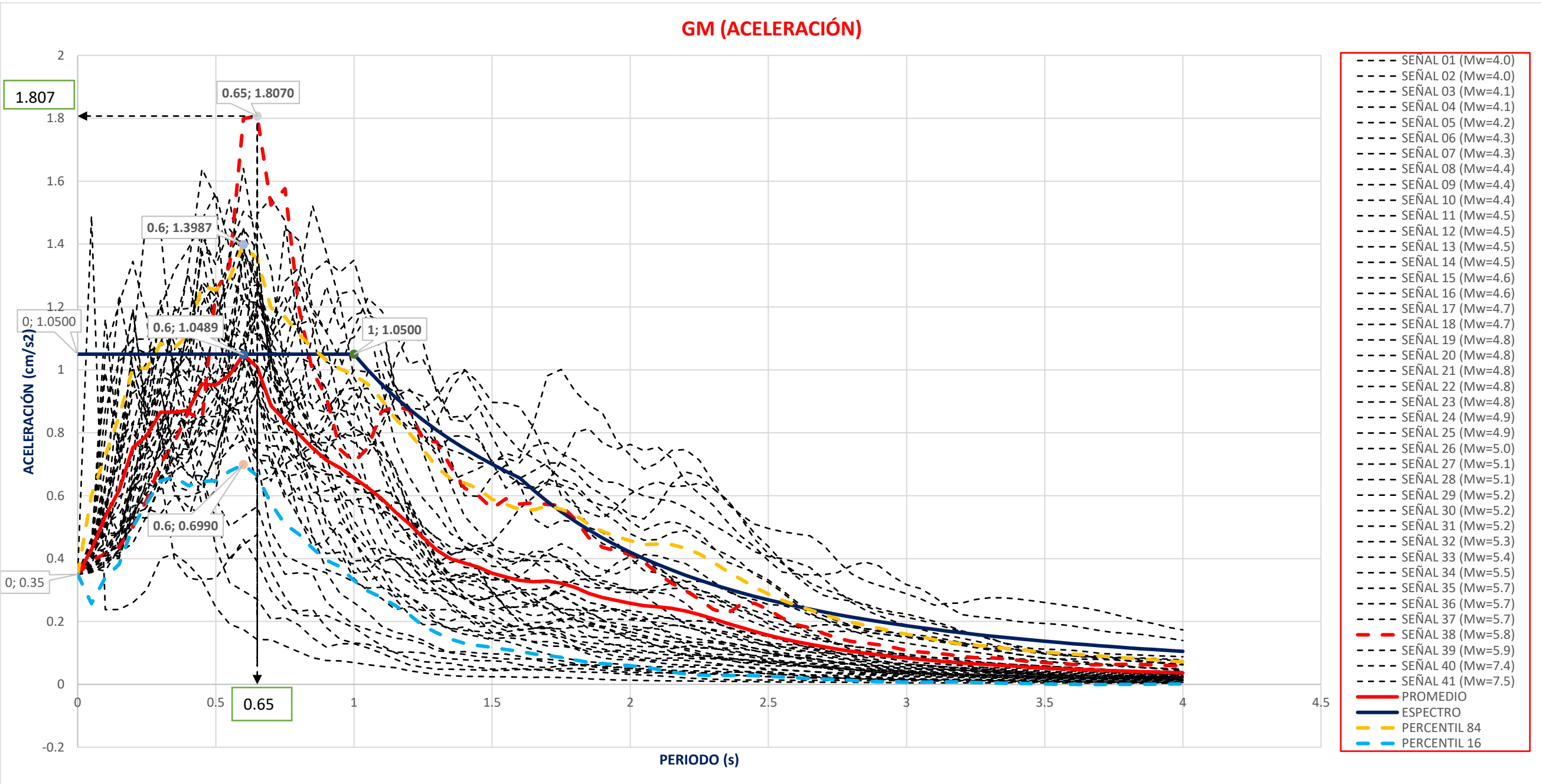
Valdés González y Ordaz Schroeder, 2008, Análisis de efectos sísmicos ortogonales horizontales en terreno blando p.92).

2016 capítulo II, Reglamento Nacional de Edificaciones “Peligro sísmico”

2016 capítulo III, Reglamento Nacional de Edificaciones “Sistema estructural e irregularidad de las edificaciones”

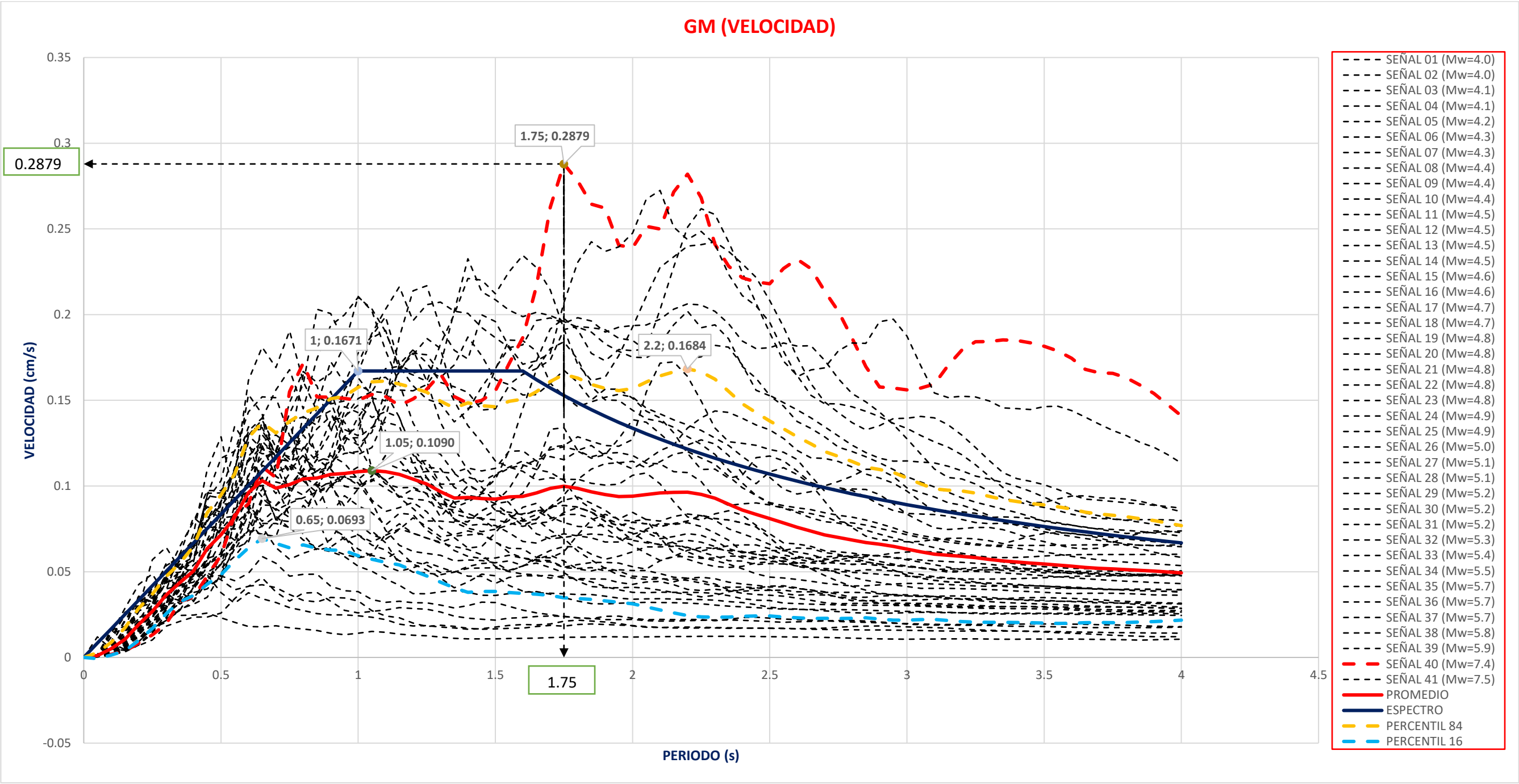
ANEXOS

Figura 29. MEDIA GEOMETRICA (GM) - ACELERACIÓN - UNC



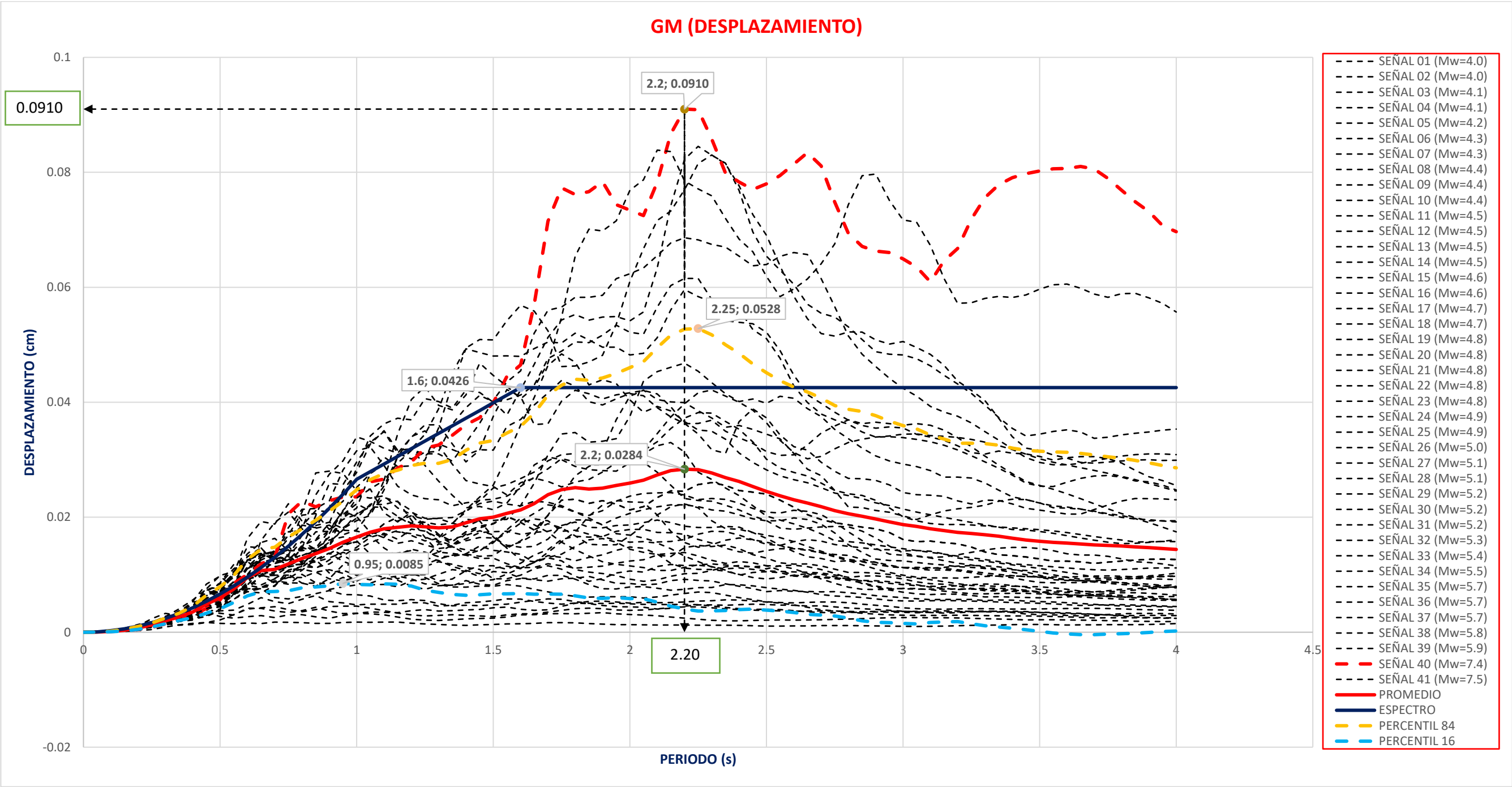
Para la MEDIA GEOMETRICA (GM) se obtiene que la señal 38 cuya $M_w = 5.8$ y nos arroja que la ACELERACIÓN = 1.8070 cm/s^2 , para un PERIODO = 0.65 s . El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s^2 , para un PERIODO = 1.0 s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA nos da la ACELERACIÓN = 1.0489 cm/s^2 , para un PERIODO = 0.6 s . Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.3987 cm/s^2 , para un PERIODO = 0.6 s . Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 0.6990 cm/s^2 , para un PERIODO = 0.6 s . El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0 s y en el periodo de la $M_w = 5.8$, que es 0.65 s . Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0011 cm/s^2 . Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.8$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.7570 cm/s^2 . Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.8$, con el promedio de las 41 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 0.7581 cm/s^2 .

Figura 30. MEDIA GEOMETRICA (GM) – VELOCIDAD - UNC



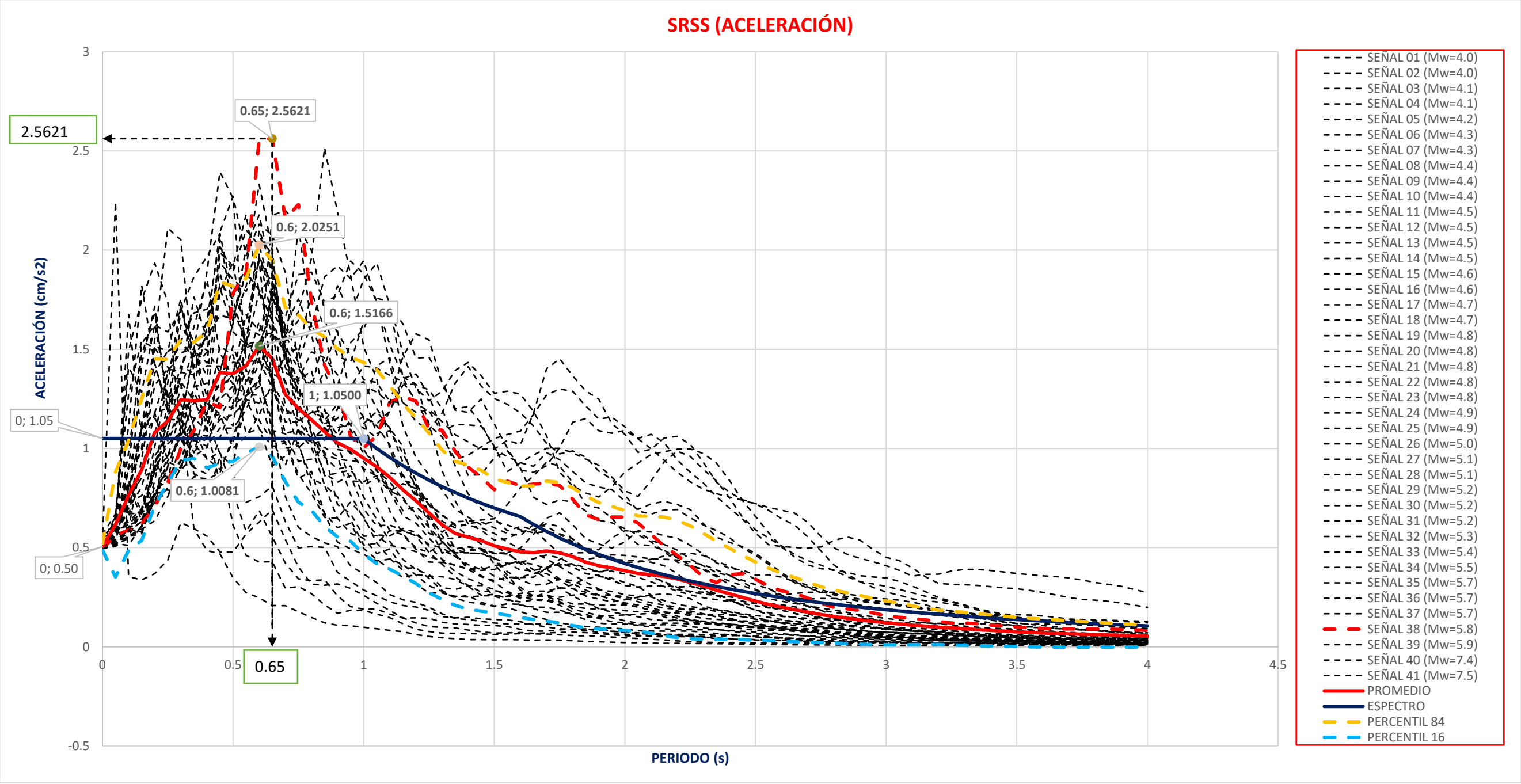
Para la MEDIA GEOMETRICA (GM) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.2879 cm/s, para un PERIODO = 1.75 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.1090 cm/s, para un PERIODO = 1.05s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1684 cm/s, para un PERIODO = 2.2s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0693 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 1.75s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0581 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.1208 cm/s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 40 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.1789 cm/s.

Figura 31. MEDIA GEOMETRICA (GM) – DESPLAZAMIENTO – UNC



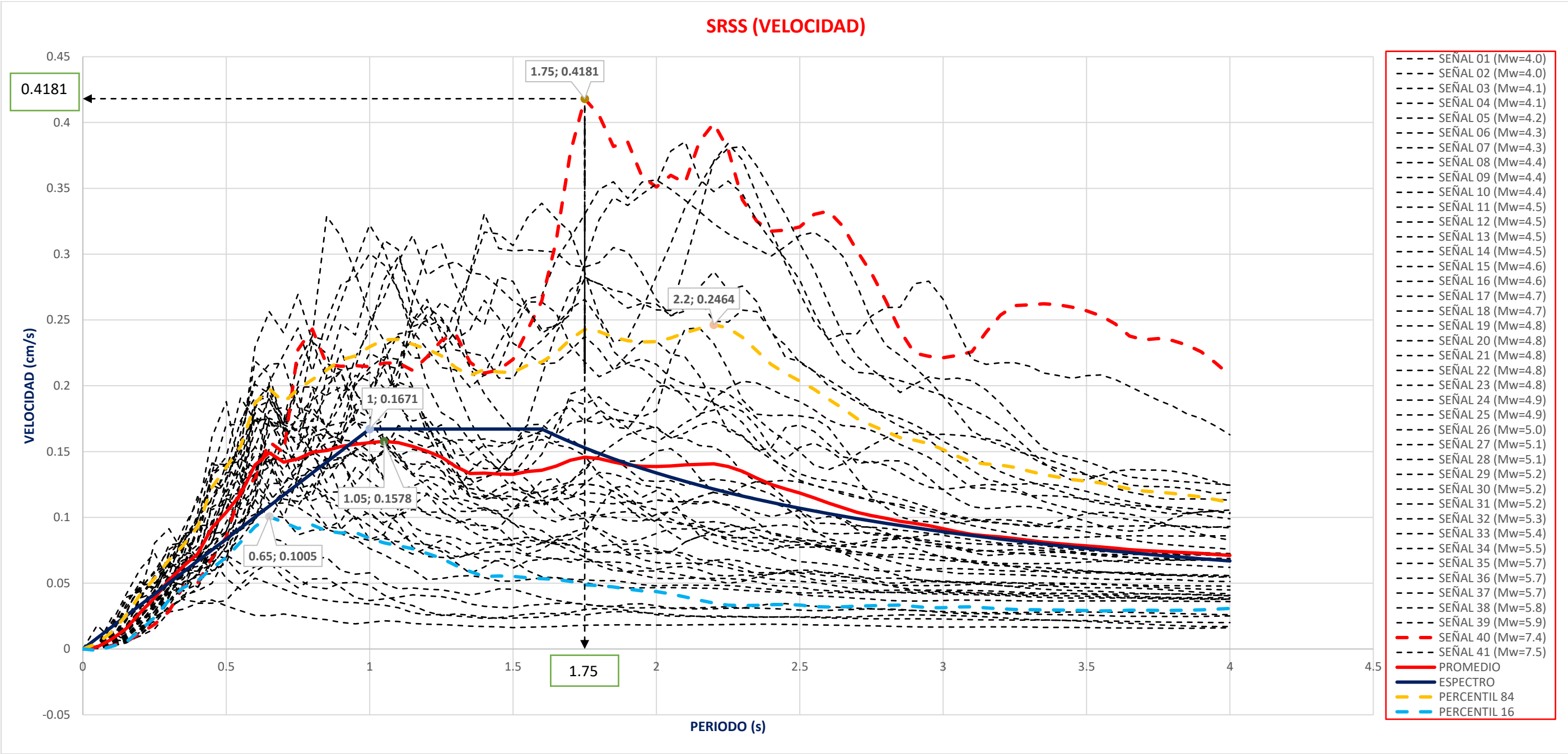
Para la MEDIA GEOMETRICA (GM) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.0910 cm, para un PERIODO = 2.2 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0284 cm, para un PERIODO = 2.2s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0528 cm, para un PERIODO = 2.25s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0085 cm, para un PERIODO = 0.95s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 2.2s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0142 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0484cm. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 41 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.0626 cm.

Figura 32. RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) - ACELERACIÓN – UNC



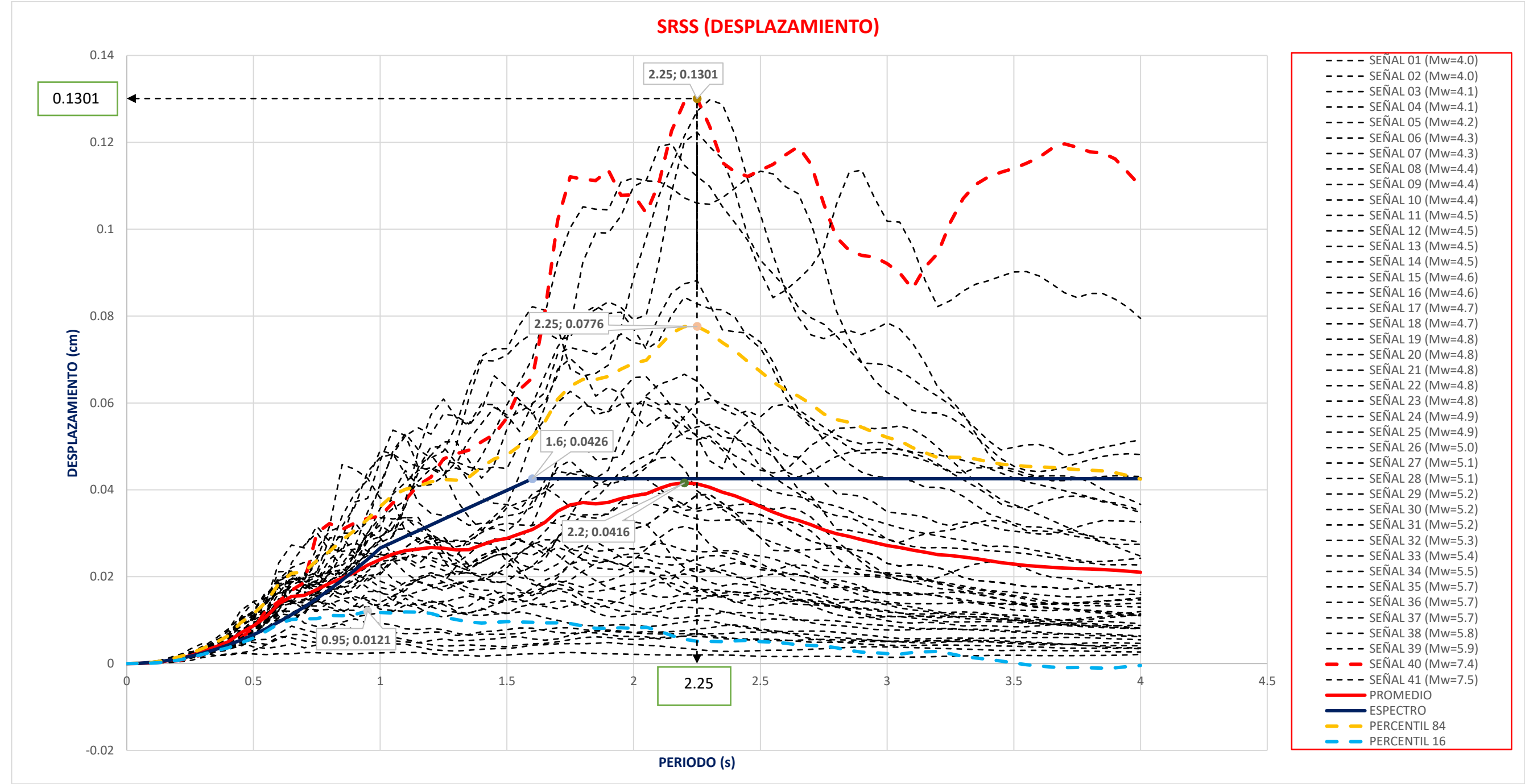
Para la RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) se obtiene que la señal 38 cuya $M_w = 5.8$ y nos arroja que la ACELERACIÓN = 2.5621 cm/s², para un PERIODO = 0.65 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA nos da la ACELERACIÓN = 1.5166 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 2.0251 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.0081 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 5.8$, que es 0.65s. Al comparar el promedio las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.4666 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.8$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 1.5121 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.8$, con el promedio de las 41 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 1.0455 cm/s².

Figura 33. RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) - VELOCIDAD – UNC



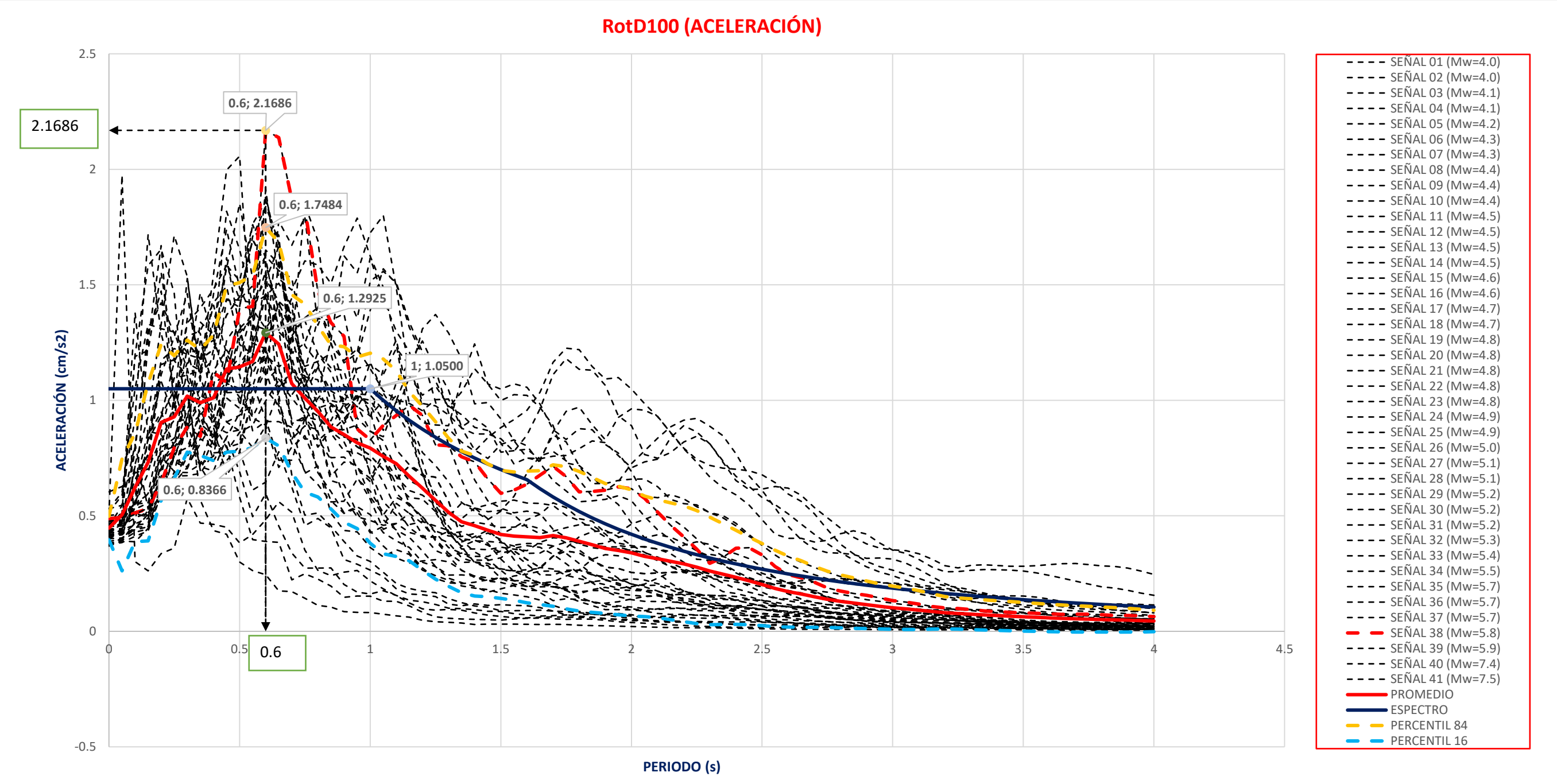
Para la RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.4181 cm/s, para un PERIODO = 1.75 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.1578 cm/s, para un PERIODO = 1.05s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.2464 cm/s, para un PERIODO = 2.2s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1005 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 1.75s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0093 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.2510 cm/s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 40 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.2603 cm/s.

Figura 34. RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) - DESPLAZAMIENTO – UNC



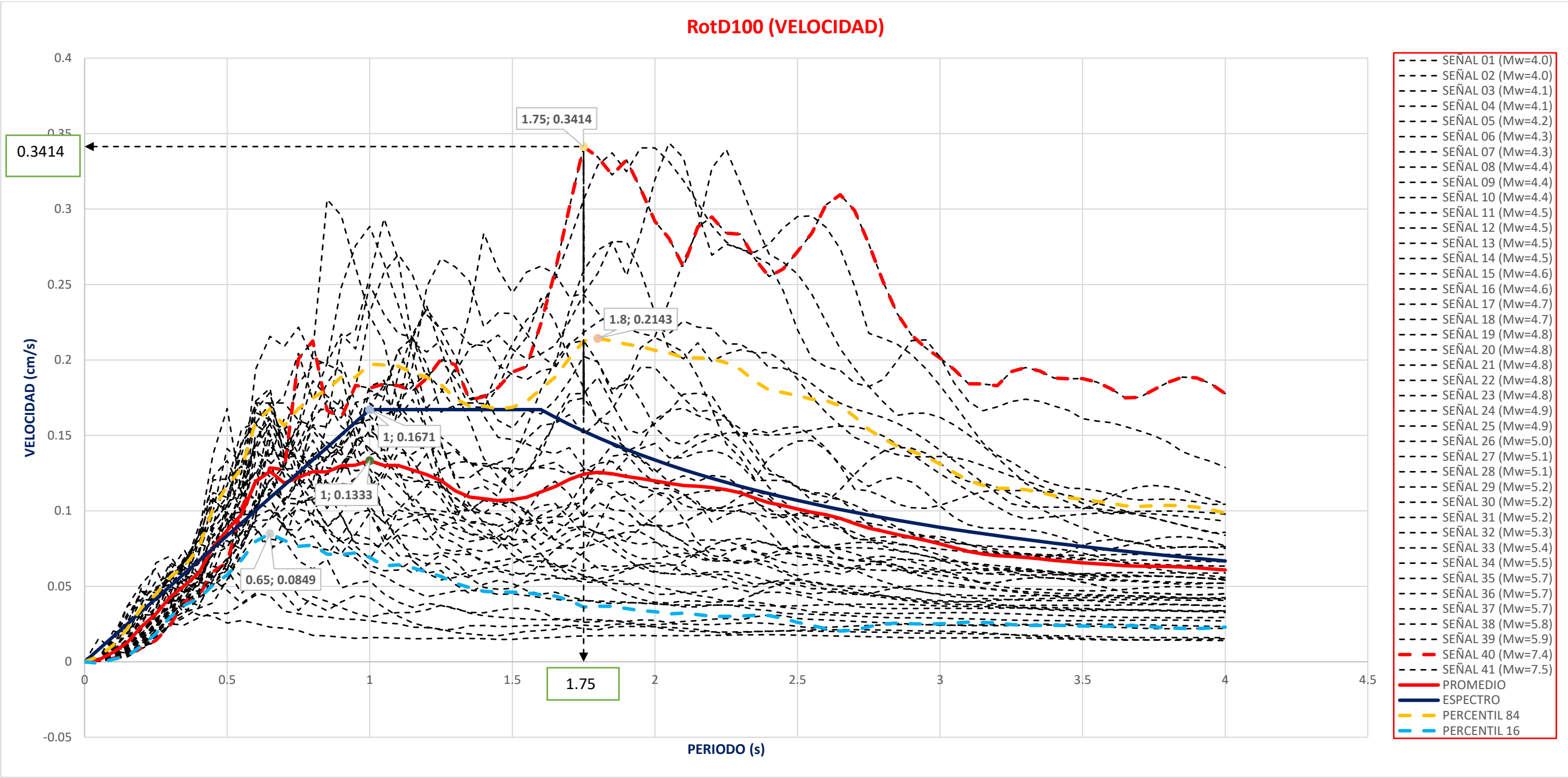
Para la RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.1301 cm, para un PERIODO = 2.25 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0416 cm, para un PERIODO = 2.2s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0776 cm, para un PERIODO = 2.25s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0121 cm, para un PERIODO = 0.95s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 2.25s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0010 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0875cm. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 41 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.0885 cm.

Figura 35. RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) – ACELERACIÓN – UNC



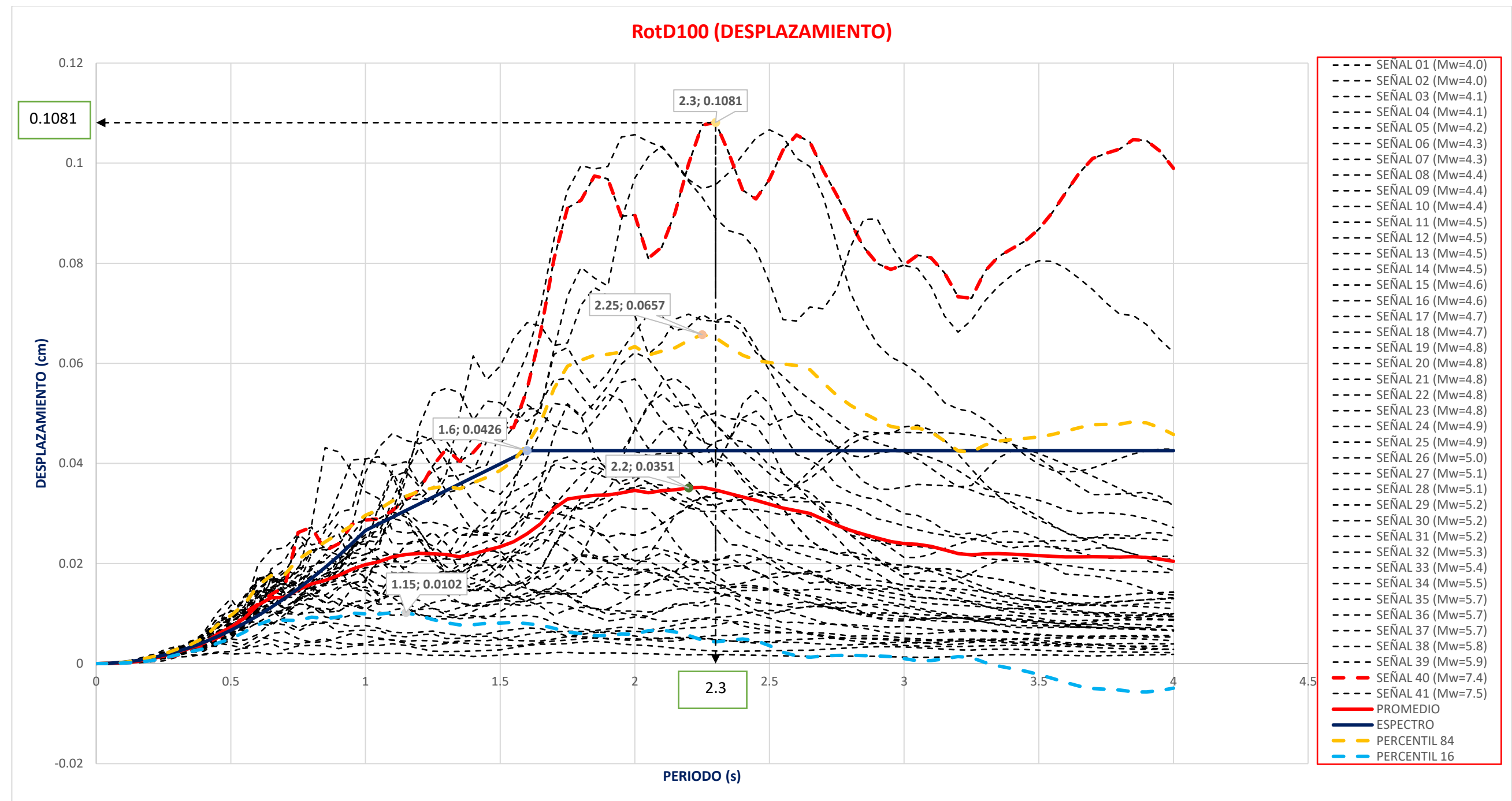
Para la RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) se obtiene que la señal 38 cuya $M_w = 5.8$ y nos arroja que la ACELERACIÓN = 2.1686 cm/s², para un PERIODO = 0.60 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA nos da la ACELERACIÓN = 1.2925 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.7484 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 0.8366 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 5.8$, que es 0.60s. Al comparar el promedio las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.2425 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.8$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 1.1186 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.8$, con el promedio de las 41 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 0.8761 cm/s².

Figura 36. RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) – VELOCIDAD – UNC



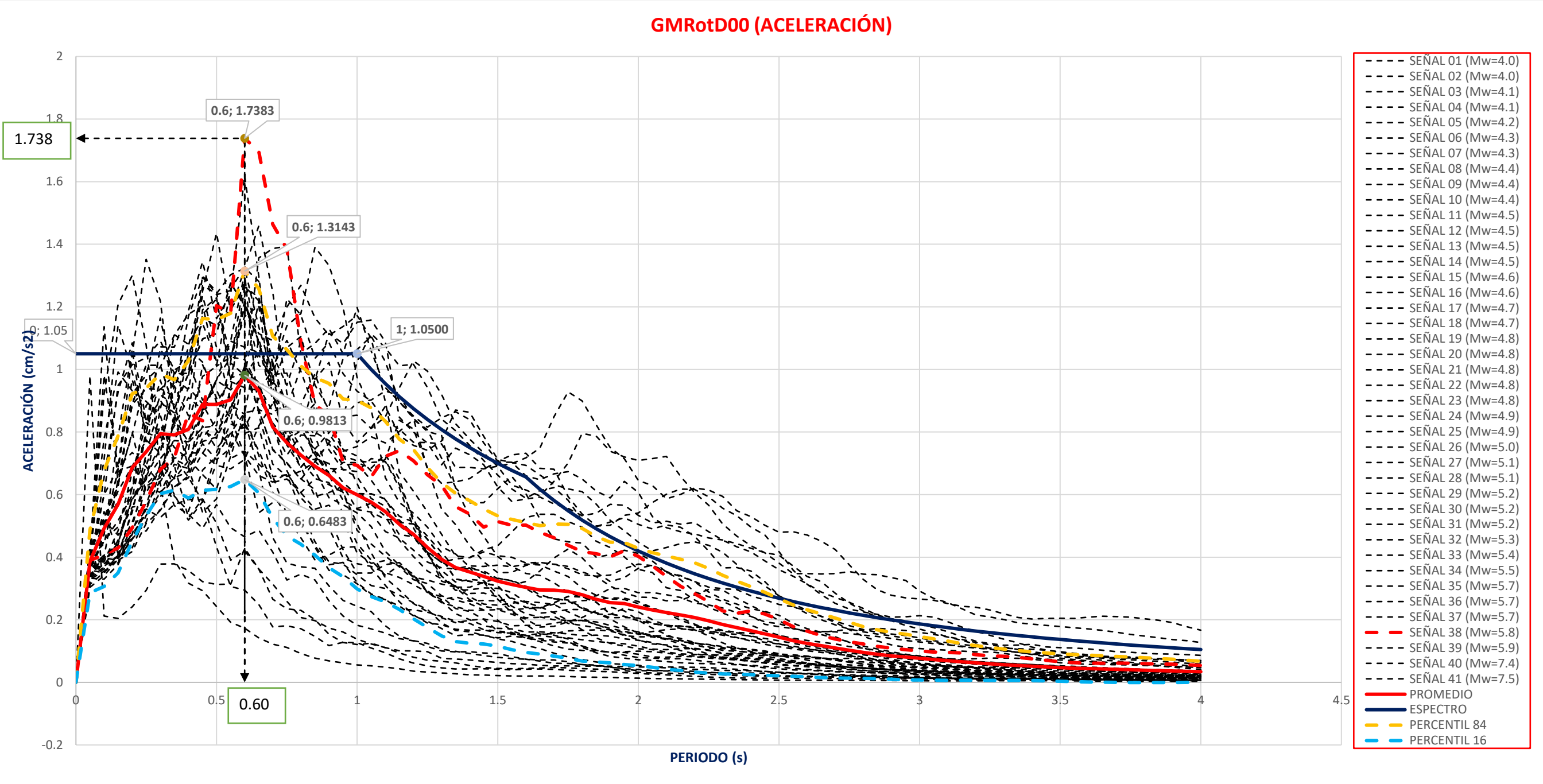
Para la RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.3414 cm/s, para un PERIODO = 1.75 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.1333 cm/s, para un PERIODO = 1.0s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.2143 cm/s, para un PERIODO = 1.8s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0849 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 1.75s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0338 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.1743 cm/s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 41 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.2081 cm/s.

Figura 37. RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) – DESPLAZAMIENTO – UNC



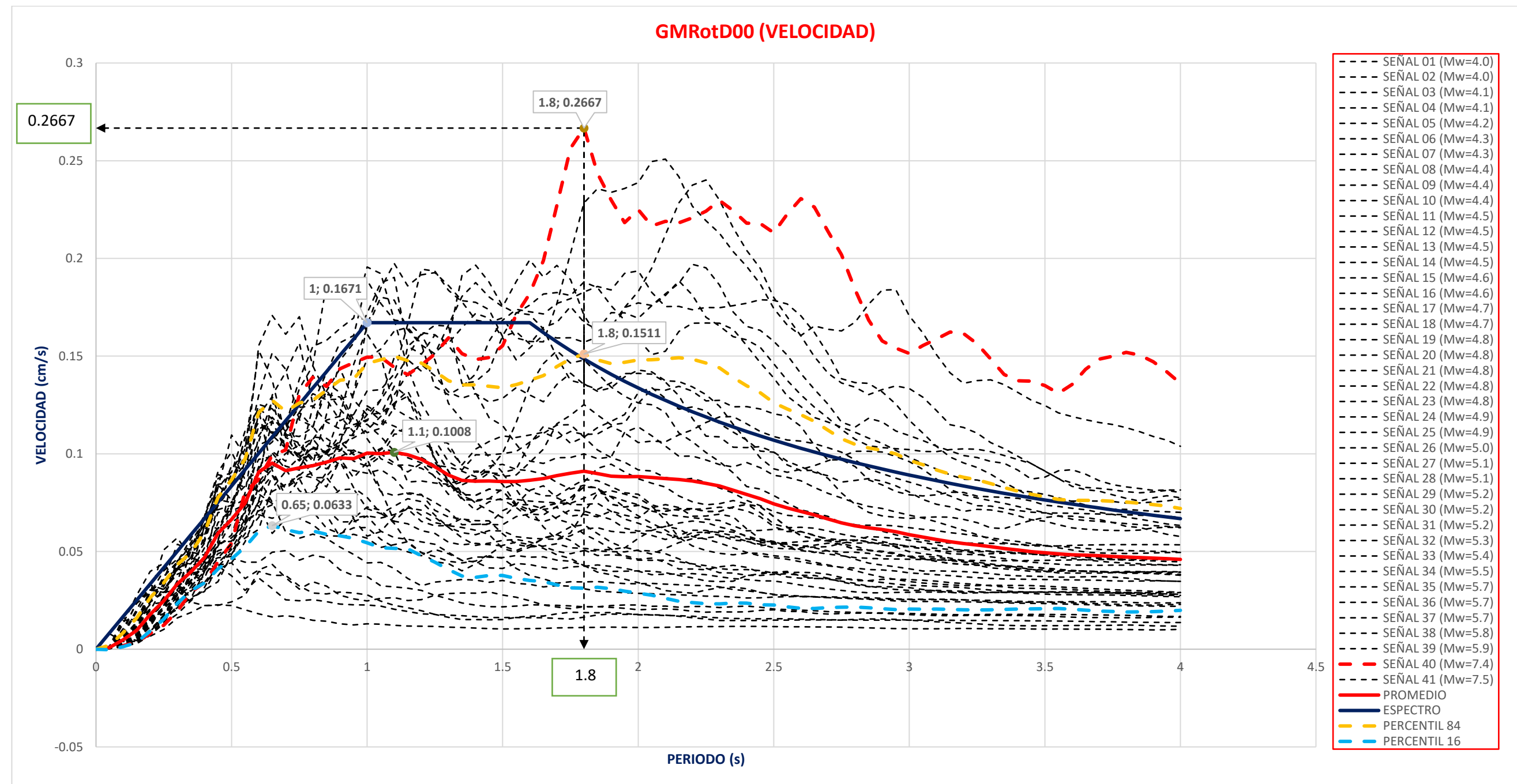
Para la RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.1081 cm, para un PERIODO = 2.3 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0351 cm, para un PERIODO = 2.2s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0657 cm, para un PERIODO = 2.25s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0102 cm, para un PERIODO = 1.15s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 2.3s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0075 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0655cm. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 41 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.0730 cm.

Figura 38. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) – ACELERACIÓN – UNC



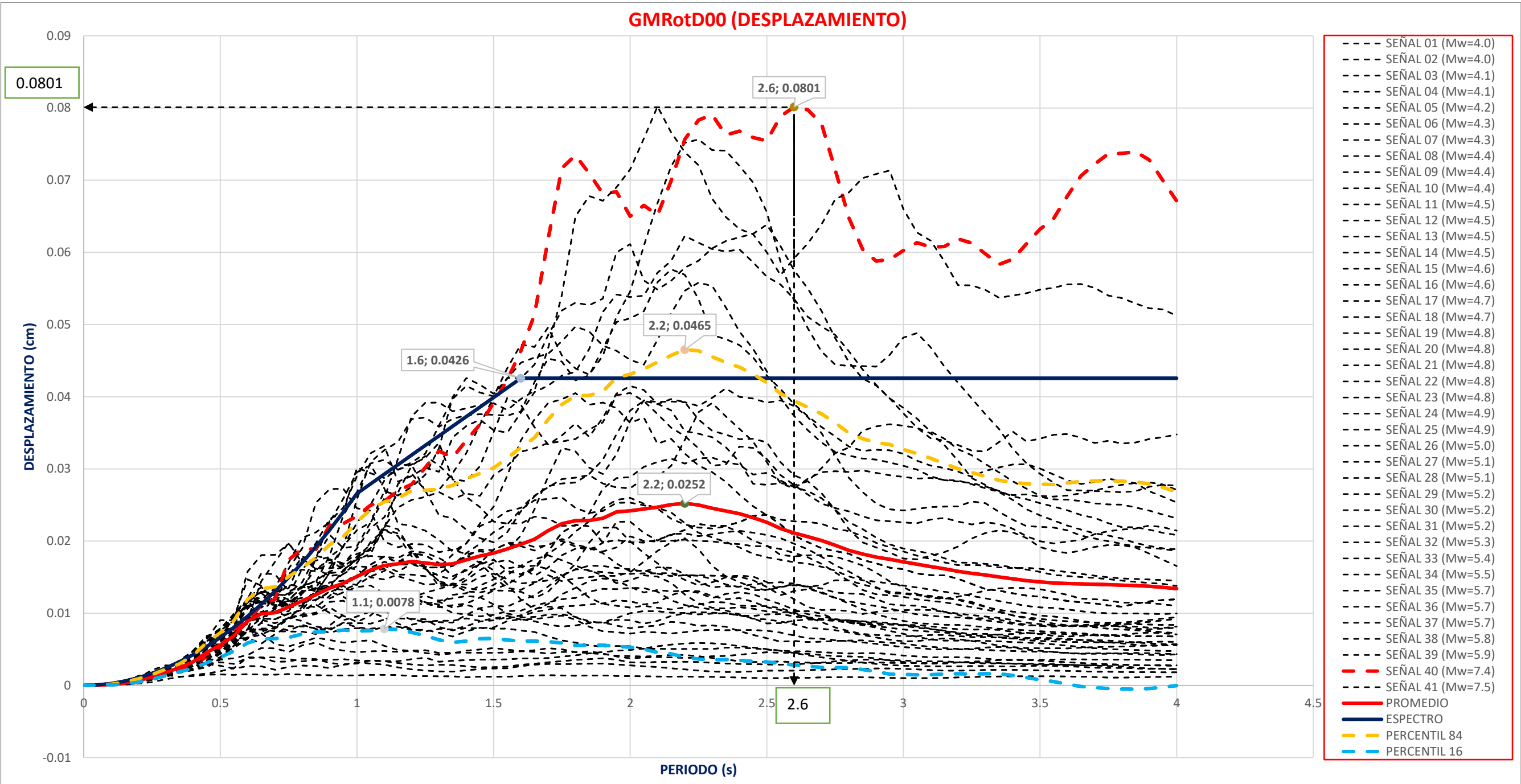
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) se obtiene que la señal 38 cuya $M_w = 5.8$ y nos arroja que la ACELERACIÓN = 1.7383 cm/s², para un PERIODO = 0.60 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA nos da la ACELERACIÓN = 0.9813 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.3143 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 0.6483 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 5.8$, que es 0.6s. Al comparar el promedio las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0687 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.8$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.6883 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.8$, con el promedio de las 41 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 0.7570 cm/s².

Figura 39. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) – VELOCIDAD – UNC



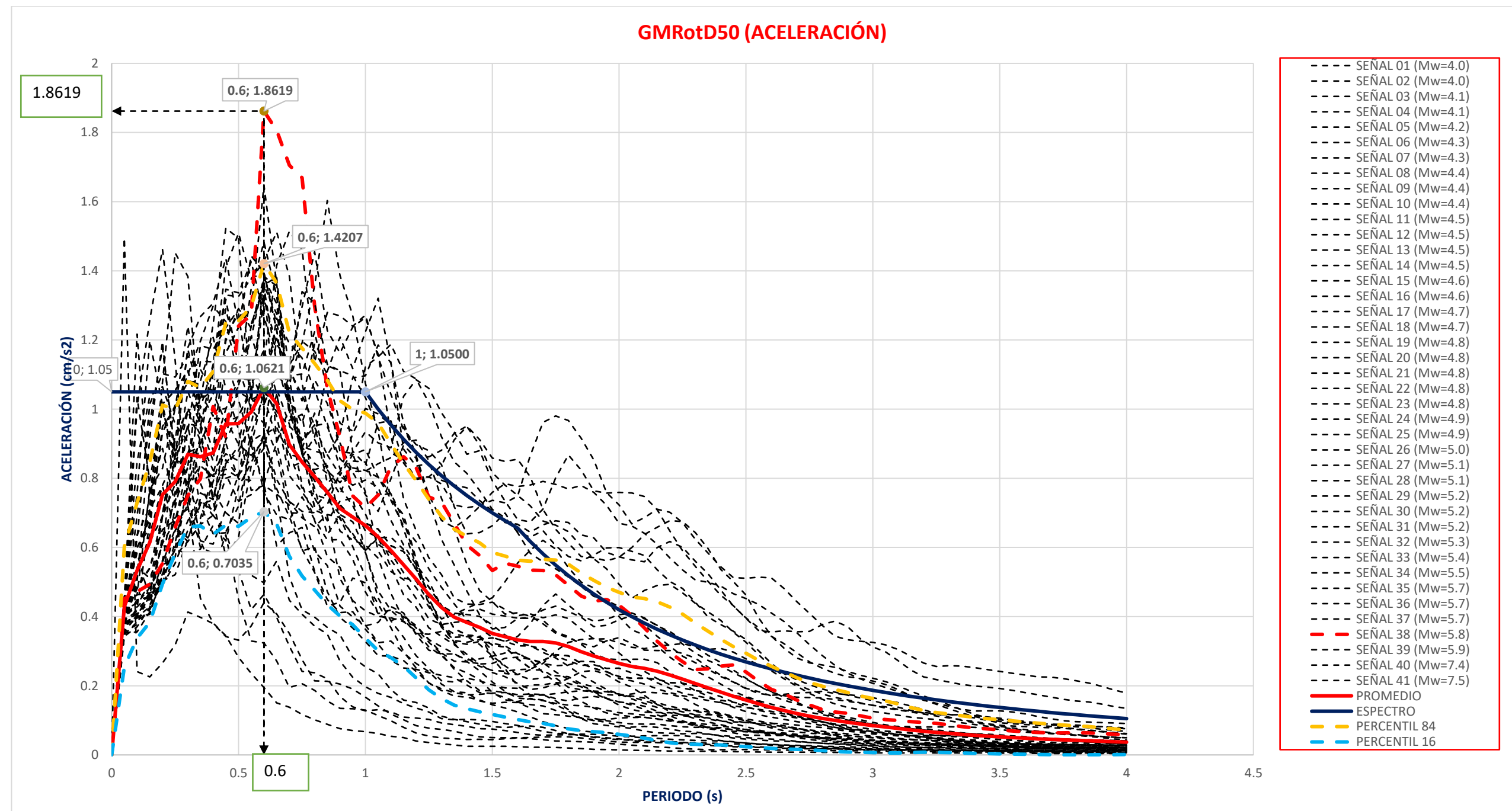
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.2667 cm/s, para un PERIODO = 1.8 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sismicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.1008 cm/s, para un PERIODO = 1.1s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1511 cm/s, para un PERIODO = 1.8s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0633 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 1.8s. Al comparar el promedio de las 41 señales sismicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0663 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0996 cm/s. Al comparar el promedio de las 41 señales sismicas con la señal 41 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.1659 cm/s.

Figura 40. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) – DESPLAZAMIENTO – UNC



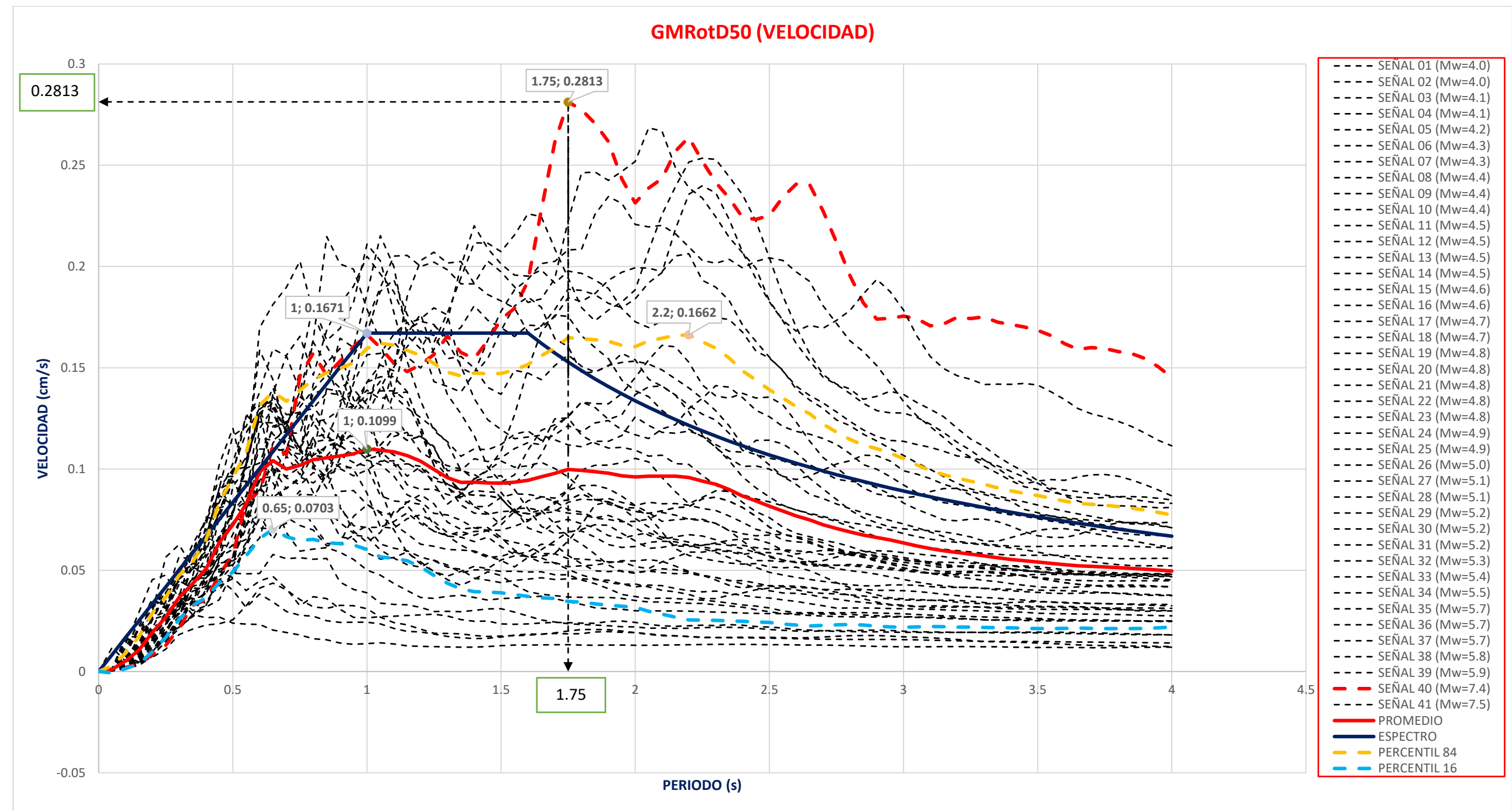
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.0801 cm, para un PERIODO = 2.6 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene el DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0252 cm, para un PERIODO = 2.2s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0465 cm, para un PERIODO = 2.20s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0078 cm, para un PERIODO = 1.10s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 2.6s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0174 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0375cm. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 41 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.0549 cm.

Figura 41. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) – ACELERACIÓN – UNC



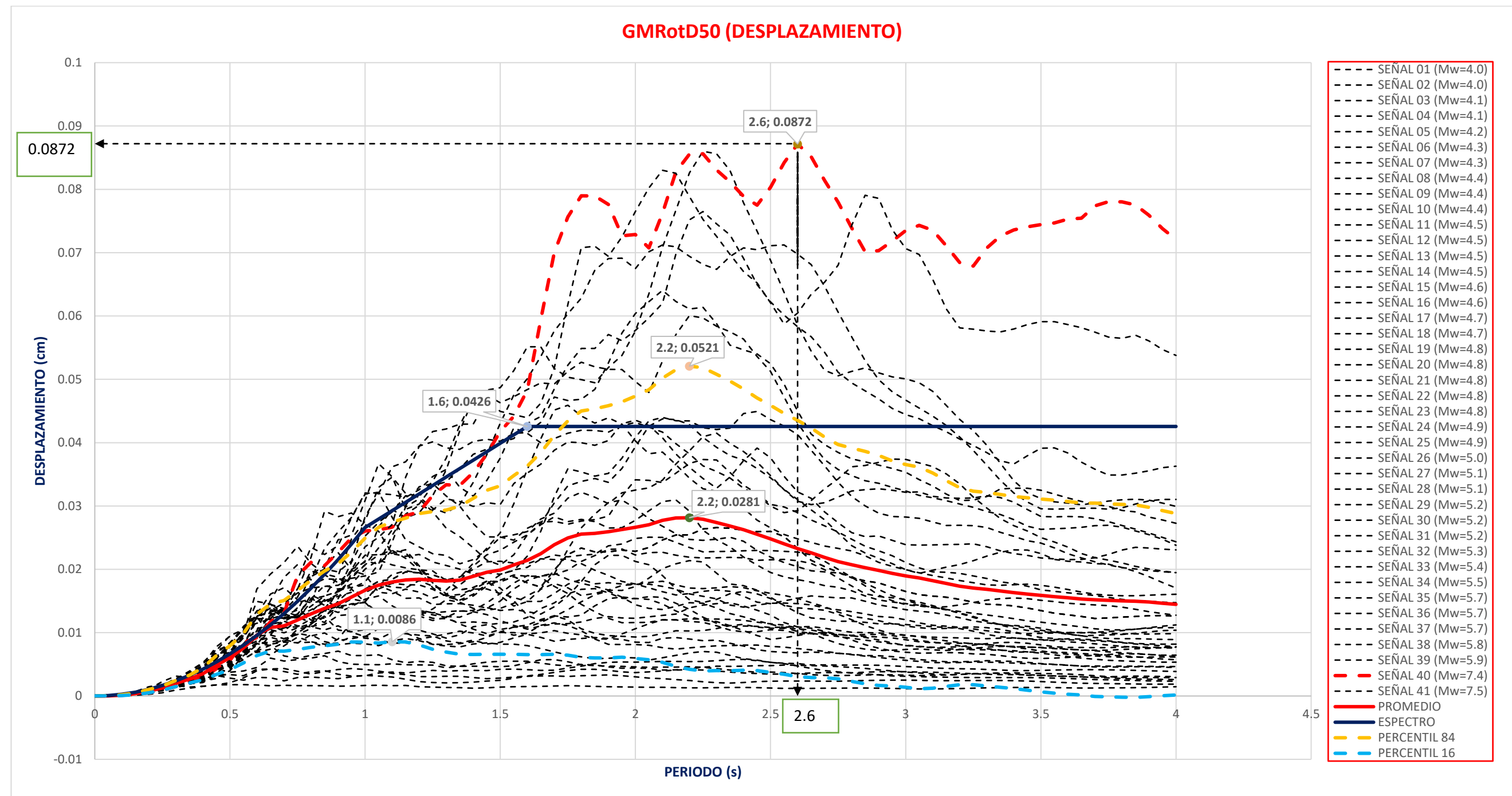
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) se obtiene que la señal 38 cuya Mw = 5.8 y nos arroja que la ACELERACIÓN = 1.8619 cm/s², para un PERIODO = 0.60 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA nos da la ACELERACIÓN = 1.0621 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.4207 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 0.7035 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la Mw = 5.8, que es 0.6s. Al comparar el promedio las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0121 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de Mw = 5.8, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.8119 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de Mw = 5.8, con el promedio de las 41 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 0.7998 cm/s².

Figura 42. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) – VELOCIDAD – UNC



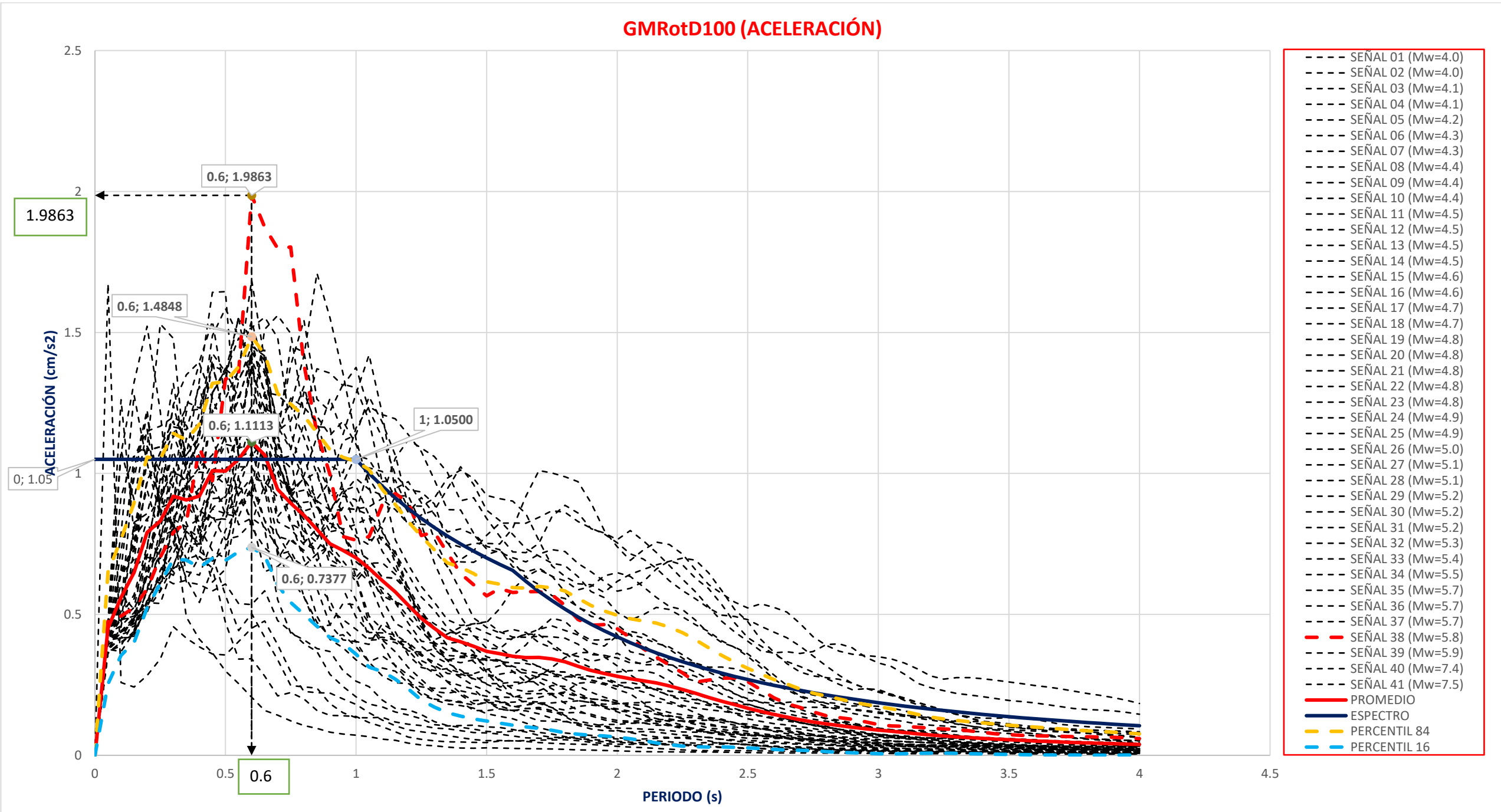
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.2813 cm/s, para un PERIODO = 1.75 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.1099 cm/s, para un PERIODO = 1.0s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1662 cm/s, para un PERIODO = 2.2s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0703 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 1.75s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0572 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.1142 cm/s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 41 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.1714 cm/s.

Figura 43. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) – DESPLAZAMIENTO – UNC



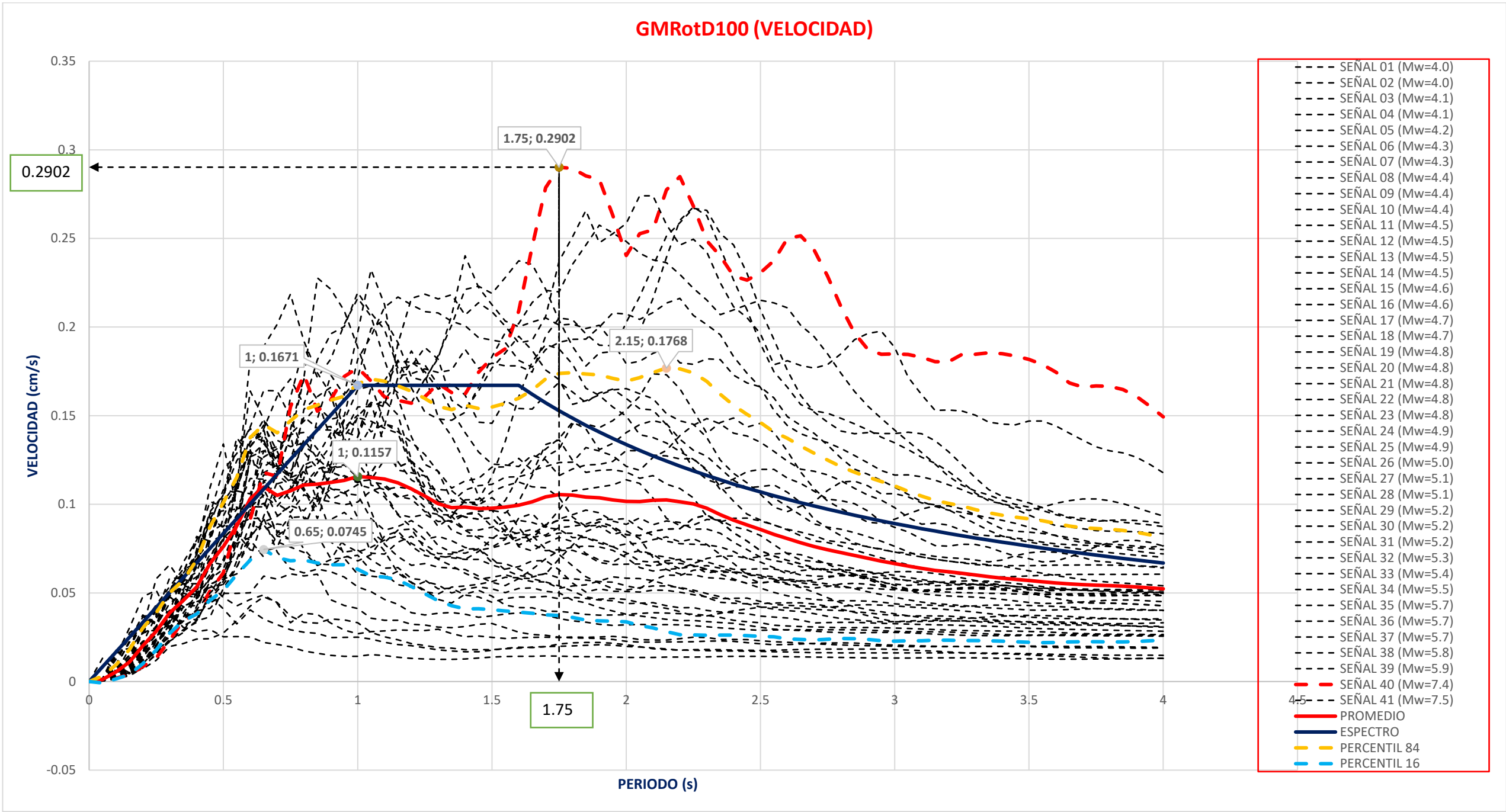
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.0872 cm, para un PERIODO = 2.6 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0281 cm, para un PERIODO = 2.2s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0521 cm, para un PERIODO = 2.20s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0086 cm, para un PERIODO = 1.10s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 2.6s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0145 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0446cm. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 41 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.0591 cm.

Figura 44. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) – ACELERACIÓN – UNC



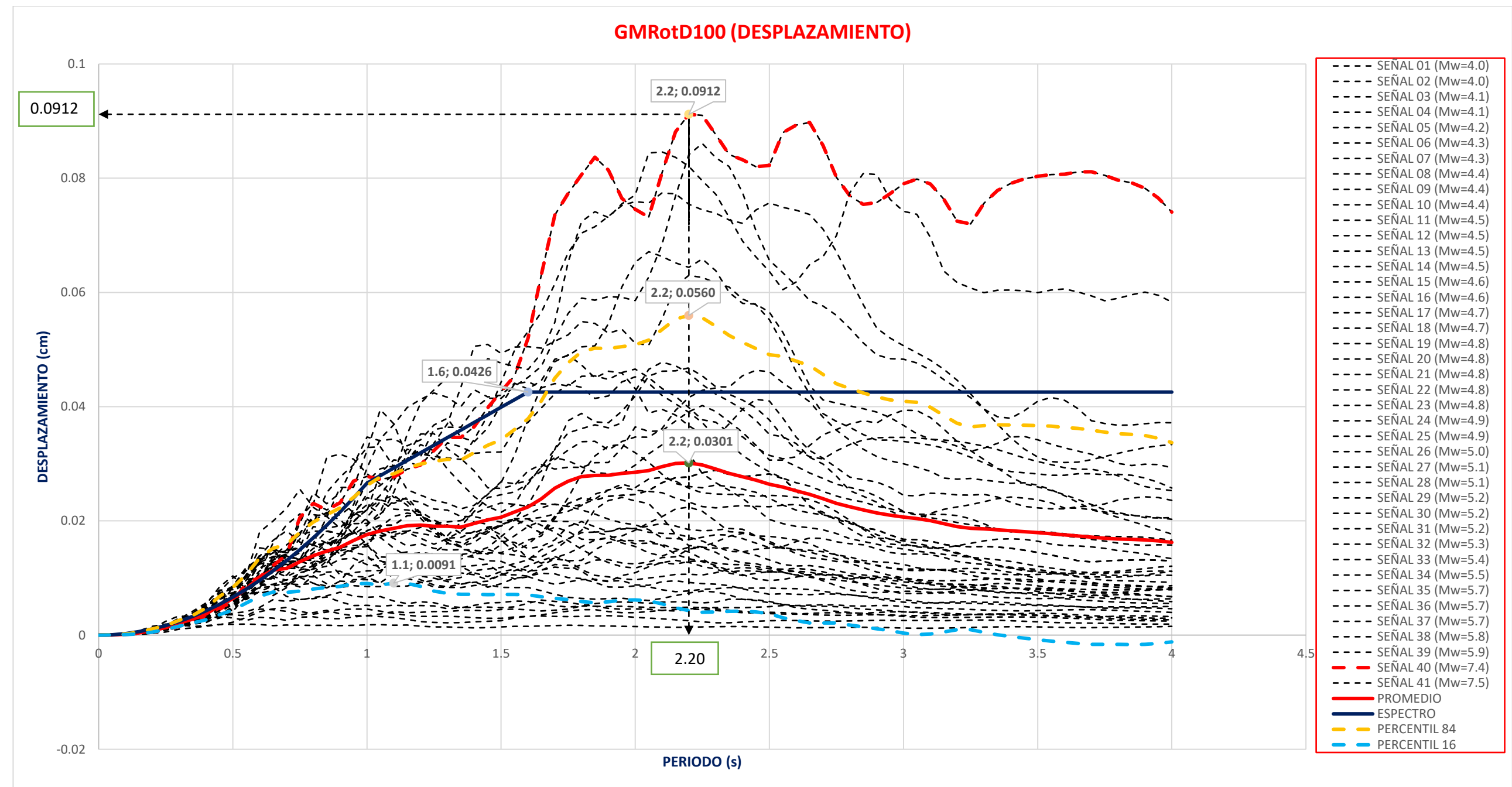
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) se obtiene que la señal 38 cuya $M_w = 5.8$ y nos arroja que la ACELERACIÓN = 1.9863 cm/s², para un PERIODO = 0.60 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA nos da la ACELERACIÓN = 1.1113 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.4848 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 0.7377 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 5.8$, que es 0.6s. Al comparar el promedio las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0613 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.8$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.9363 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.8$, con el promedio de las 41 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 0.8750 cm/s².

Figura 45. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) – VELOCIDAD – UNC



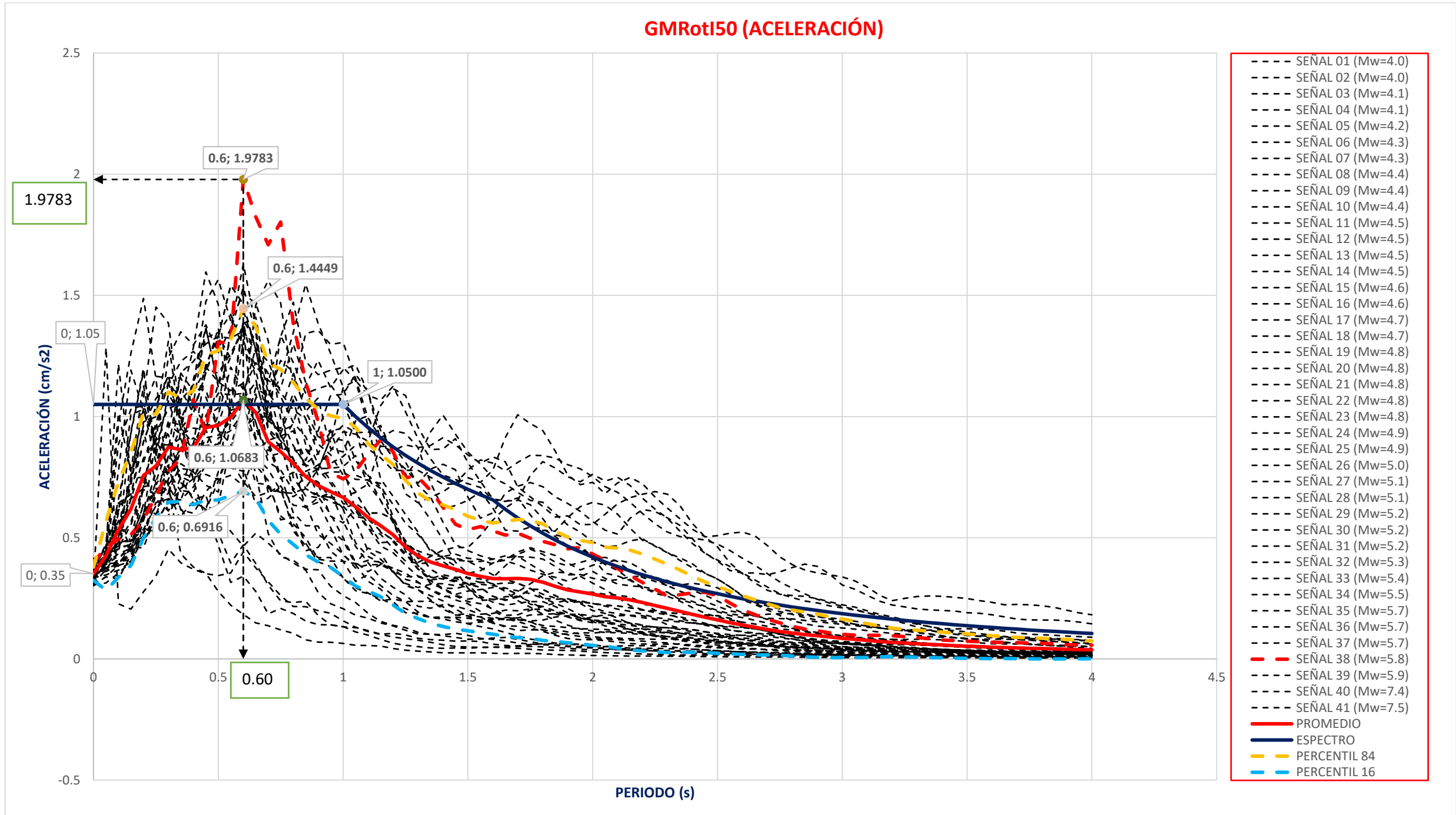
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.2902 cm/s, para un PERIODO = 1.75 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.1157 cm/s, para un PERIODO = 1.0s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1768 cm/s, para un PERIODO = 2.15s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0745 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 1.75s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0514 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.1231 cm/s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 41 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.1745 cm/s.

Figura 46. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) – DESPLAZAMIENTO – UNC



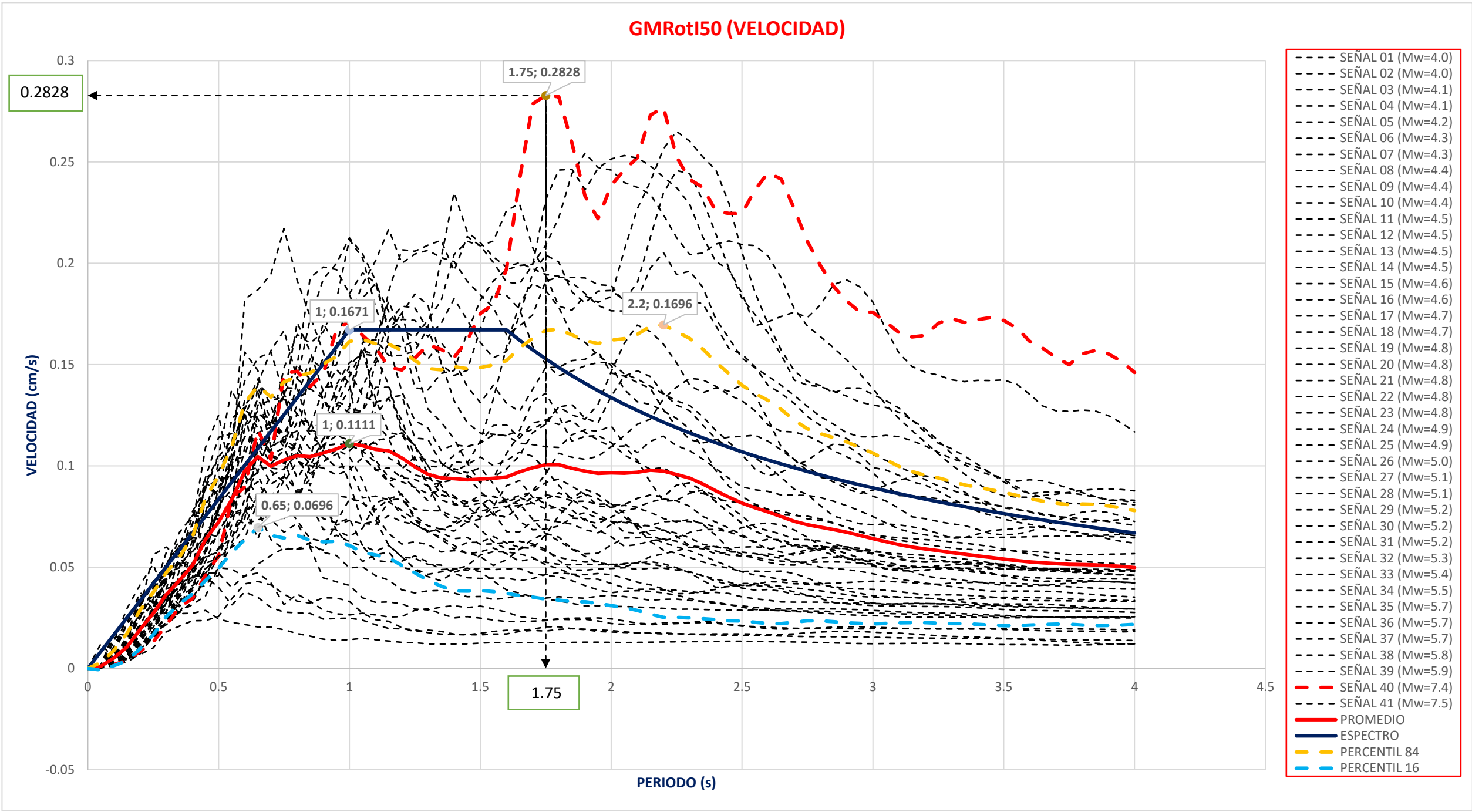
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.0912 cm, para un PERIODO = 2.2 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0301 cm, para un PERIODO = 2.2s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0560 cm, para un PERIODO = 2.20s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0091 cm, para un PERIODO = 1.10s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 2.2s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0125 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0486cm. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 41 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.0611 cm.

Figura 47. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) – ACELERACIÓN – UNC



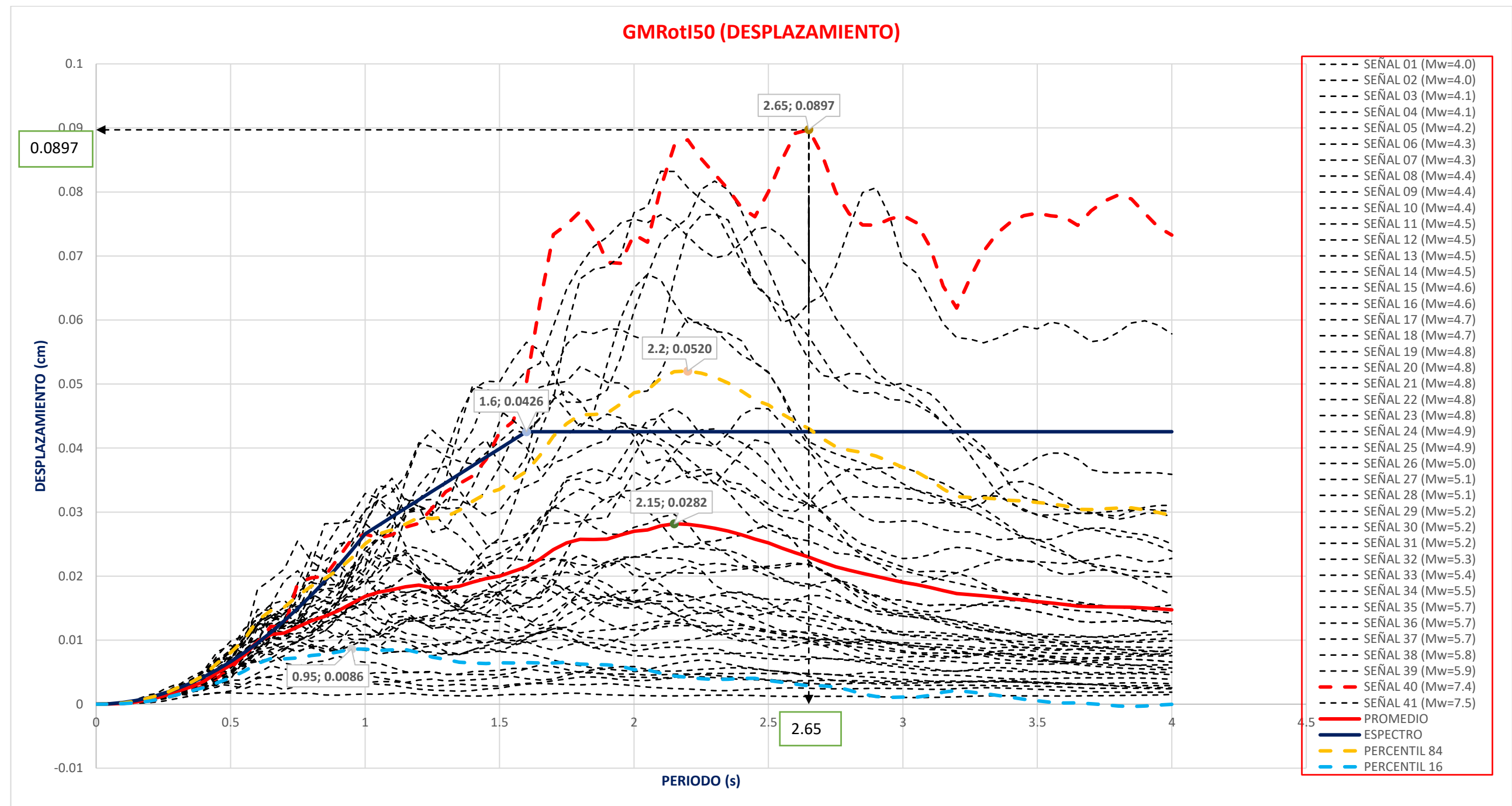
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) se obtiene que la señal 38 cuya $M_w = 5.8$ y nos arroja que la ACELERACIÓN = 1.9783 cm/s², para un PERIODO = 0.60 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA nos da la ACELERACIÓN = 1.0683 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.4449 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 0.6916 cm/s², para un PERIODO = 0.6s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 5.8$, que es 0.6s. Al comparar el promedio las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0183 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.8$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.9283 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.8$, con el promedio de las 41 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 0.9100 cm/s².

Figura 48. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) – VELOCIDAD – UNC



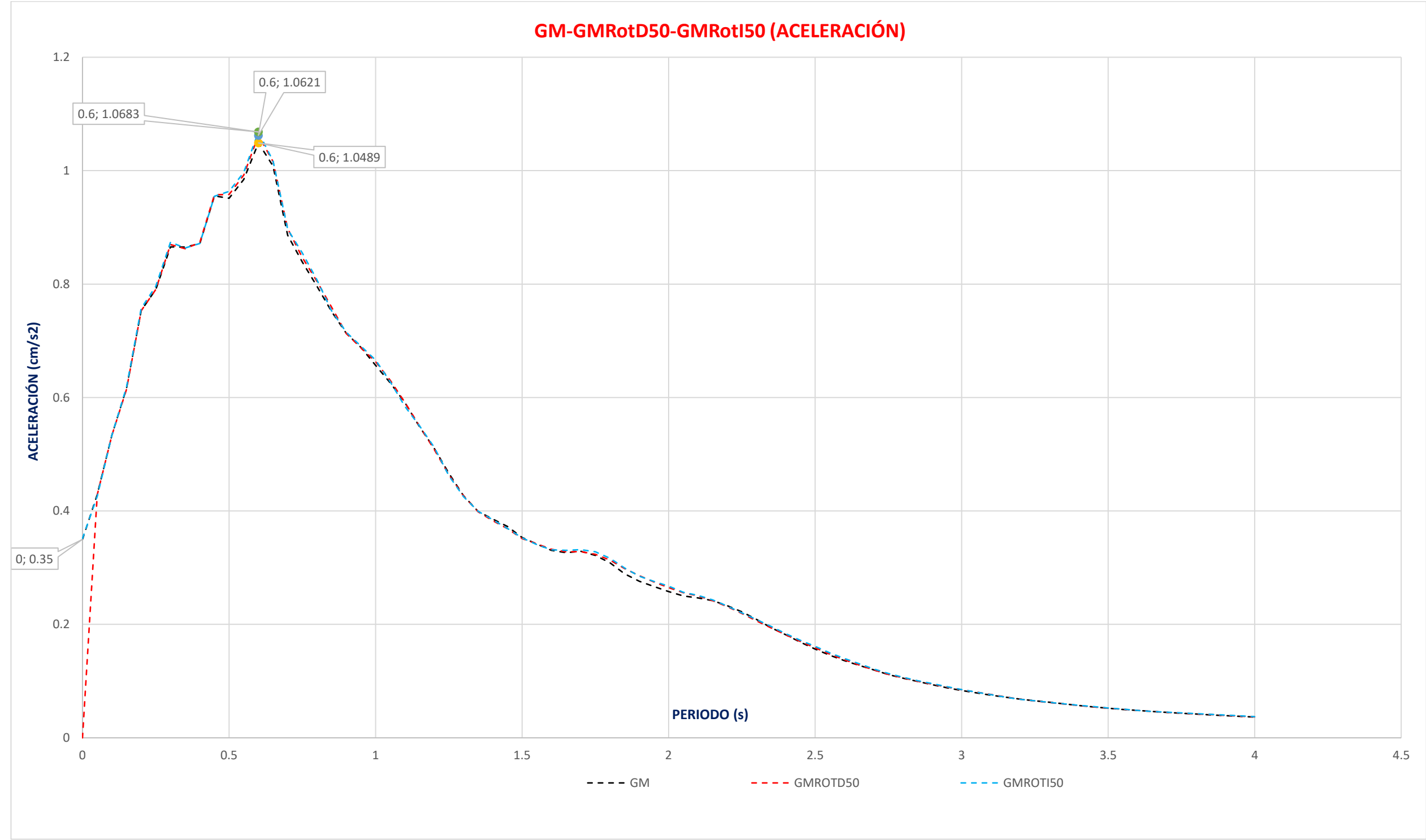
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.2828 cm/s, para un PERIODO = 1.75 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.1111 cm/s, para un PERIODO = 1.0s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1696cm/s, para un PERIODO = 2.20s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0696 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 1.75s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0560 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.11571 cm/s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 41 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.1717 cm/s.

Figura 49. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) – DESPLAZAMIENTO – UNC



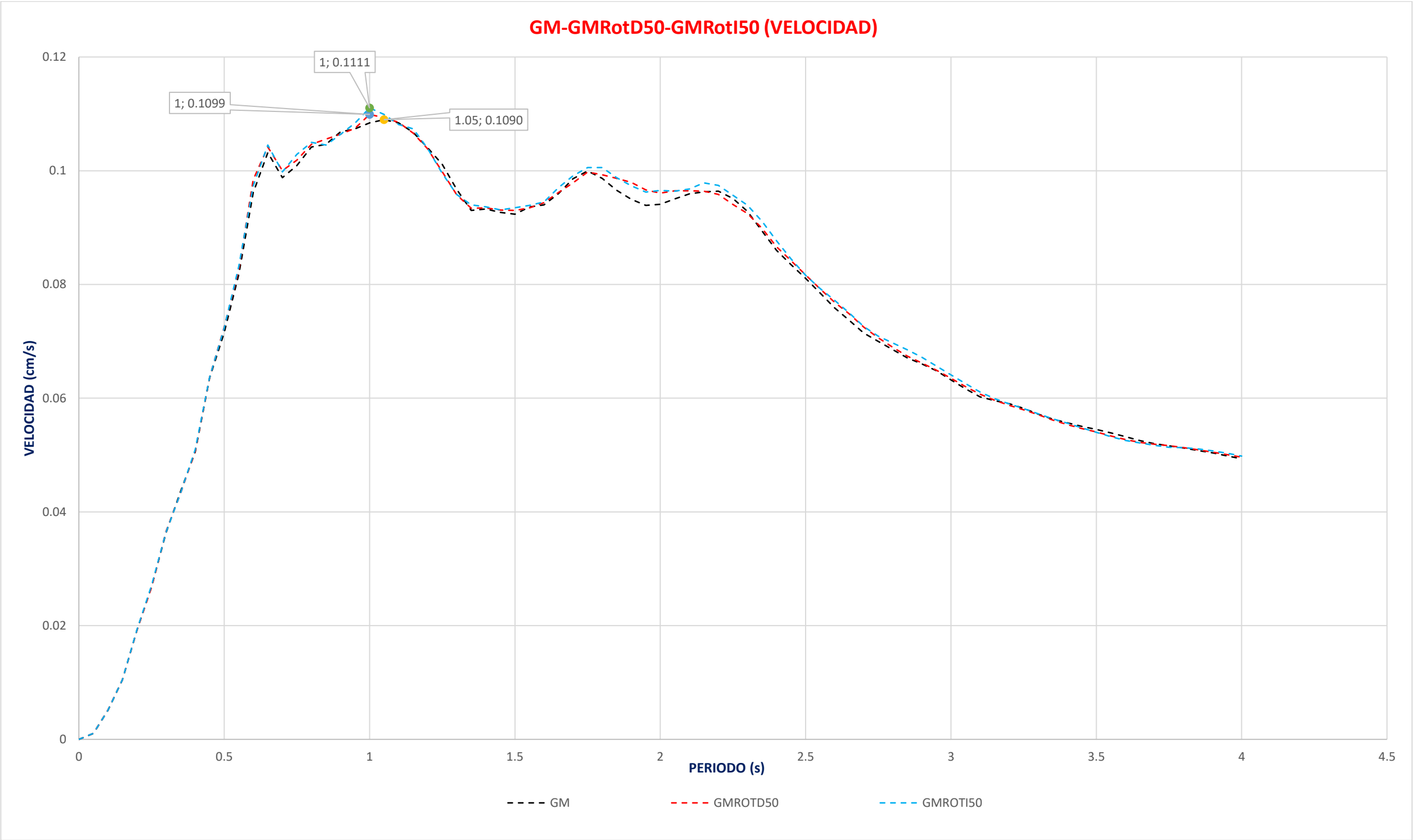
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) se obtiene que la señal 40 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.0897 cm, para un PERIODO = 2.65 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 41 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0282 cm, para un PERIODO = 2.15s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0520 cm, para un PERIODO = 2.20s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0086 cm, para un PERIODO = 0.95s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 2.65s. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0144 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0471cm. Al comparar el promedio de las 41 señales sísmicas con la señal 41 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.0615 cm.

Figura 50. GM – GMRotD50 - GMRotI50 (ACELERACIÓN) – UNC



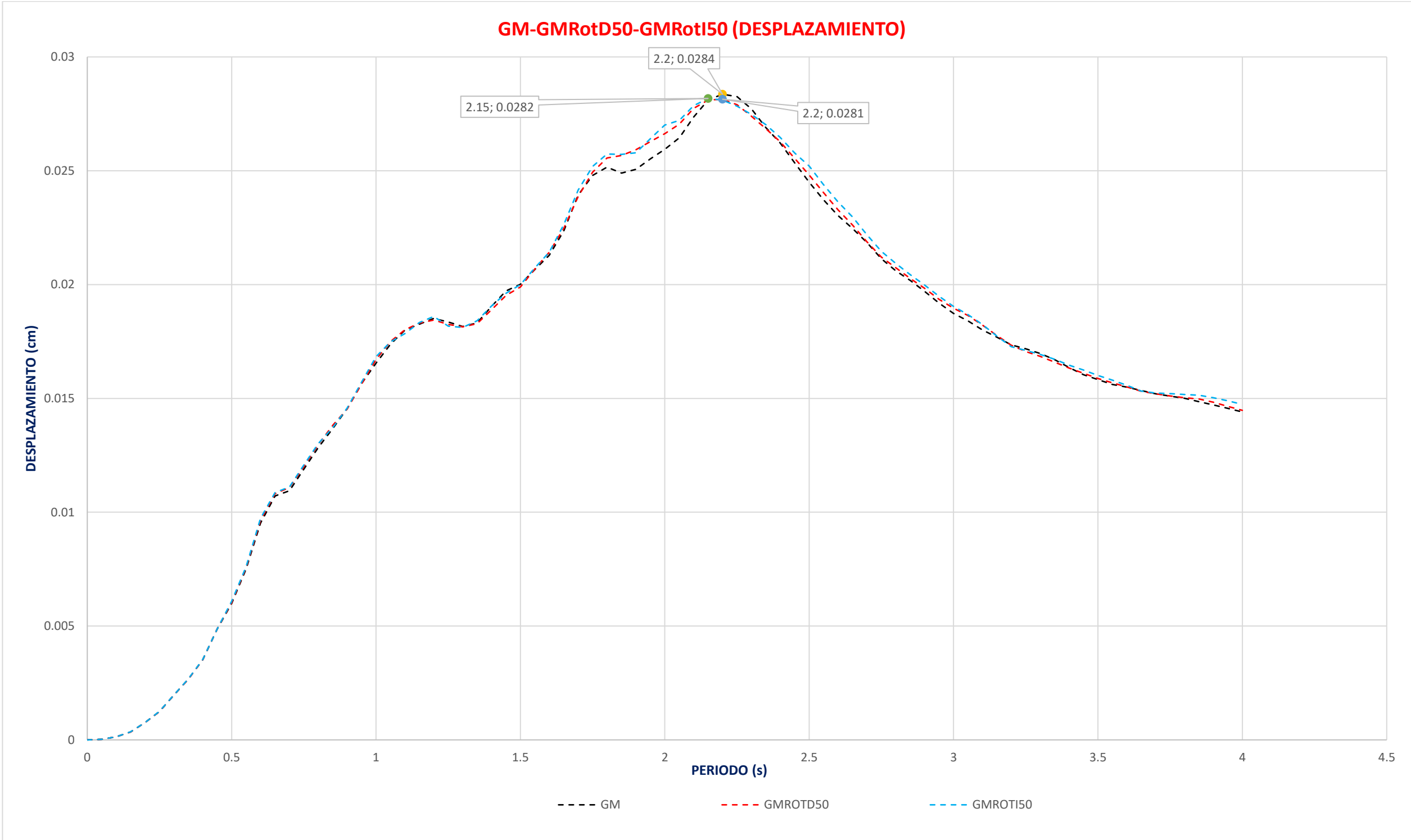
Para la MEDIA GEOMETRICA (GM), la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) y la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50), se obtiene que, para la GM, la ACELERACIÓN = 1.0489cm/s² y su PERIODO = 0.6s, para la GMRotD50 la ACELERACIÓN = 1.0621cm/s² y su PERIODO = 0.6s y para la GMRotI50 la ACELERACIÓN = 1.0683cm/s² y su PERIODO = 0.6s. Al comparar GM con GMRotD50 se obtiene una diferencia de 0.0133cm/s², al comparar GM con GMRotI50 se obtiene una diferencia de 0.0194cm/s² y al comparar GMRotD50 con GMRotI50 se obtiene una diferencia de 0.0061cm/s².

Figura 51. GM – GMRotD50 - GMRotI50 (VELOCIDAD) – UNC



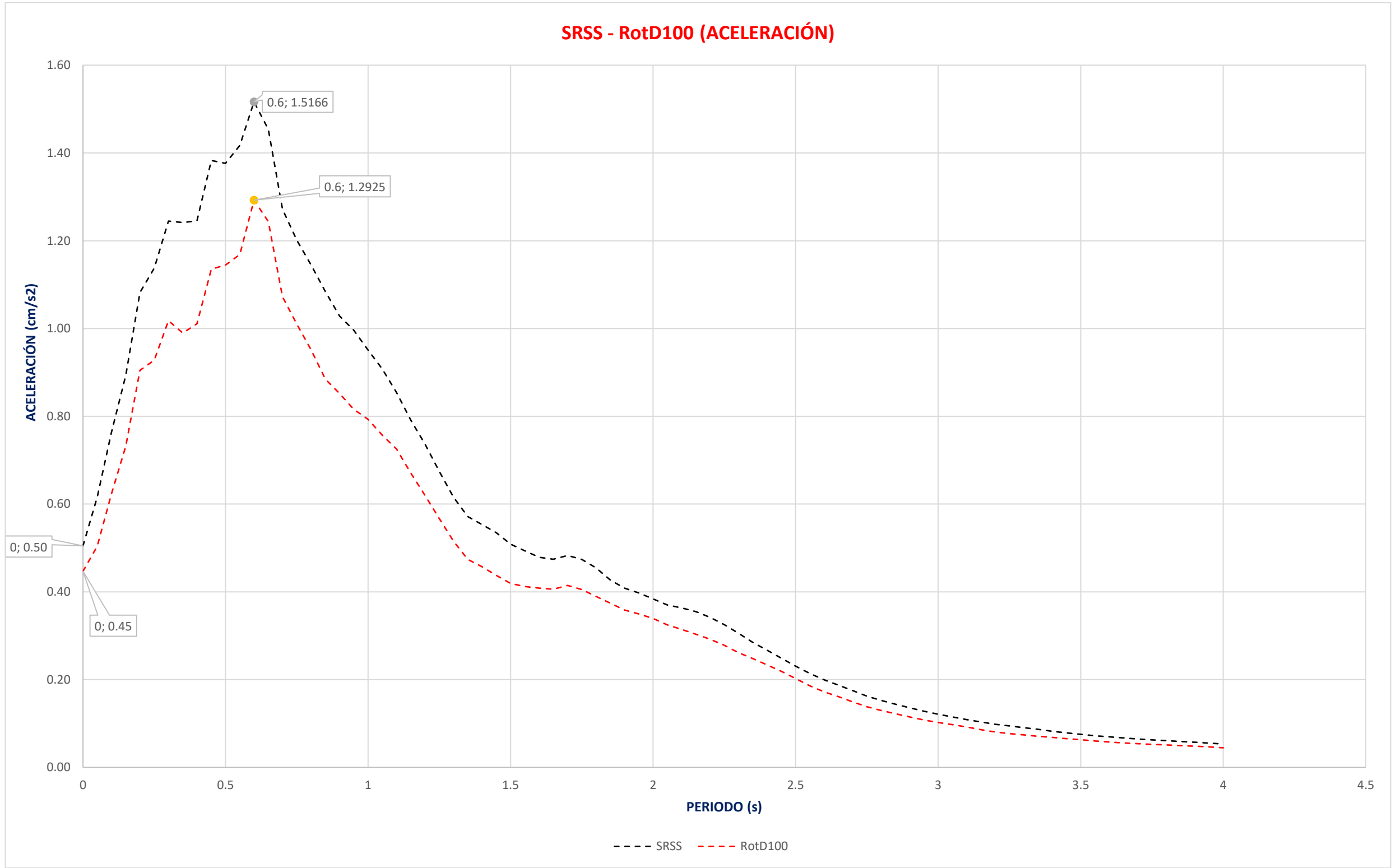
Para la MEDIA GEOMETRICA (GM), la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) y la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50), se obtiene que para la GM, la VELOCIDAD = 0.1090cm/s y su PERIODO = 1.05s, para la GMRotD50 la VELOCIDAD = 0.1090cm/s y su PERIODO = 1.0s y para la GMRotI50 la VELOCIDAD = 0.1111cm/s y su PERIODO = 1.0s. Al comparar GM con GMRotD50 se obtiene una diferencia de 0.0009cm/s, al comparar GM con GMRotI50 se obtiene una diferencia de 0.0021cm/s y al comparar GMRotD50 con GMRotI50 se obtiene una diferencia de 0.0011cm/s.

Figura 52. GM – GMRotD50 - GMRotI50 (DESPLAZAMIENTO) – UNC



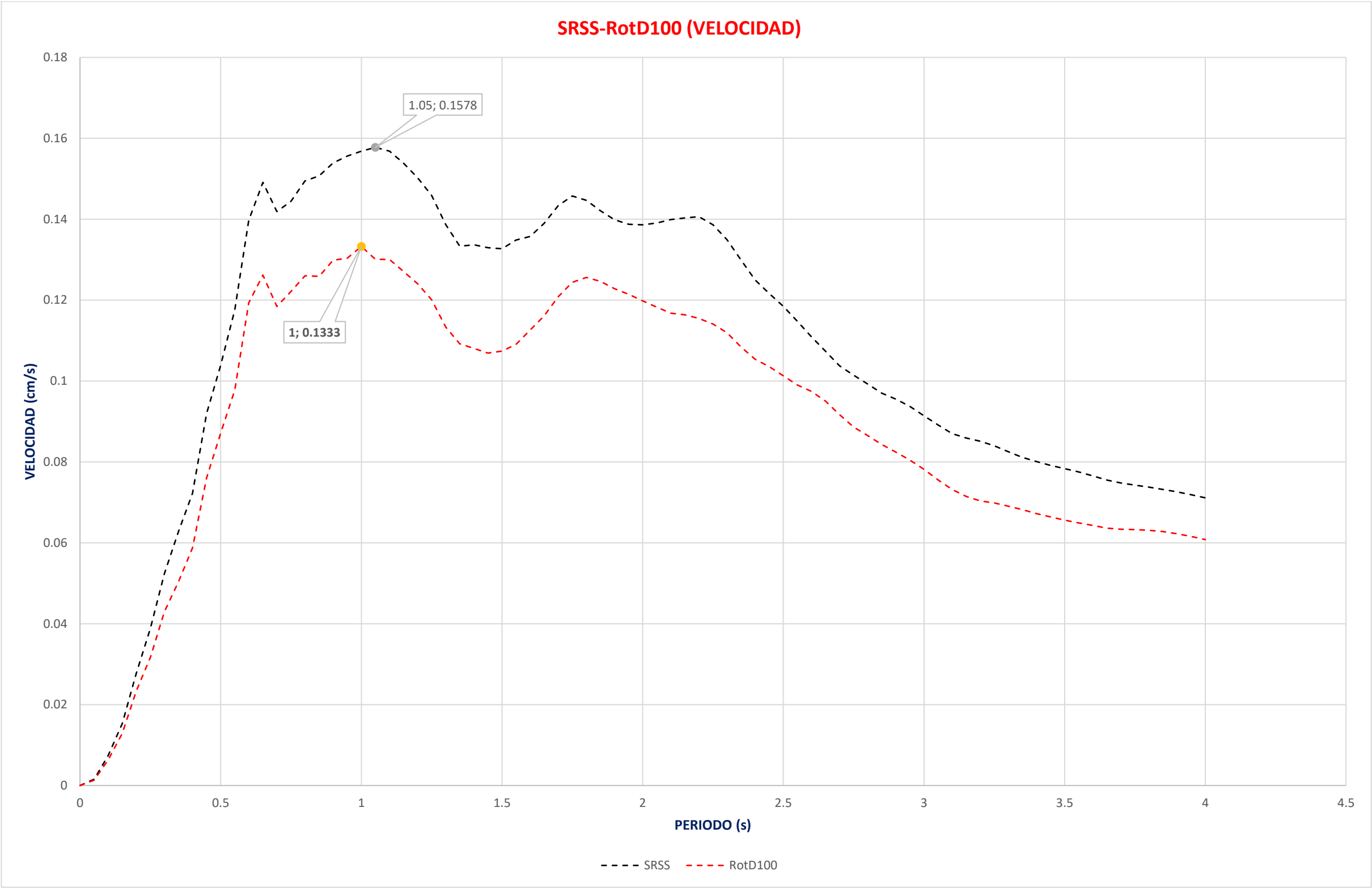
Para la MEDIA GEOMETRICA (GM), la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) y la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50), se obtiene que, para la GM, el DESPLAZAMIENTO = 0.0284cm y su PERIODO = 2.2s, para la GMRotD50 la DESPLAZAMIENTO = 0.0281cm y su PERIODO = 2.2s y para la GMRotI50 la DESPLAZAMIENTO = 0.0282cm y su PERIODO = 2.15s. Al comparar GM con GMRotD50 se obtiene una diferencia de 0.0.0002cm, al comparar GM con GMRotI50 se obtiene una diferencia de 0.0002cm y al comparar GMRotD50 con GMRotI50 se obtiene una diferencia de 0.0000cm.

Figura 53. SRSS - RotD100 (ACELERACIÓN) – UNC



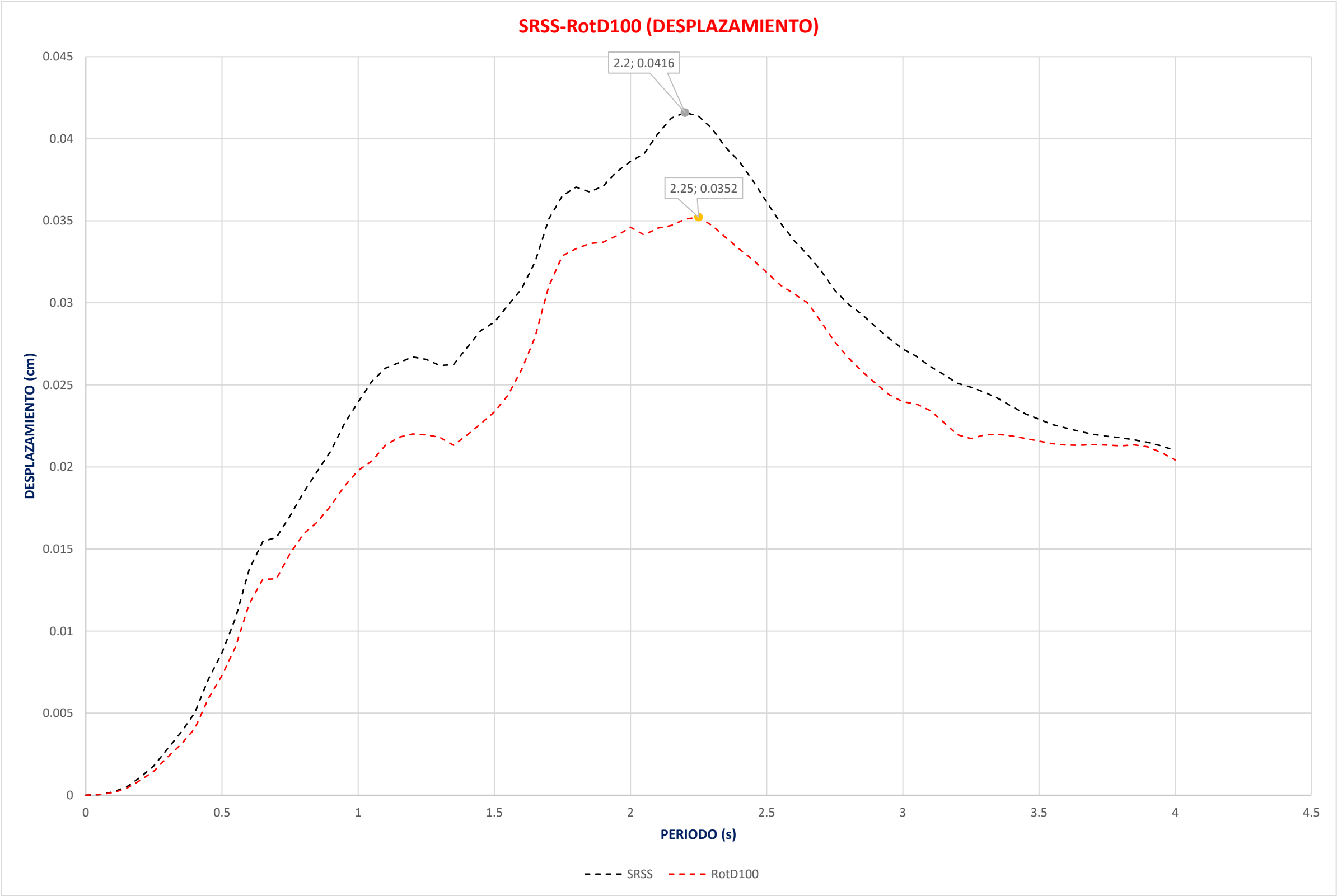
Para la RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS), y RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100), se obtiene que para la SRSS, la ACELERACIÓN = 1.5166cm/s² y su PERIODO = 0.6s, para la RotD100 la ACELERACIÓN = 1.2925cm/s² y su PERIODO = 0.6s. Al comparar SRSS con RotD100 se obtiene una diferencia de 0.2241cm/s².

Figura 54. SRSS - RotD100 (VELOCIDAD) – UNC



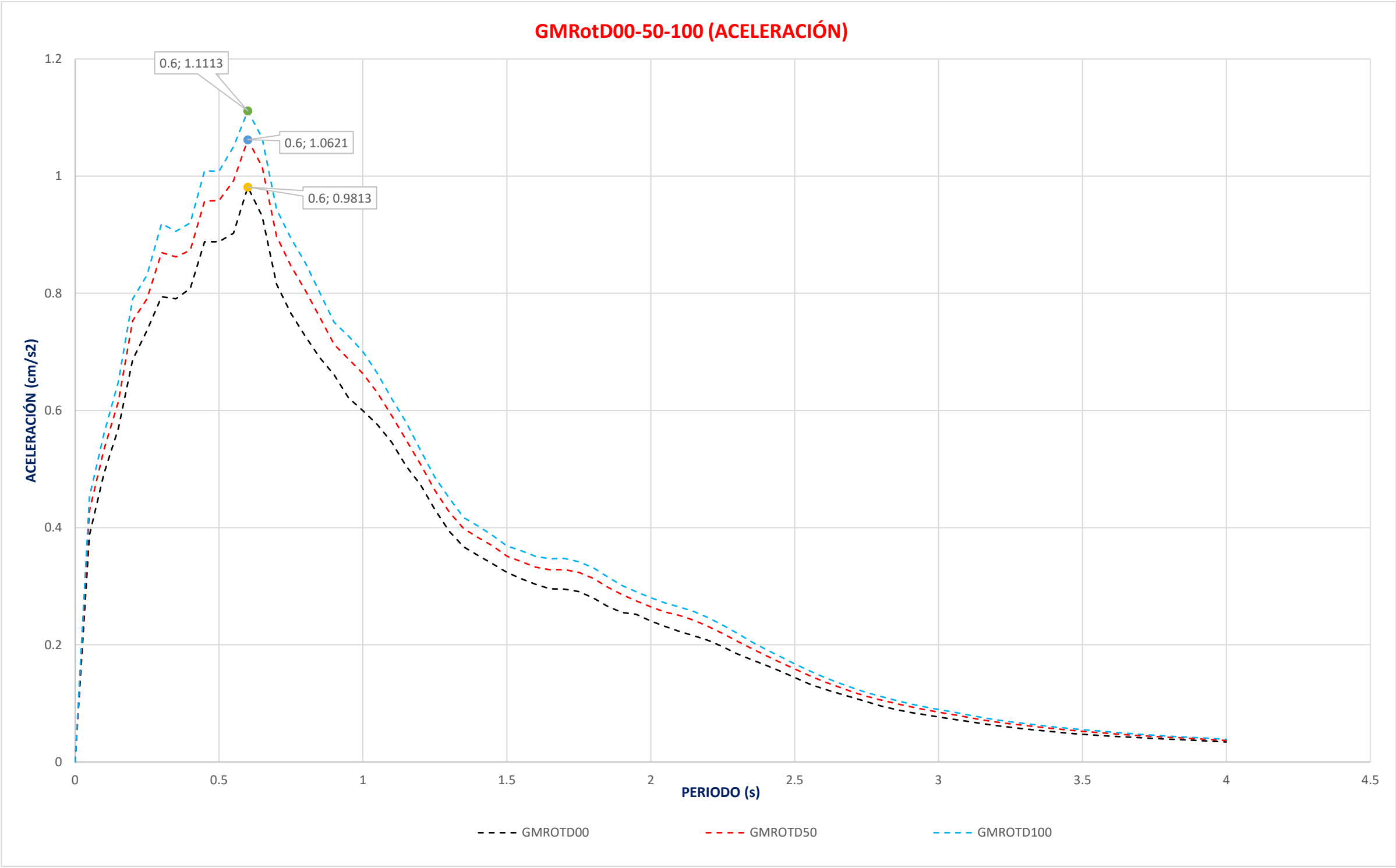
Para la RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS), y RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100), se obtiene que para la SRSS, la VELOCIDAD = 0.1578cm/s y su PERIODO = 1.05s, para la RotD100 la VELOCIDAD = 0.1333cm/s y su PERIODO = 1.0s. Al comparar SRSS con RotD100 se obtiene una diferencia de 0.0245cm/s.

Figura 55. SRSS - RotD100 (DESPLAZAMIENTO) – UNC



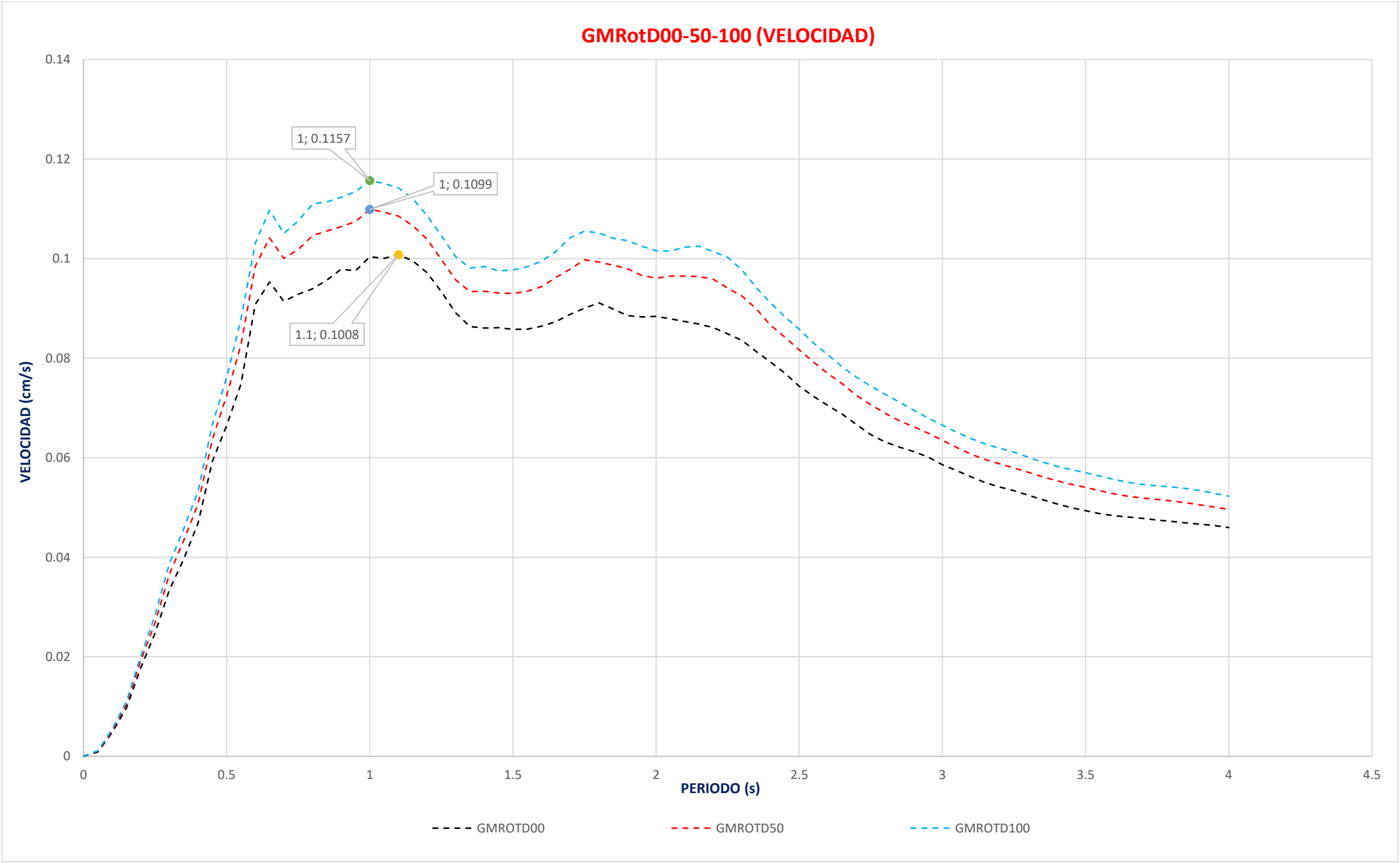
Para la RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS), y RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100), se obtiene que para la SRSS, la DESPLAZAMIENTO = 0.0416cm y su PERIODO = 2.2s, para la RotD100 la DESPLAZAMIENTO = 0.0352cm y su PERIODO = 2.25s. Al comparar SRSS con RotD100 se obtiene una diferencia de 0.0064cm.

Figura 56. GMRotD00 – 50 – 100 (ACELERACIÓN) – UNC



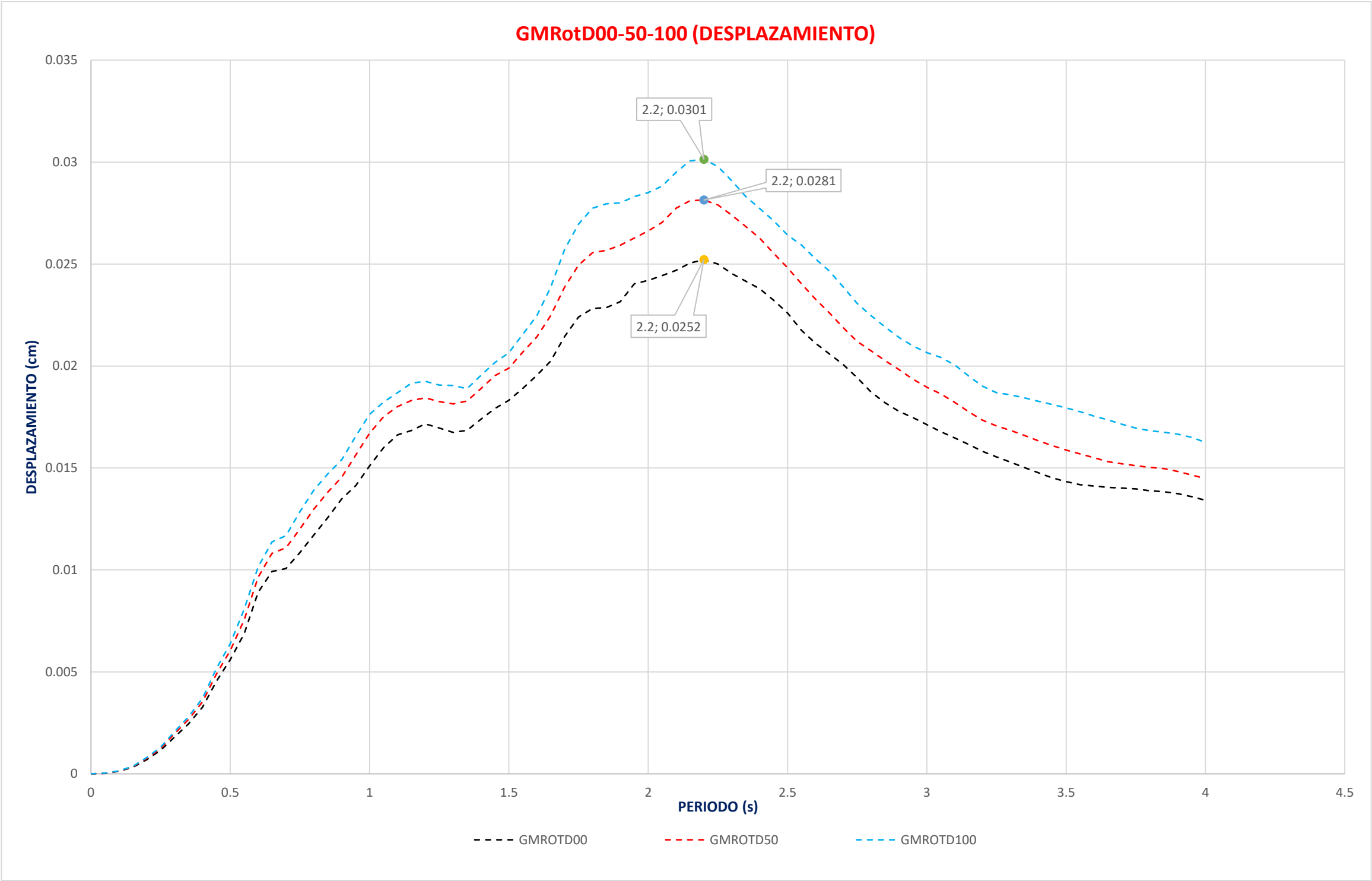
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00), la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) y la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100), se obtiene que, para la GMRotD00, la ACELERACIÓN = 0.9813cm/s² y su PERIODO = 0.6s, para la GMRotD50 la ACELERACIÓN = 1.0621cm/s² y su PERIODO = 0.6s y para la GMRotD100 la ACELERACIÓN = 1.1113cm/s² y su PERIODO = 0.6s. Al comparar GMRotD00 con GMRotD50 se obtiene una diferencia de 0.0808cm/s², al comparar GMRotD00 con GMRotD100 se obtiene una diferencia de 0.1300cm/s² y al comparar GMRotD50 con GMRotD100 se obtiene una diferencia de 0.0492cm/s².

Figura 57. GMRotD00 – 50 – 100 (VELOCIDAD) – UNC



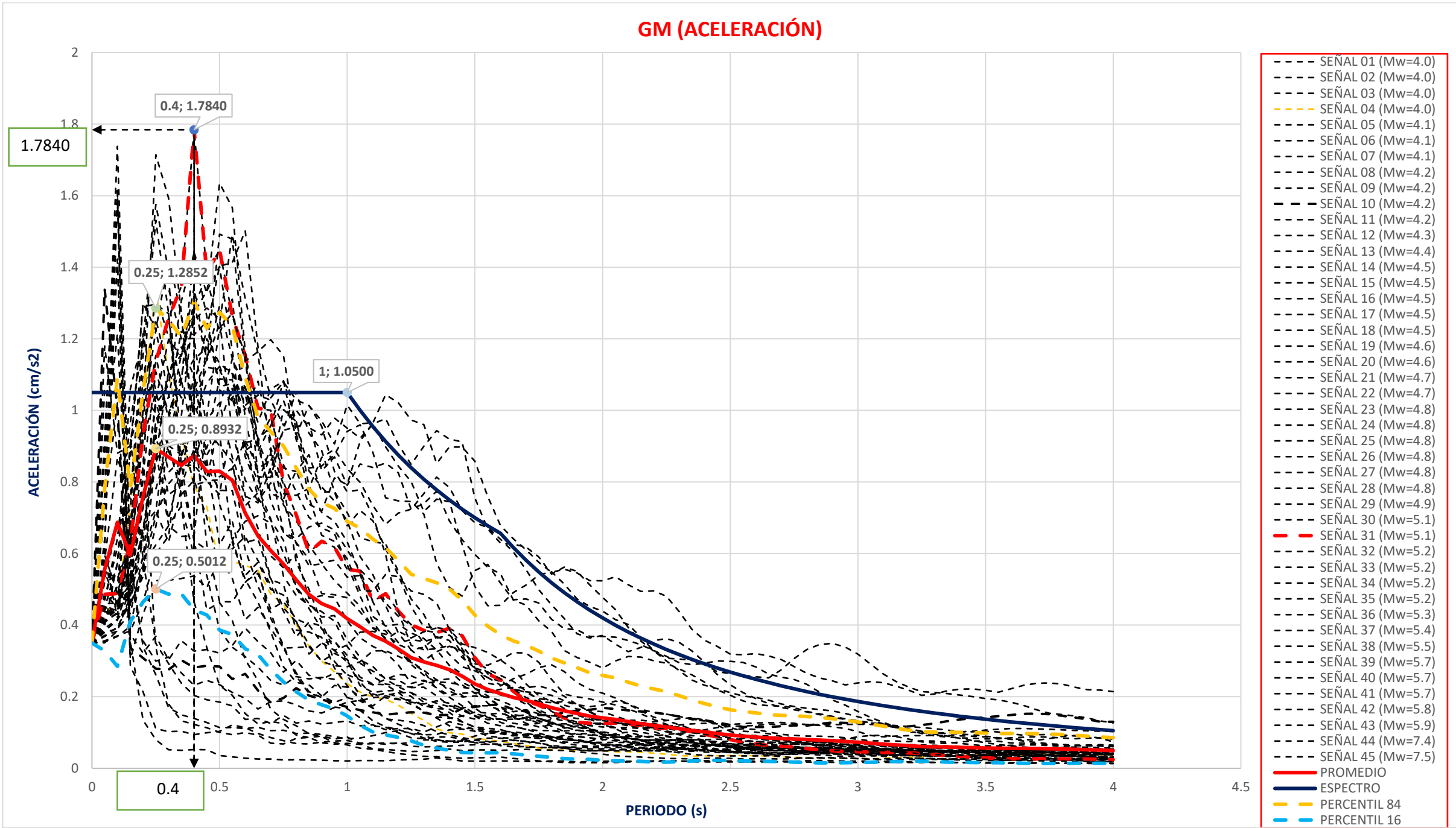
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00), la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) y la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100), se obtiene que, para la GMRotD00, la VELOCIDAD = 0.1008cm/s y su PERIODO = 1.1s, para la GMRotD50 la VELOCIDAD = 0.1099cm/s y su PERIODO = 1.0s y para la GMRotD100 la VELOCIDAD = 0.1157cm/s y su PERIODO = 1.0s. Al comparar GMRotD00 con GMRotD50 se obtiene una diferencia de 0.0091cm/s, al comparar GMRotD00 con GMRotD100 se obtiene una diferencia de 0.0149cm/s y al comparar GMRotD50 con GMRotD100 se obtiene una diferencia de 0.0058cm/s.

Figura 58. GMRotD00 – 50 – 100 (DESPLAZAMIENTO) – UNC



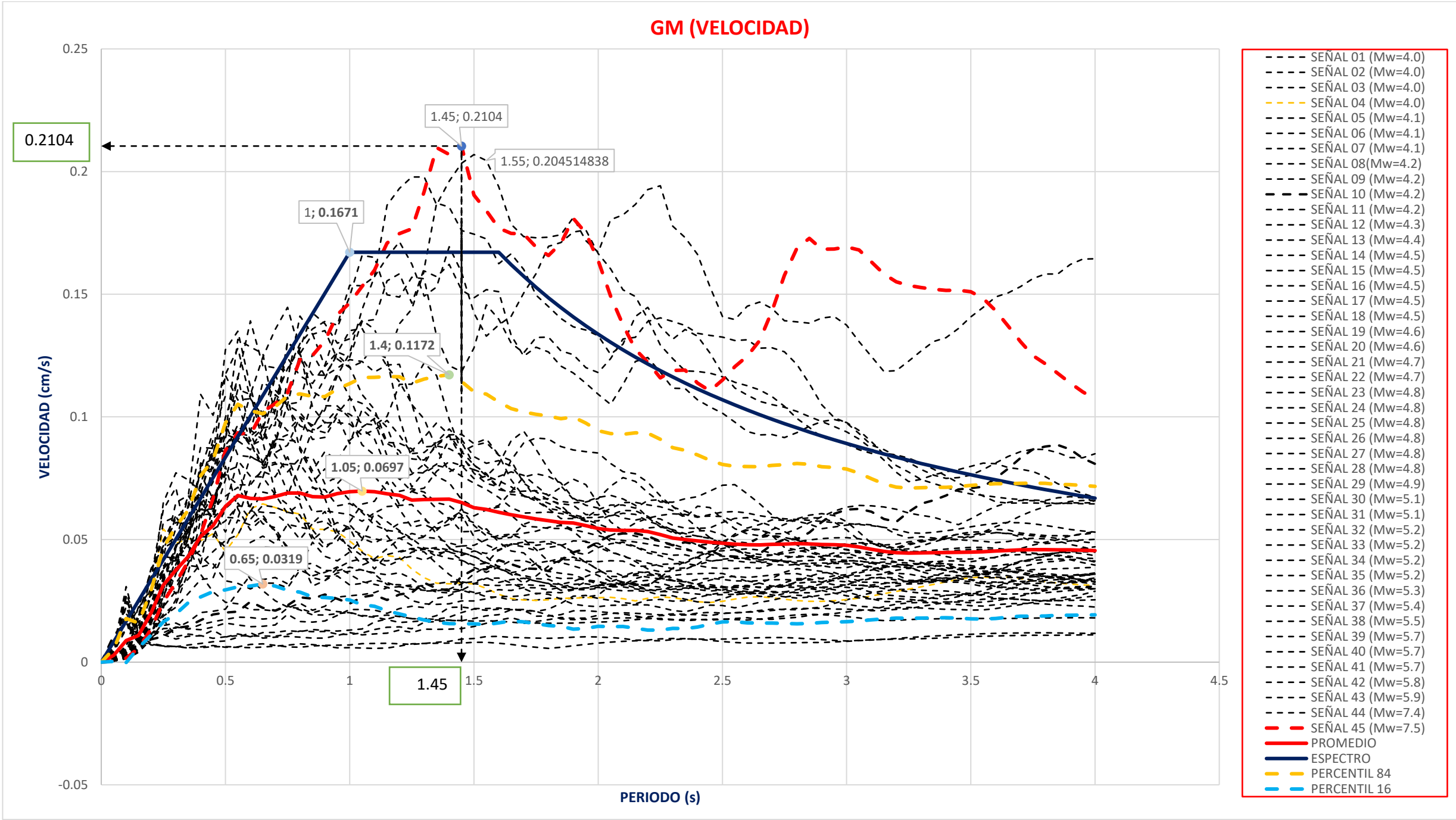
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00), la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) y la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100), se obtiene que, para la GMRotD00, la DESPLAZAMIENTO = 0.0252cm y su PERIODO = 2.2s, para la GMRotD50 la DESPLAZAMIENTO = 0.0281cm y su PERIODO = 2.2s y para la GMRotD100 la DESPLAZAMIENTO = 0.0301cm y su PERIODO = 2.2s. Al comparar GMRotD00 con GMRotD50 se obtiene una diferencia de 0.0029cm, al comparar GMRotD00 con GMRotD100 se obtiene una diferencia de 0.0049cm y al comparar GMRotD50 con GMRotD100 se obtiene una diferencia de 0.0020cm.

Figura 59. MEDIA GEOMETRICA (GM) - ACELERACIÓN – CIP



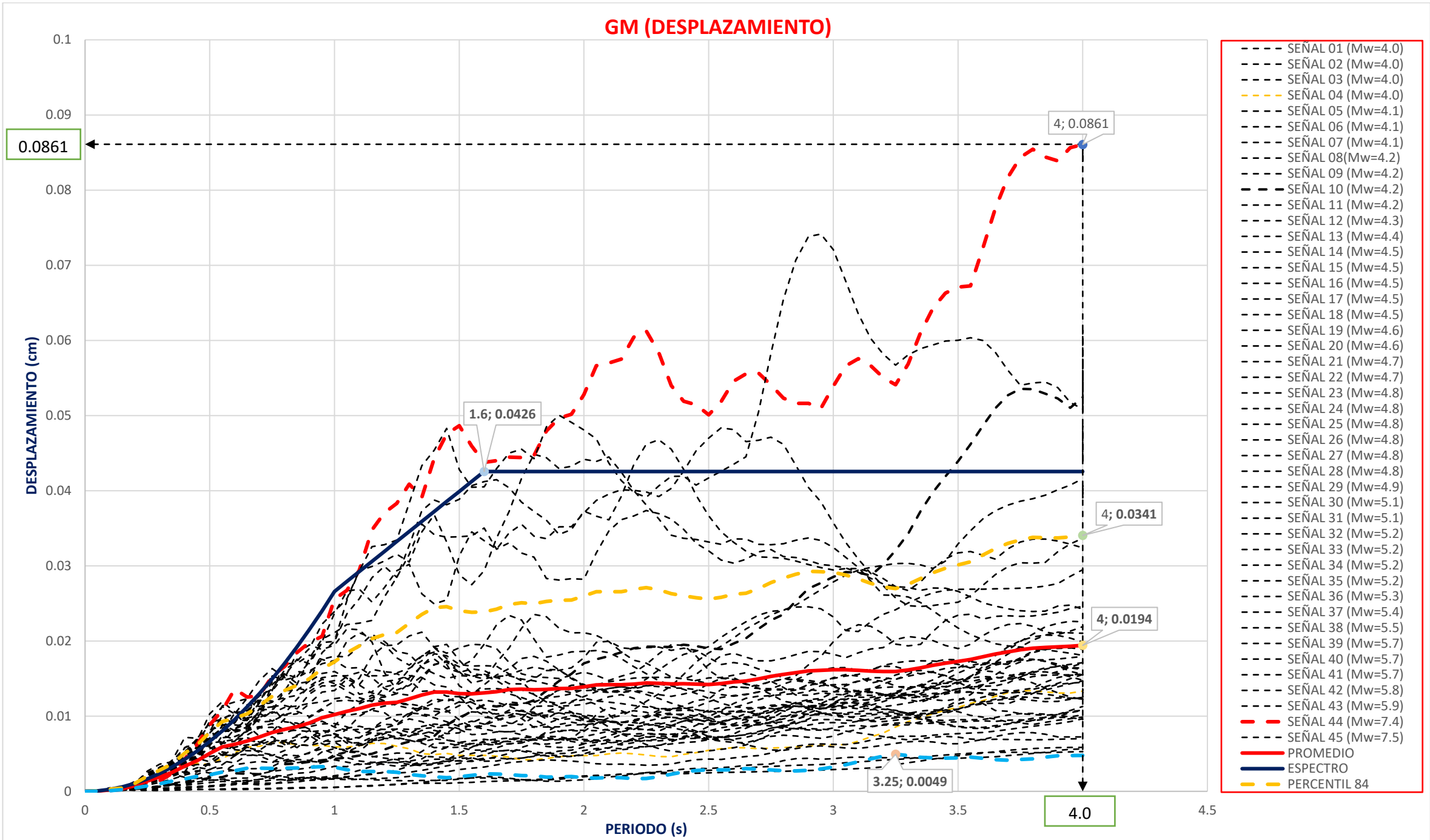
Para la MEDIA GEOMETRICA (GM) se obtiene que la señal 31 cuya $M_w = 5.1$ y nos arroja que la ACELERACIÓN = 1.7840 cm/s², para un PERIODO = 0.4 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la ACELERACIÓN = 0.8932 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.2852 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 0.5012 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 5.1$, que es 0.25s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.1568 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.1$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.7340 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.1$, con el promedio de las 45 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 0.8908 cm/s².

Figura 60. MEDIA GEOMETRICA (GM) - VELOCIDAD – CIP



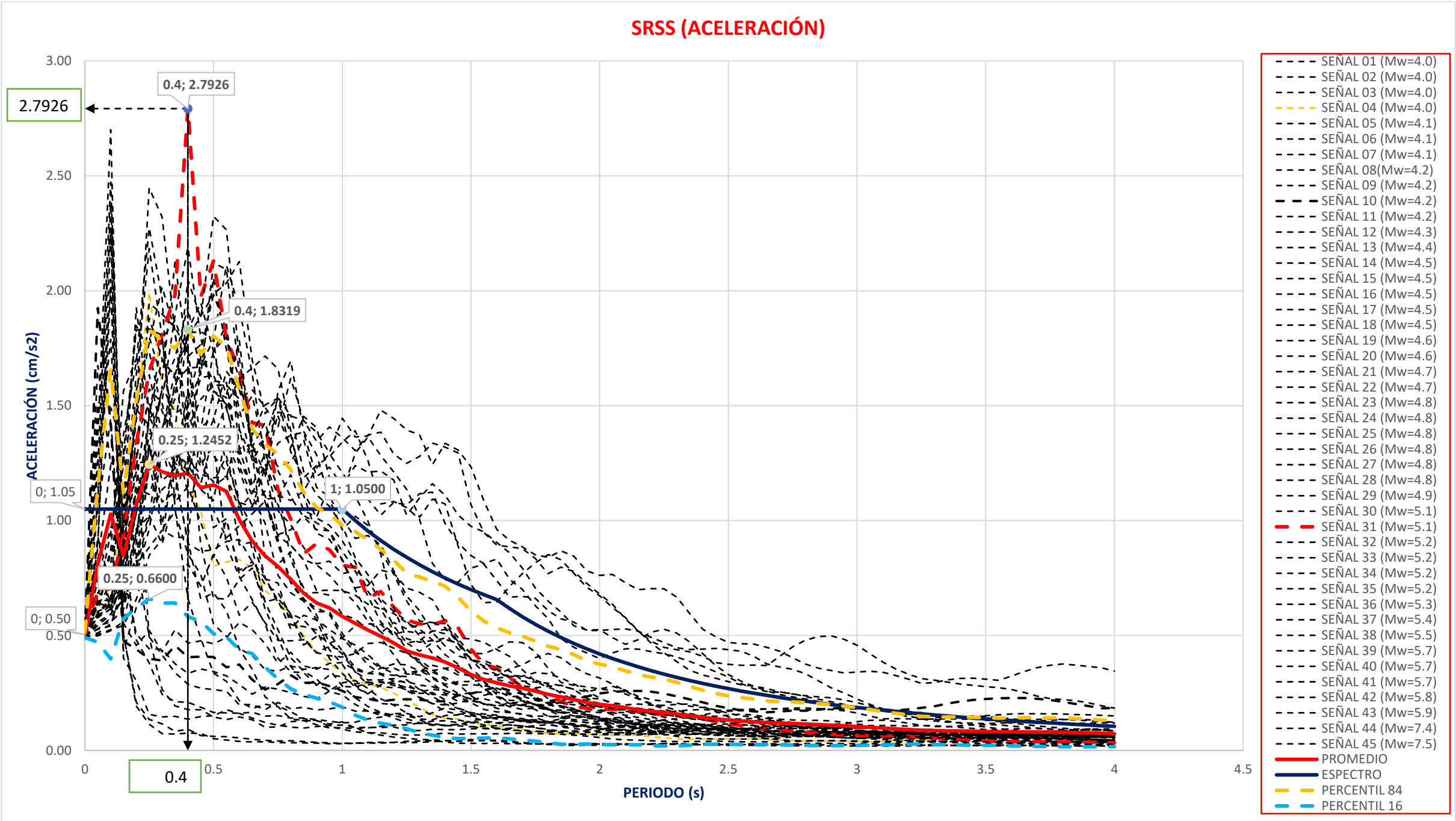
Para la MEDIA GEOMETRICA (GM) se obtiene que la señal 45 cuya $M_w = 7.5$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.2104 cm/s, para un PERIODO = 1.45 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.0697 cm/s, para un PERIODO = 1.05s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1172 cm/s, para un PERIODO = 1.4s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0319 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.5$, que es 1.45s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0974 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.5$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0433 cm/s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 45 de $M_w = 7.5$ obtenemos que se diferencian en 0.1407 cm/s.

Figura 61. MEDIA GEOMETRICA (GM) - DESPLAZAMIENTO – CIP



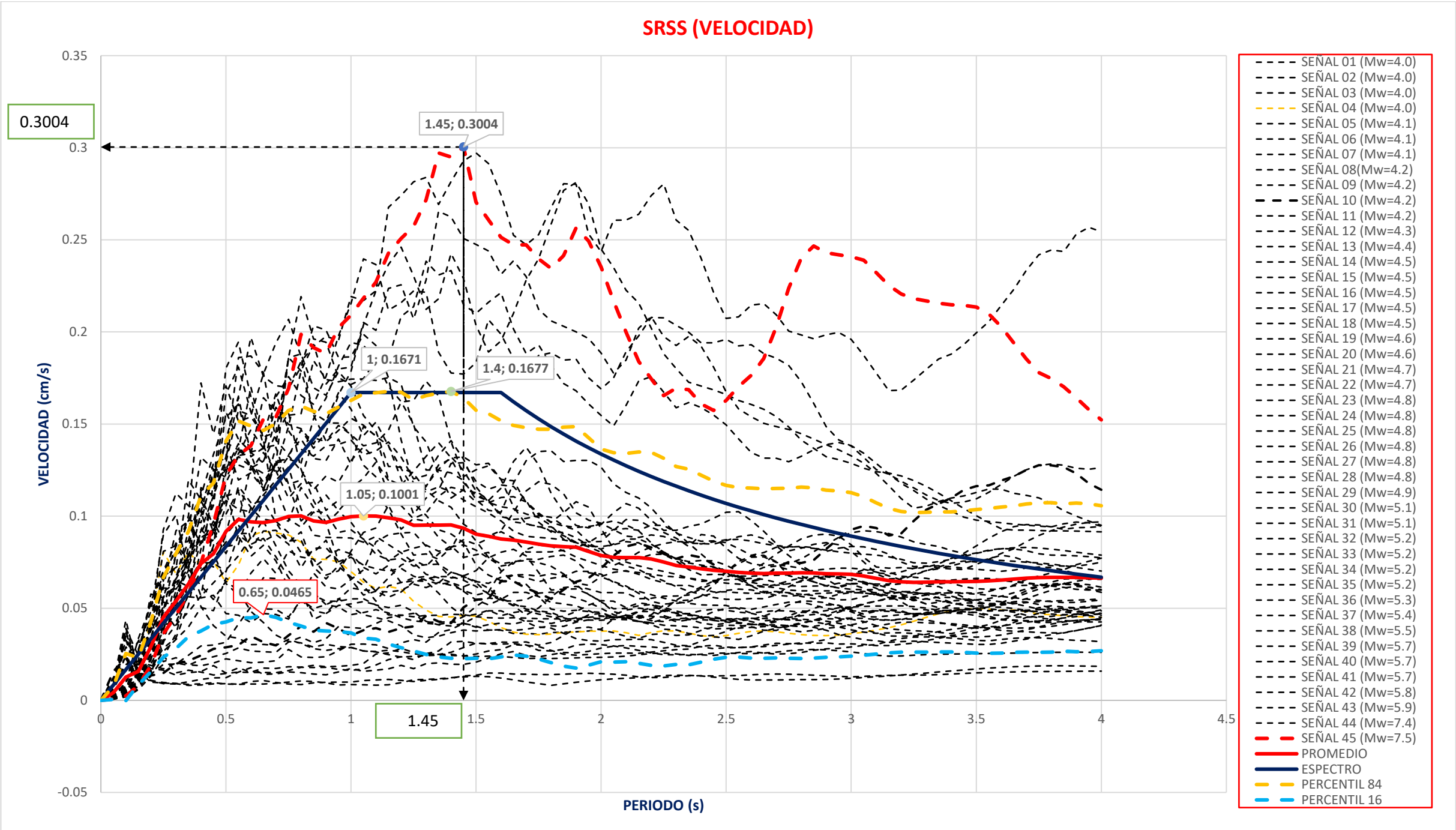
Para la MEDIA GEOMETRICA (GM) se obtiene que la señal 44 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.0861 cm, para un PERIODO = 4.0 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0194 cm, para un PERIODO = 4.0s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0341 cm, para un PERIODO = 4.0s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0049 cm, para un PERIODO = 3.25s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 4.0s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0232 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0435cm. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 44 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.0667 cm.

Figura 62. RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) - ACELERACIÓN – CIP



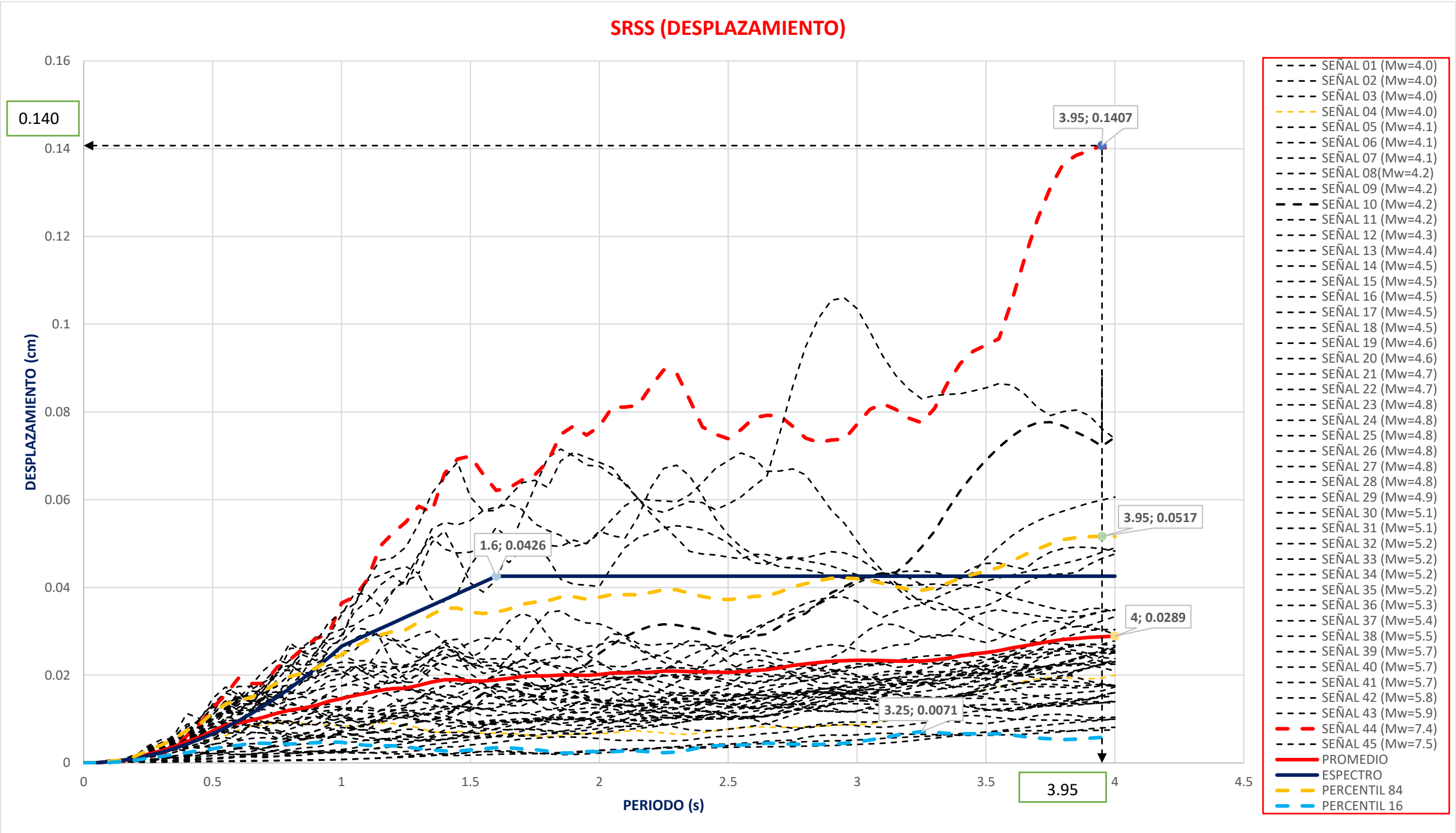
Para la RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) se obtiene que la señal 31 cuya $M_w = 5.1$ y nos arroja que la ACELERACIÓN = 2.7926 cm/s², para un PERIODO = 0.40 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la ACELERACIÓN = 1.2452 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.8319 cm/s², para un PERIODO = 0.4s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.0060 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 5.1$, que es 0.40s. Al comparar el promedio las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.1952 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.1$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 1.7426 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.1$, con el promedio de las 45 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 1.5474 cm/s².

Figura 63. RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) - VELOCIDAD – CIP



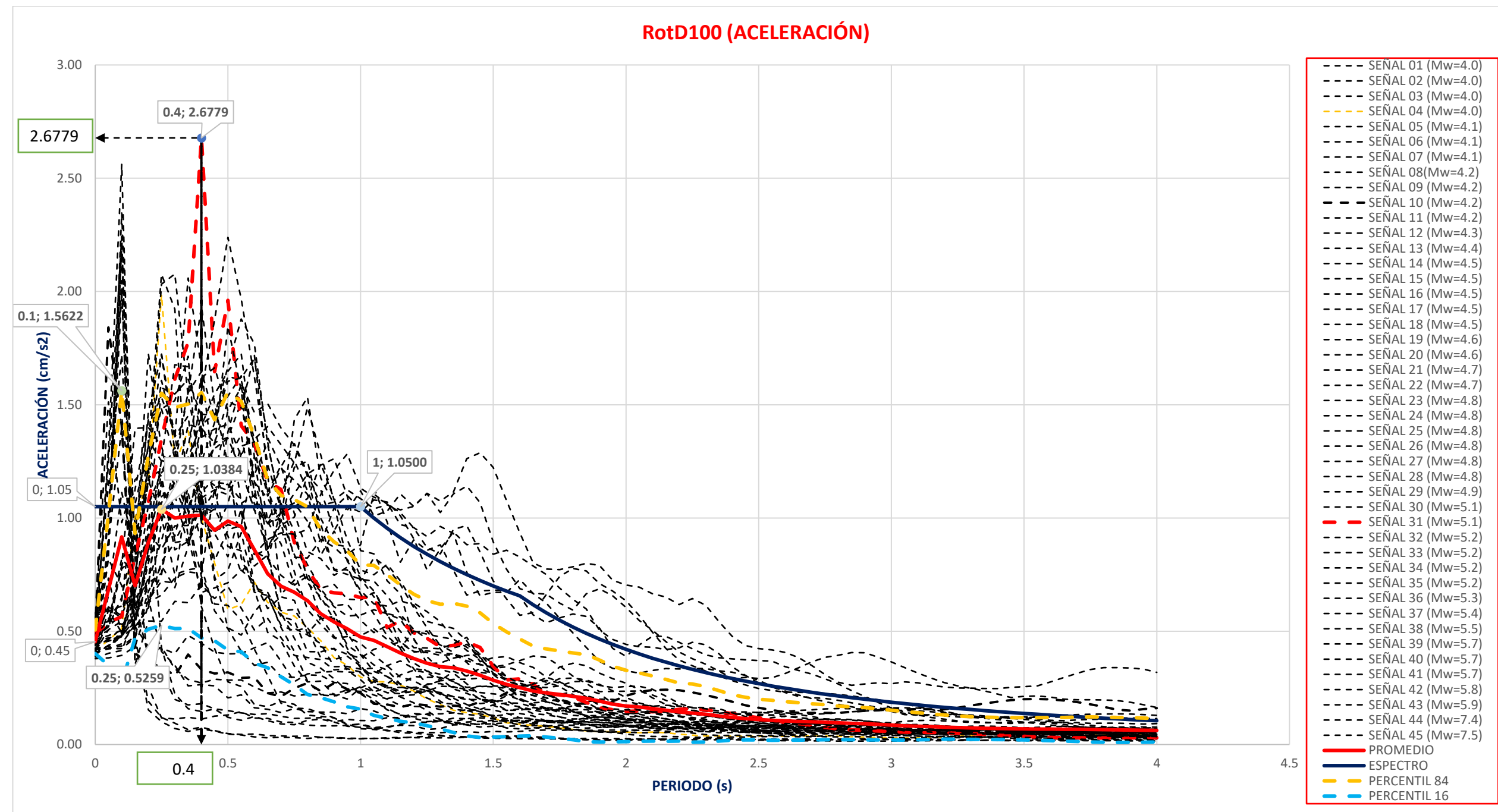
Para la RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) se obtiene que la señal 45 cuya $M_w = 7.5$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.3004 cm/s, para un PERIODO = 1.45 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.1001 cm/s, para un PERIODO = 1.05s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1677 cm/s, para un PERIODO = 1.4s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0465 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.5$, que es 1.45s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0670 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.5$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.1333 cm/s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 45 de $M_w = 7.5$ obtenemos que se diferencian en 0.2003 cm/s.

Figura 64. RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) - DESPLAZAMIENTO – CIP



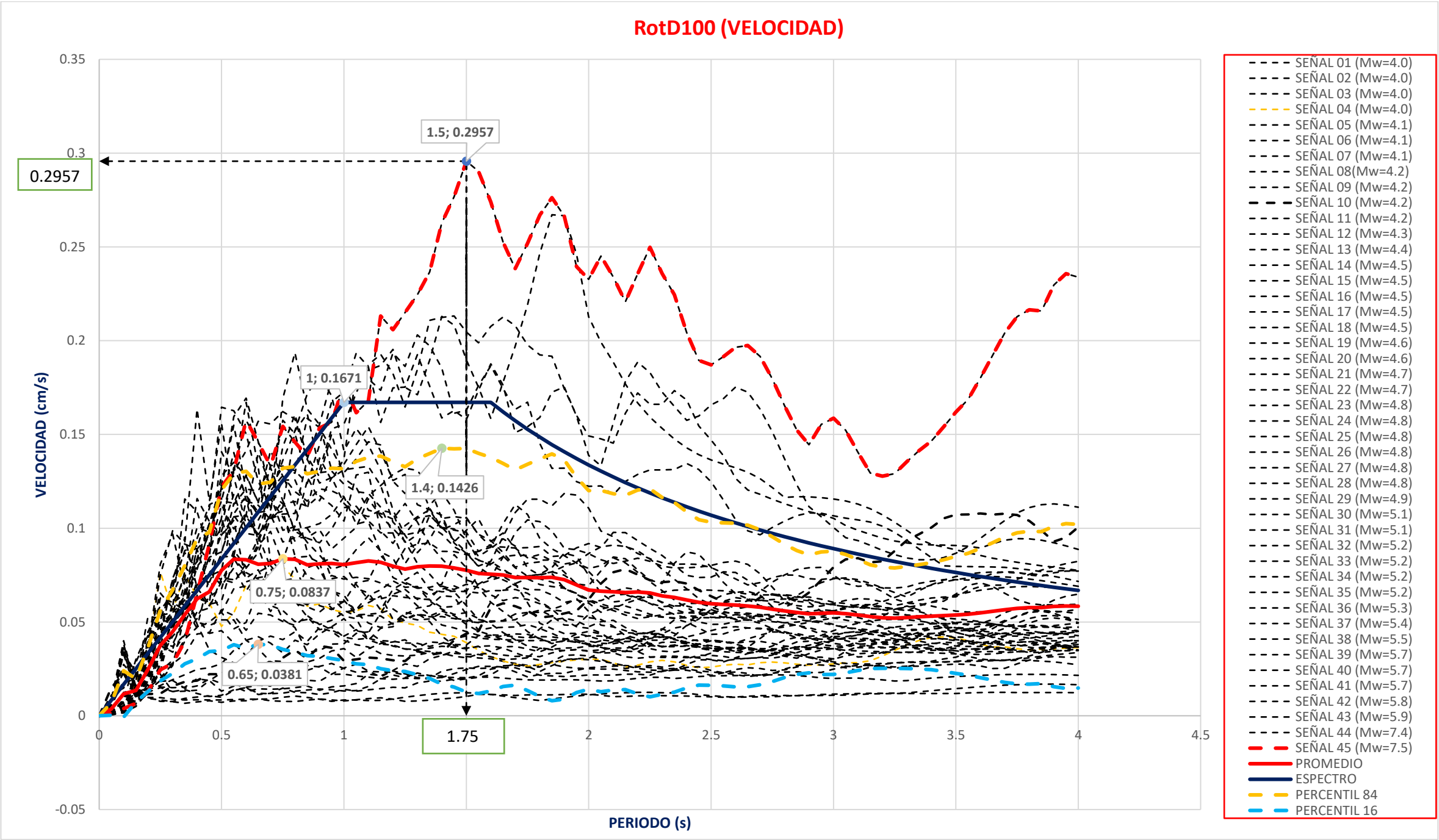
Para la RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS) se obtiene que la señal 44 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.1407 cm, para un PERIODO = 3.95 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0289 cm, para un PERIODO = 4.0s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0517 cm, para un PERIODO = 3.95s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0071 cm, para un PERIODO = 3.25s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 3.95s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0137 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0981cm. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 44 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.1118 cm.

Figura 65. RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) – ACELERACIÓN – CIP



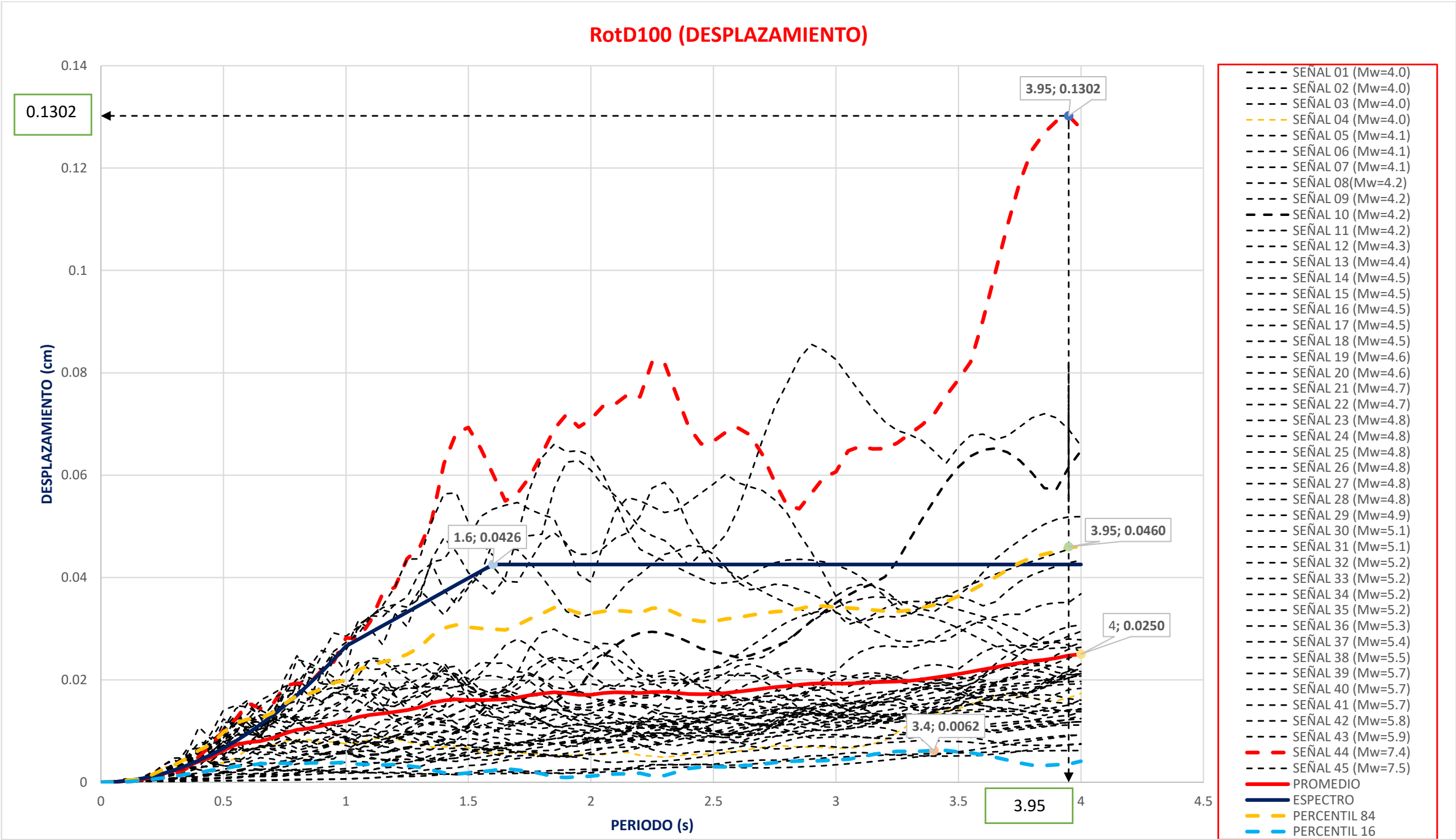
Para la RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) se obtiene que la señal 31 cuya $M_w = 5.1$ y nos arroja que la ACELERACIÓN = 2.6779 cm/s², para un PERIODO = 0.4 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la ACELERACIÓN = 1.0384 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.5622 cm/s², para un PERIODO = 0.1s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 0.5259 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 5.5$, que es 0.4s. Al comparar el promedio las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0116 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.1$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 1.6279 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.1$, con el promedio de las 45 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 1.6395 cm/s².

Figura 66. RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) – VELOCIDAD – CIP



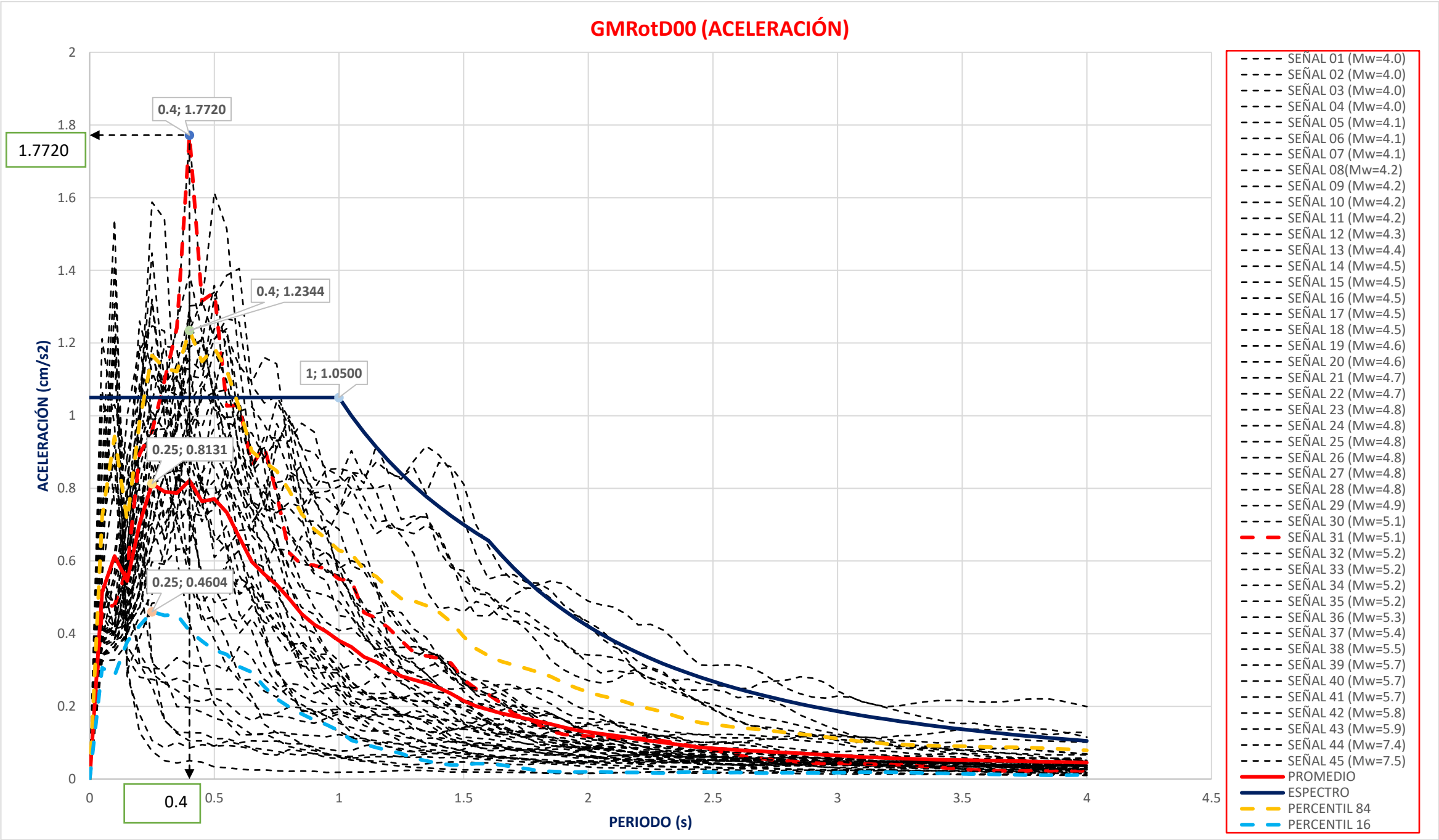
Para la RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) se obtiene que la señal 45 cuya $M_w = 7.5$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.2957 cm/s, para un PERIODO = 1.5 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.0837 cm/s, para un PERIODO = 0.75s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1426 cm/s, para un PERIODO = 1.4s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0381 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.5$, que es 1.75s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0834 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.5$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.1286 cm/s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 45 de $M_w = 7.5$ obtenemos que se diferencian en 0.2120 cm/s.

Figura 67. RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) – DESPLAZAMIENTO – CIP



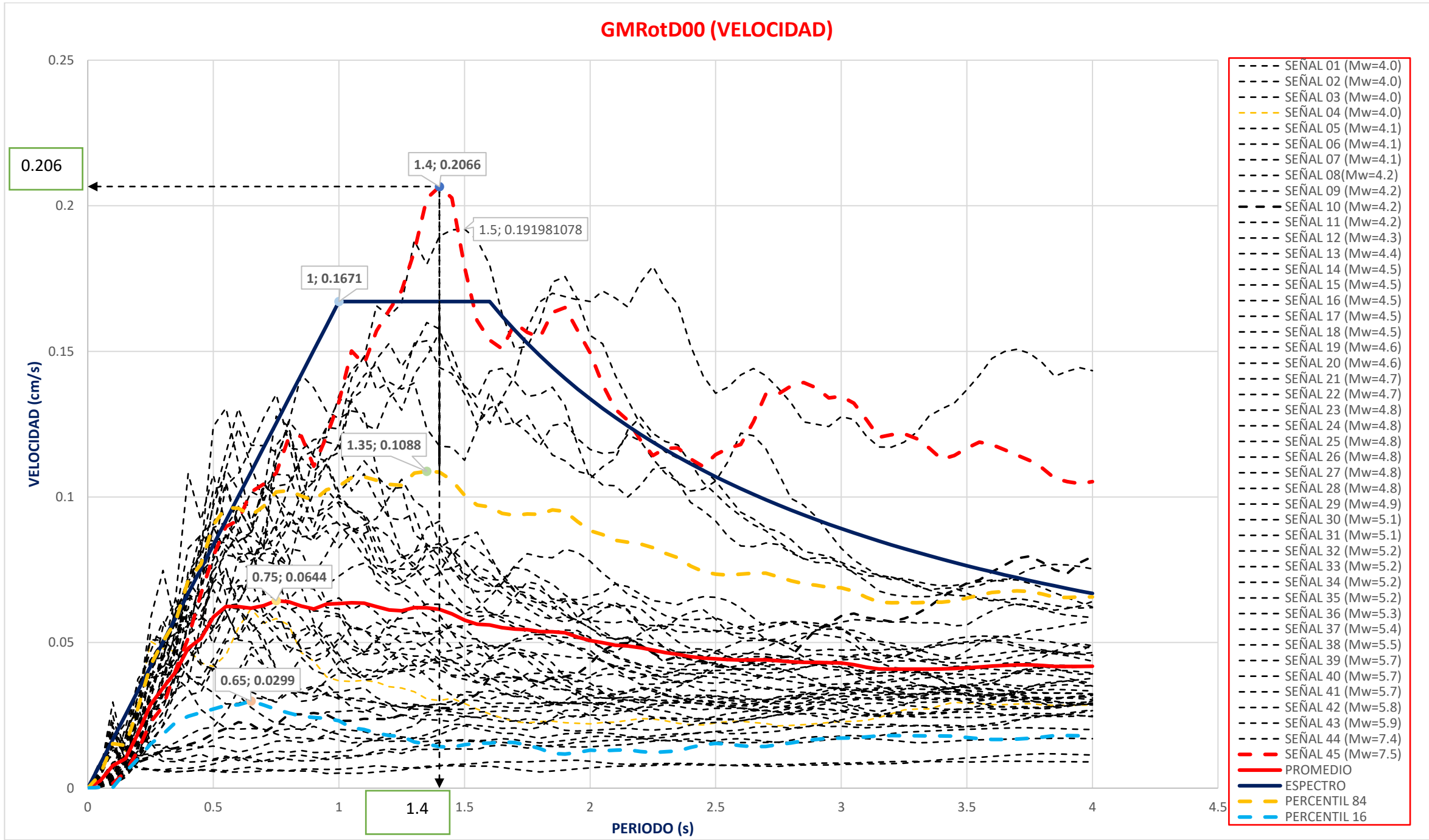
Para la RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100) se obtiene que la señal 44 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.1302 cm, para un PERIODO = 3.95 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene el DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0250 cm, para un PERIODO = 4.0s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0460 cm, para un PERIODO = 3.95s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0062 cm, para un PERIODO = 3.4s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 3.95s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0176 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0876. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 44 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.1052 cm.

Figura 68. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) – ACELERACIÓN – CIP



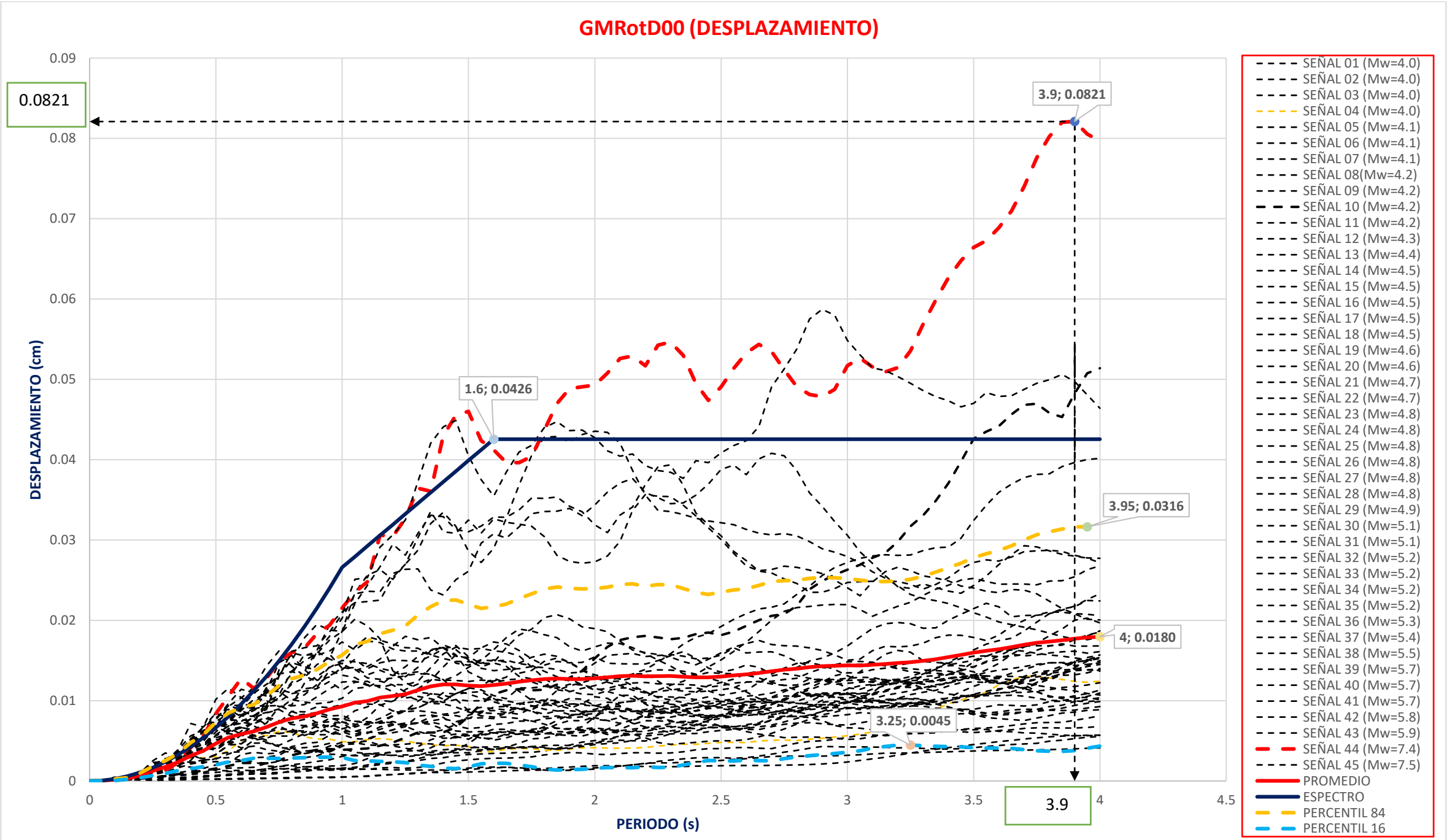
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) se obtiene que la señal 31 cuya Mw = 5.1 y nos arroja que la ACELERACIÓN = 1.7720 cm/s², para un PERIODO = 0.40 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la ACELERACIÓN = 0.8131 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.2344 cm/s², para un PERIODO = 0.40s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 0.4604 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la Mw = 5.1, que es 0.40s. Al comparar el promedio las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.2369 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de Mw = 5.1, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.7220 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de Mw = 5.1, con el promedio de las 45 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 0.9589 cm/s².

Figura 69. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) – VELOCIDAD – CIP



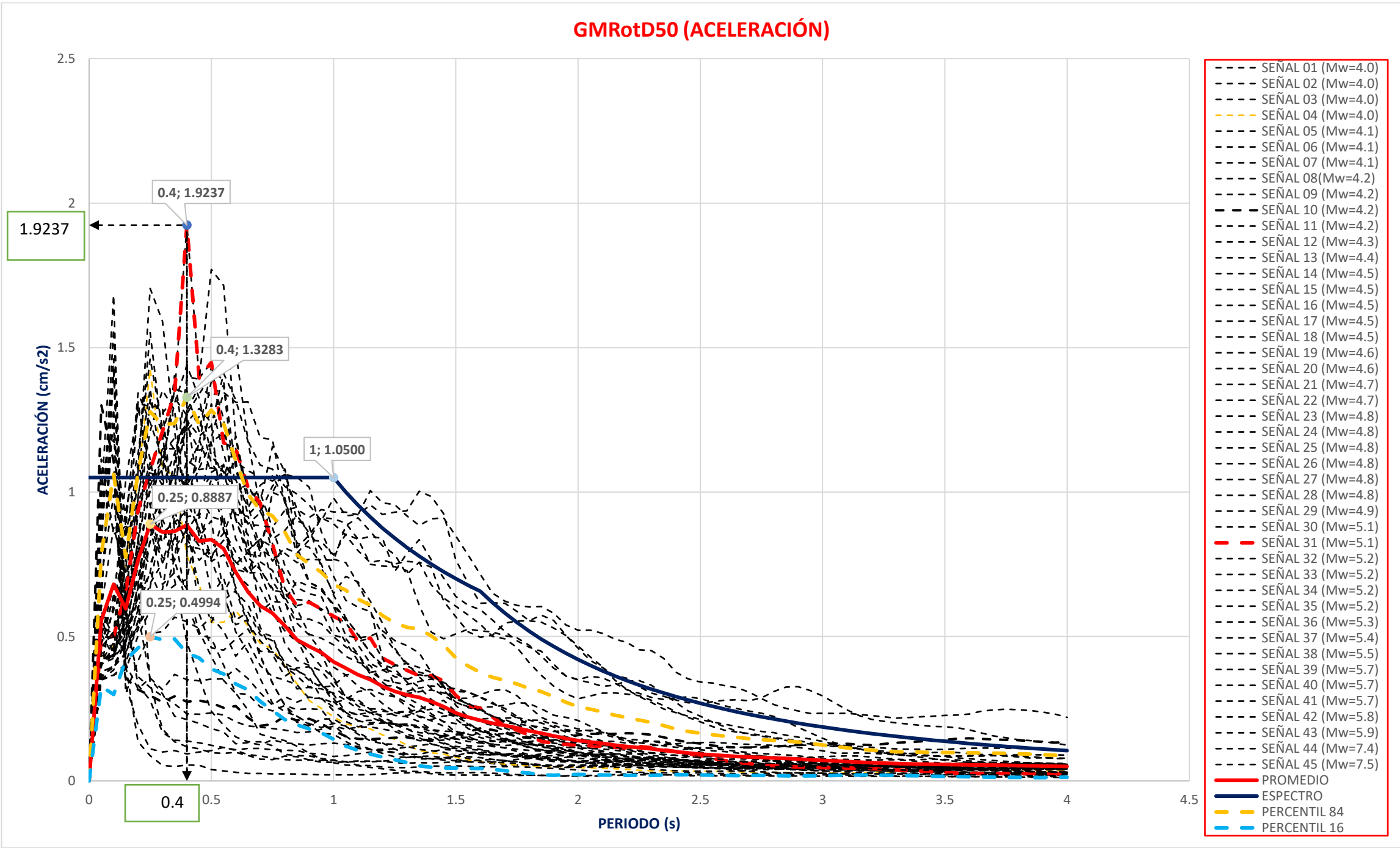
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) se obtiene que la señal 45 cuya Mw = 7.5 y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.2066 cm/s, para un PERIODO = 1.4 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.0644 cm/s, para un PERIODO = 0.75s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1088 cm/s, para un PERIODO = 1.35s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0299 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la Mw = 7.5, que es 1.4s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.1027 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de Mw = 7.5, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0395 cm/s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 45 de Mw = 7.5 obtenemos que se diferencian en 0.1422 cm/s.

Figura 70. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) – DESPLAZAMIENTO – CIP



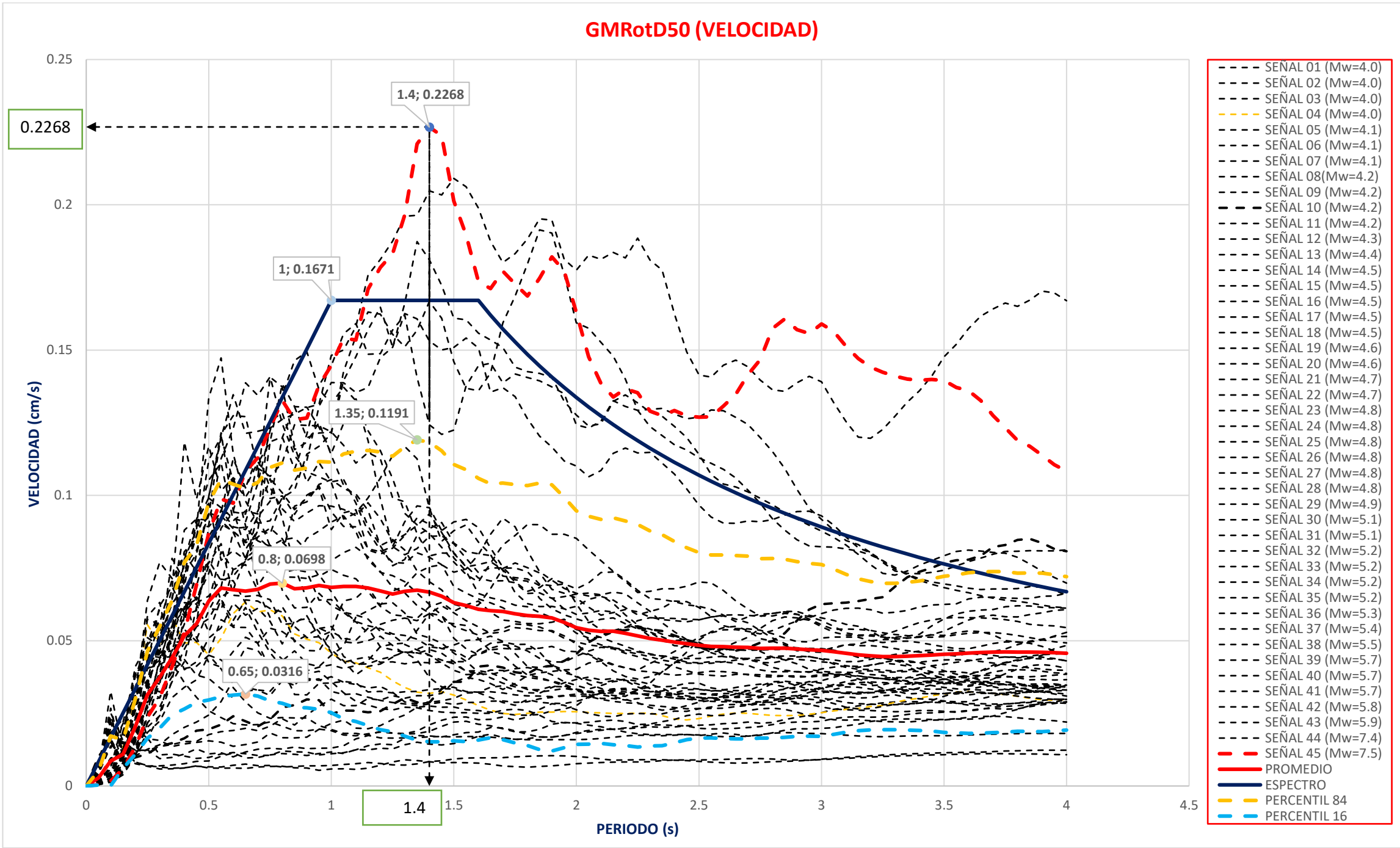
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00) se obtiene que la señal 44 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.0821 cm, para un PERIODO = 3.9 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene el DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0180 cm, para un PERIODO = 4.0s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0316 cm, para un PERIODO = 3.95s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0045 cm, para un PERIODO = 3.25s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 3.9s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0246 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0395cm. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 44 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.0641 cm.

Figura 71. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) – ACELERACIÓN – CIP



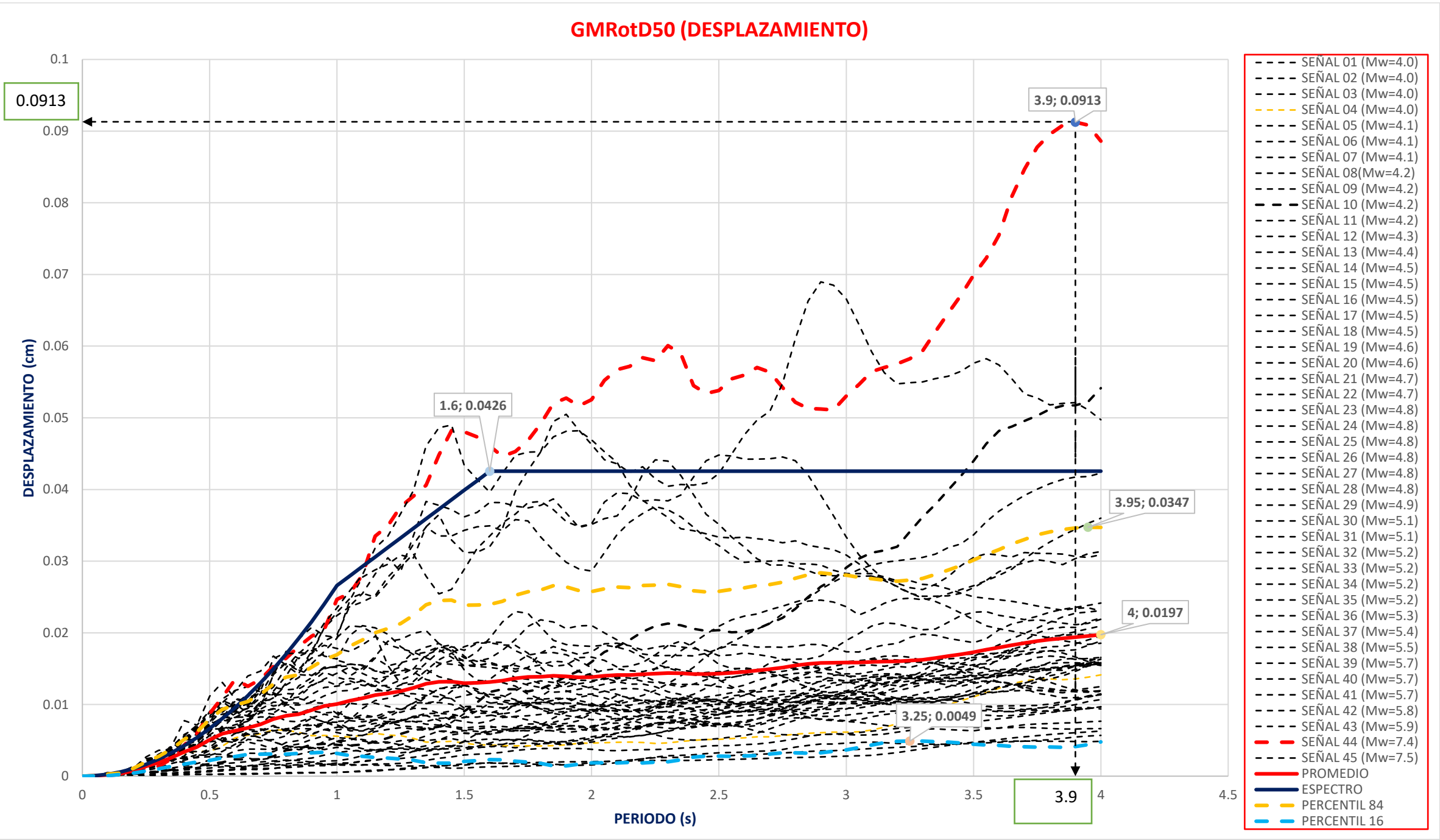
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) se obtiene que la señal 31 cuya $M_w = 5.1$ y nos arroja que la ACELERACIÓN = 1.9237 cm/s², para un PERIODO = 0.40 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la ACELERACIÓN = 1.8887 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.3283 cm/s², para un PERIODO = 0.40s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 0.4994 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 5.1$, que es 0.40s. Al comparar el promedio las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.1631 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.1$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.8737 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.1$, con el promedio de las 45 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 1.0350 cm/s².

Figura 72. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) – VELOCIDAD – CIP



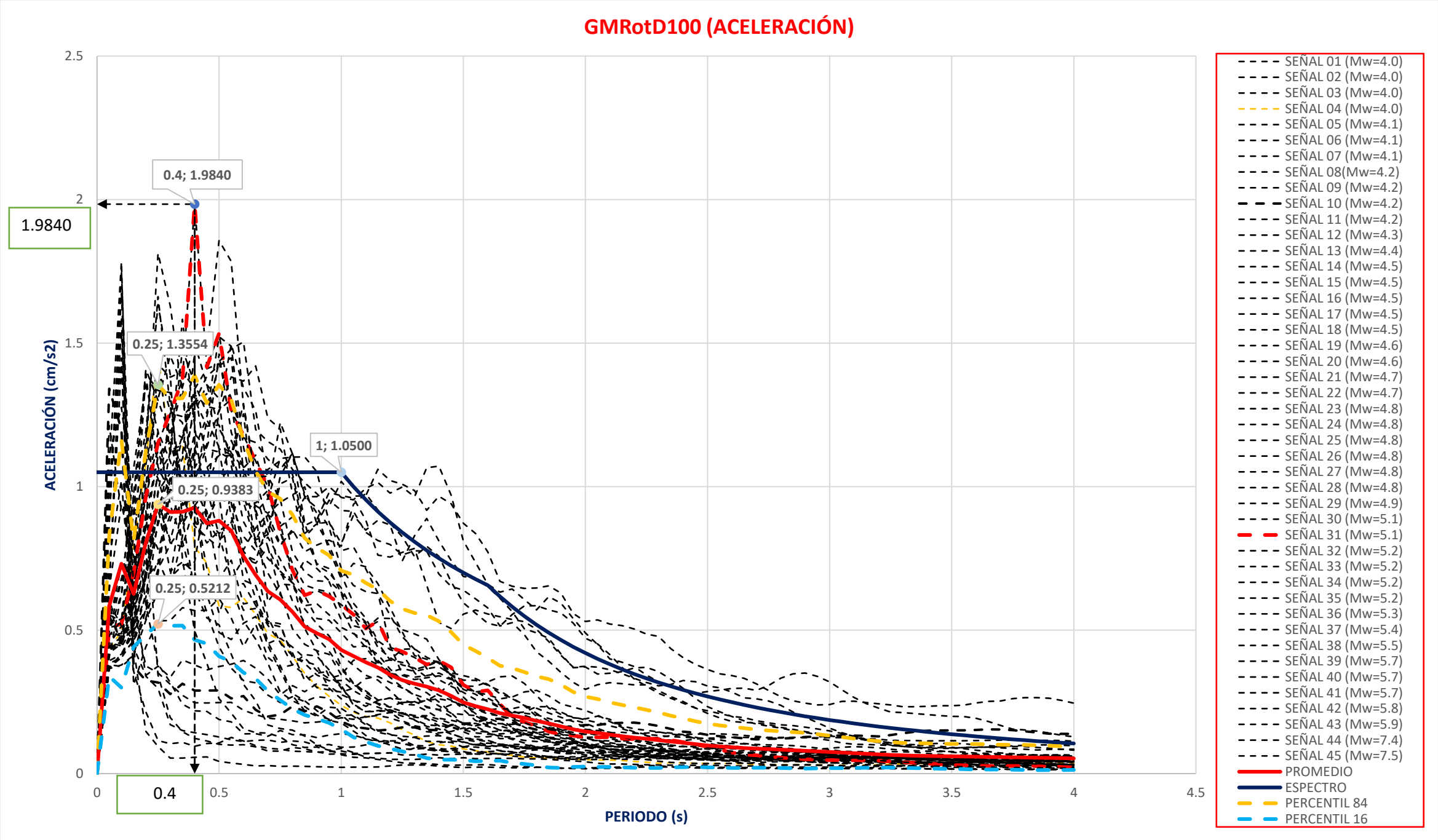
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) se obtiene que la señal 45 cuya $M_w = 7.5$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.2268 cm/s, para un PERIODO = 1.40 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.0698 cm/s, para un PERIODO = 0.8s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1191 cm/s, para un PERIODO = 1.35s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0316 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.5$, que es 1.40s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0973 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.5$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0597 cm/s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 45 de $M_w = 7.5$ obtenemos que se diferencian en 0.1570 cm/s.

Figura 73. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) – DESPLAZAMIENTO – CIP



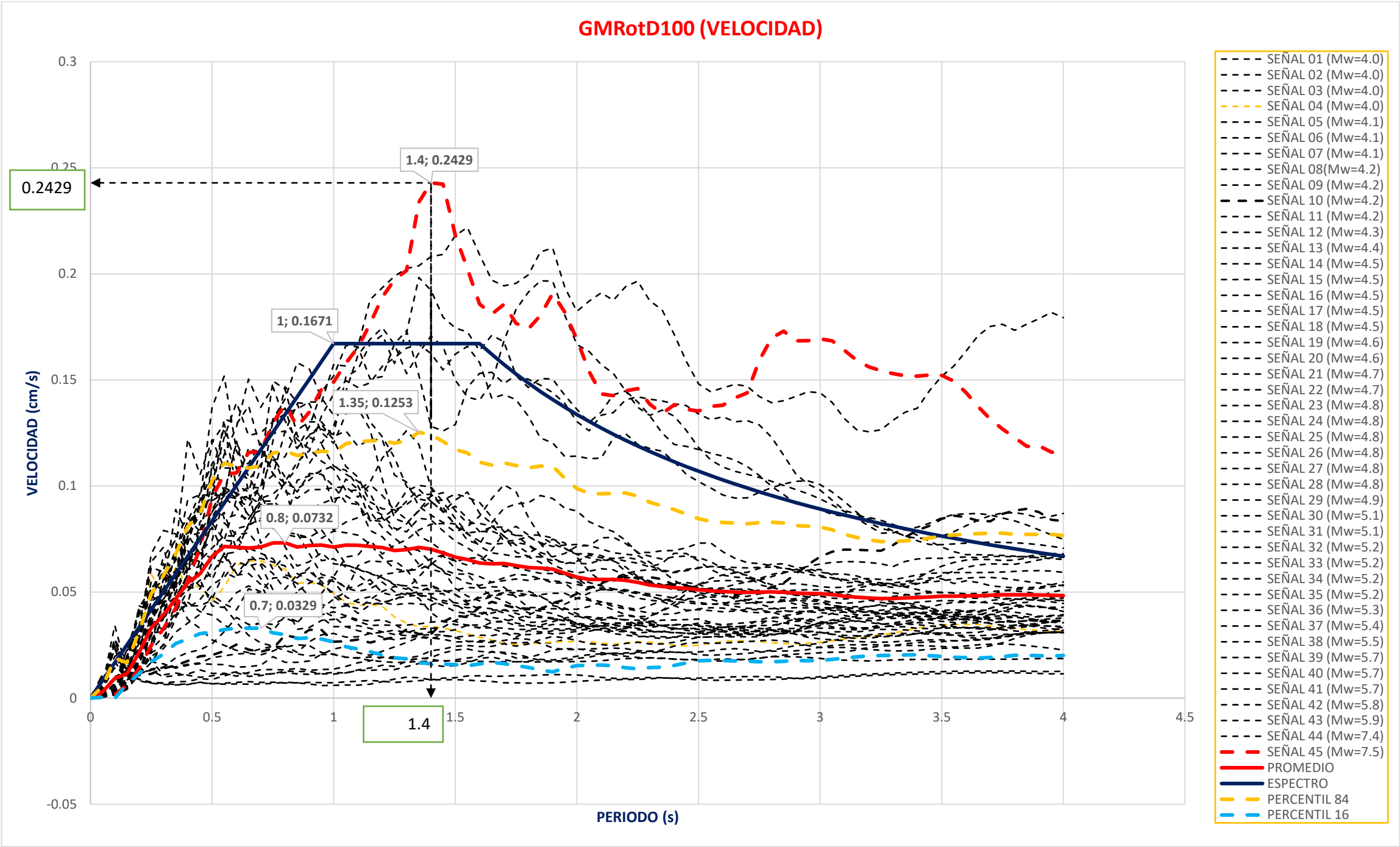
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) se obtiene que la señal 44 cuya Mw = 7.4 y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.0913 cm, para un PERIODO = 3.9 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene el DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0197 cm, para un PERIODO = 4.0s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0347 cm, para un PERIODO = 3.95s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0049 cm, para un PERIODO = 3.25s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la Mw = 7.4, que es 3.9s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0229 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de Mw = 7.4, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0487cm. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 44 de Mw = 7.4 obtenemos que se diferencian en 0.0716 cm.

Figura 74. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) – ACELERACIÓN – CIP



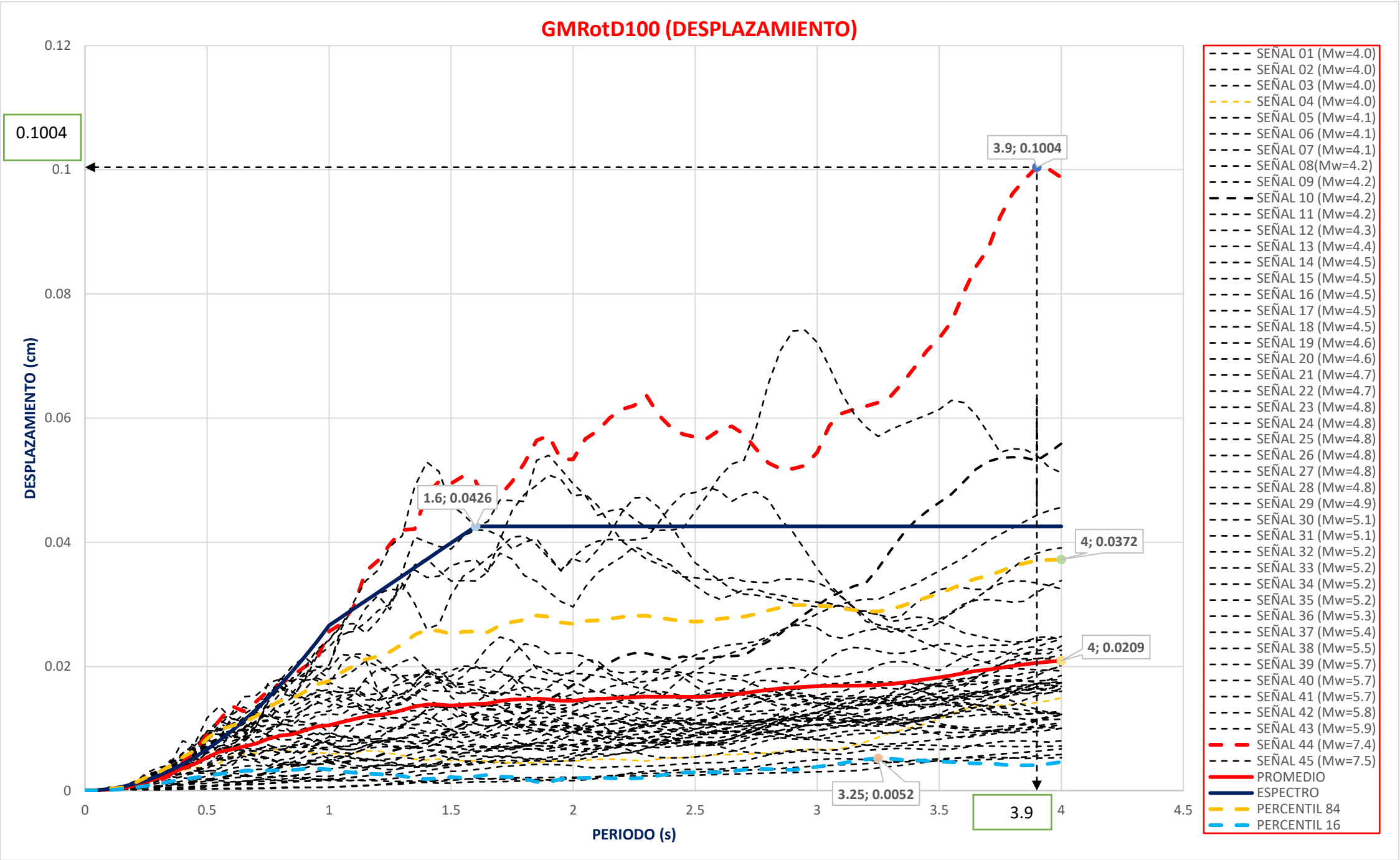
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) se obtiene que la señal 31 cuya Mw = 5.1 y nos arroja que la ACELERACIÓN = 1.9840 cm/s², para un PERIODO = 0.40 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la ACELERACIÓN = 0.9383 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.3554 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 0.5212 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la Mw = 5.1, que es 0.40s. Al comparar el promedio las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.1117 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de Mw = 5.1, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.9340 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de Mw = 5.1, con el promedio de las 45 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 1.0457 cm/s².

Figura 75. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) – VELOCIDAD – CIP



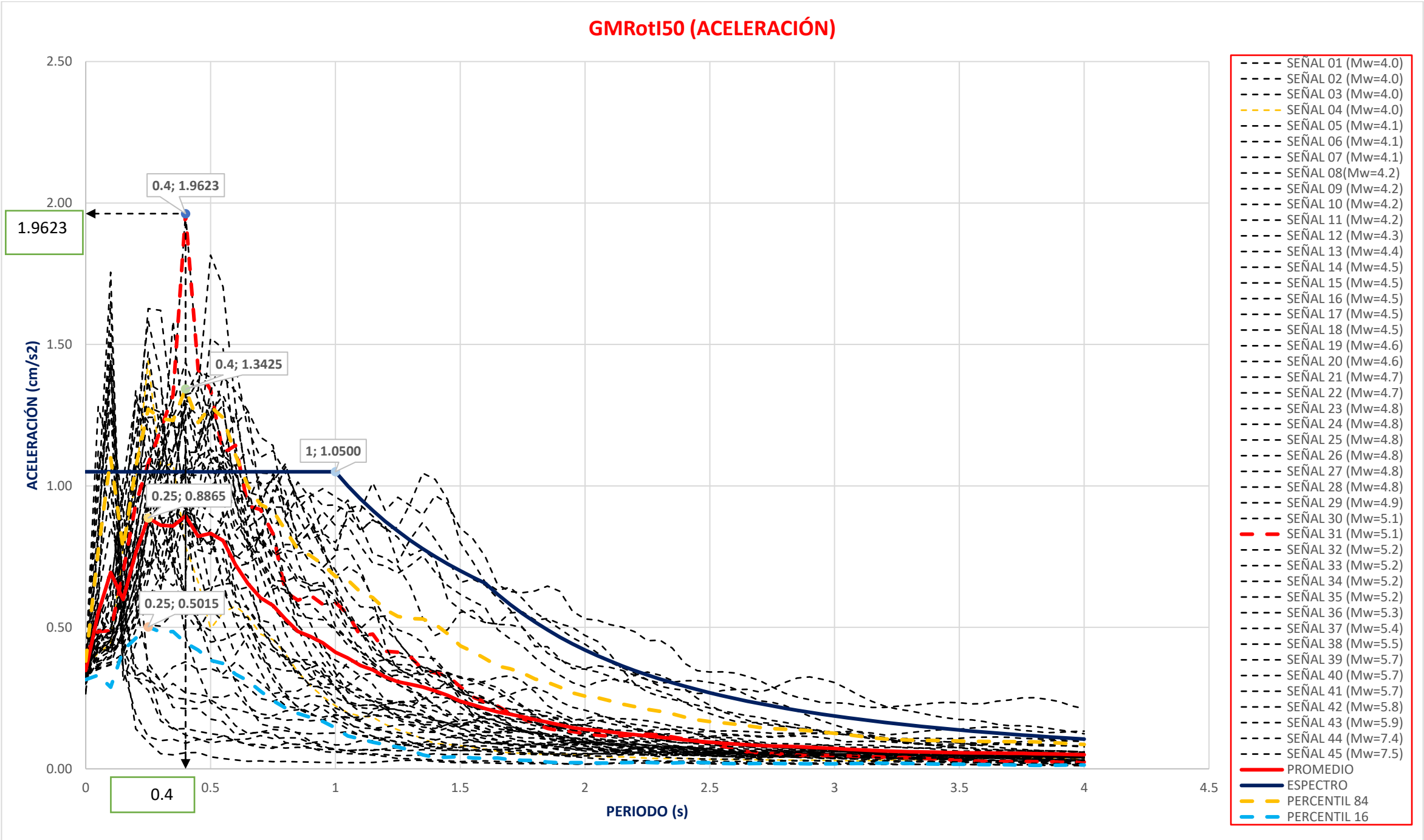
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) se obtiene que la señal 45 cuya $M_w = 7.5$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.2429 cm/s, para un PERIODO = 1.40 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.0732 cm/s, para un PERIODO = 0.8s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1253 cm/s, para un PERIODO = 1.35s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0329 cm/s, para un PERIODO = 0.70s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.5$, que es 1.40s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0939 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.5$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0758 cm/s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 45 de $M_w = 7.5$ obtenemos que se diferencian en 0.1697 cm/s.

Figura 76. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) – DESPLAZAMIENTO – CIP



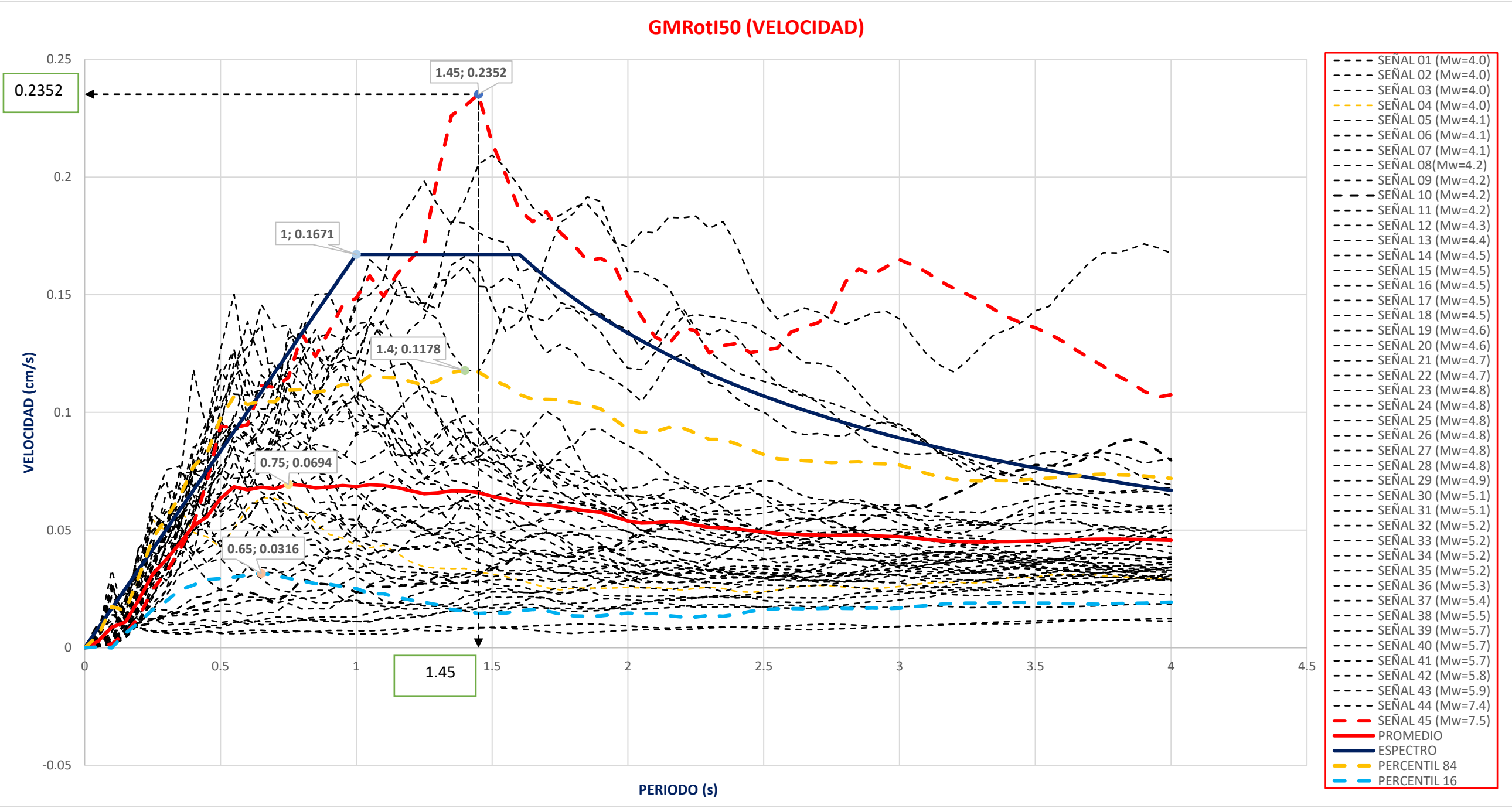
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100) se obtiene que la señal 44 cuya Mw = 7.4 y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.1004 cm, para un PERIODO = 3.9 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene el DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0209 cm, para un PERIODO = 4.0s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0372 cm, para un PERIODO = 4.0s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0052 cm, para un PERIODO = 3.25s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la Mw = 7.4, que es 3.9s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0217 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de Mw = 7.4, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0578cm. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 44 de Mw = 7.4 obtenemos que se diferencian en 0.0795 cm.

Figura 77. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) – ACELERACIÓN – CIP



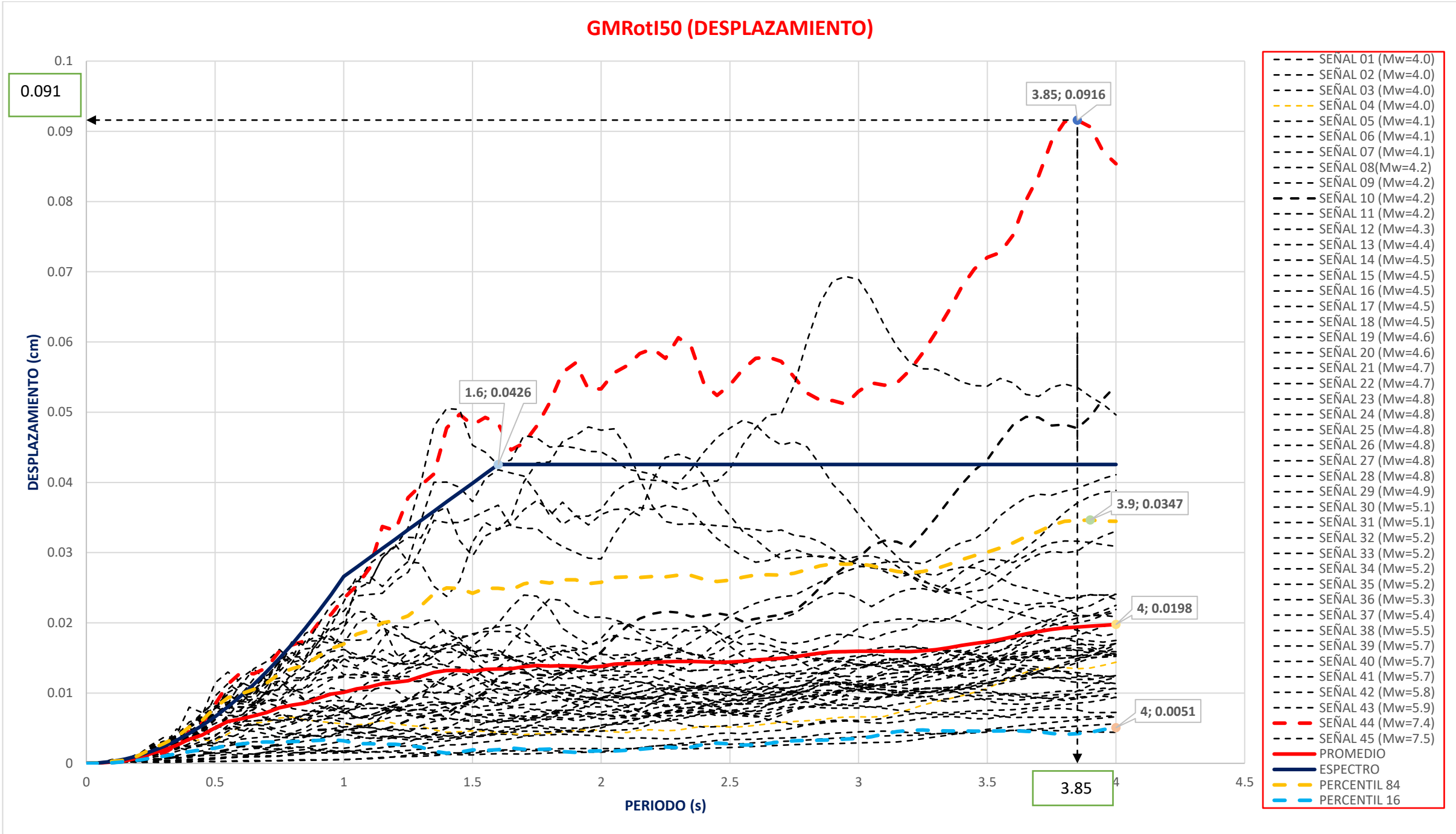
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) se obtiene que la señal 31 cuya $M_w = 5.1$ y nos arroja que la ACELERACIÓN = 1.9623 cm/s², para un PERIODO = 0.40 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la ACELERACIÓN = 1.0500 cm/s², para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la ACELERACIÓN = 0.8865 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la ACELERACIÓN = 1.3425 cm/s², para un PERIODO = 0.40s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la ACELERACIÓN = 0.5015 cm/s², para un PERIODO = 0.25s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 5.1$, que es 0.4s. Al comparar el promedio las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.1635 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.1$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.9123 cm/s². Al comparar la ACELERACIÓN de $M_w = 5.1$, con el promedio de las 45 señales sísmicas obtenemos que se diferencian en 1.0758 cm/s².

Figura 78. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) – VELOCIDAD – CIP



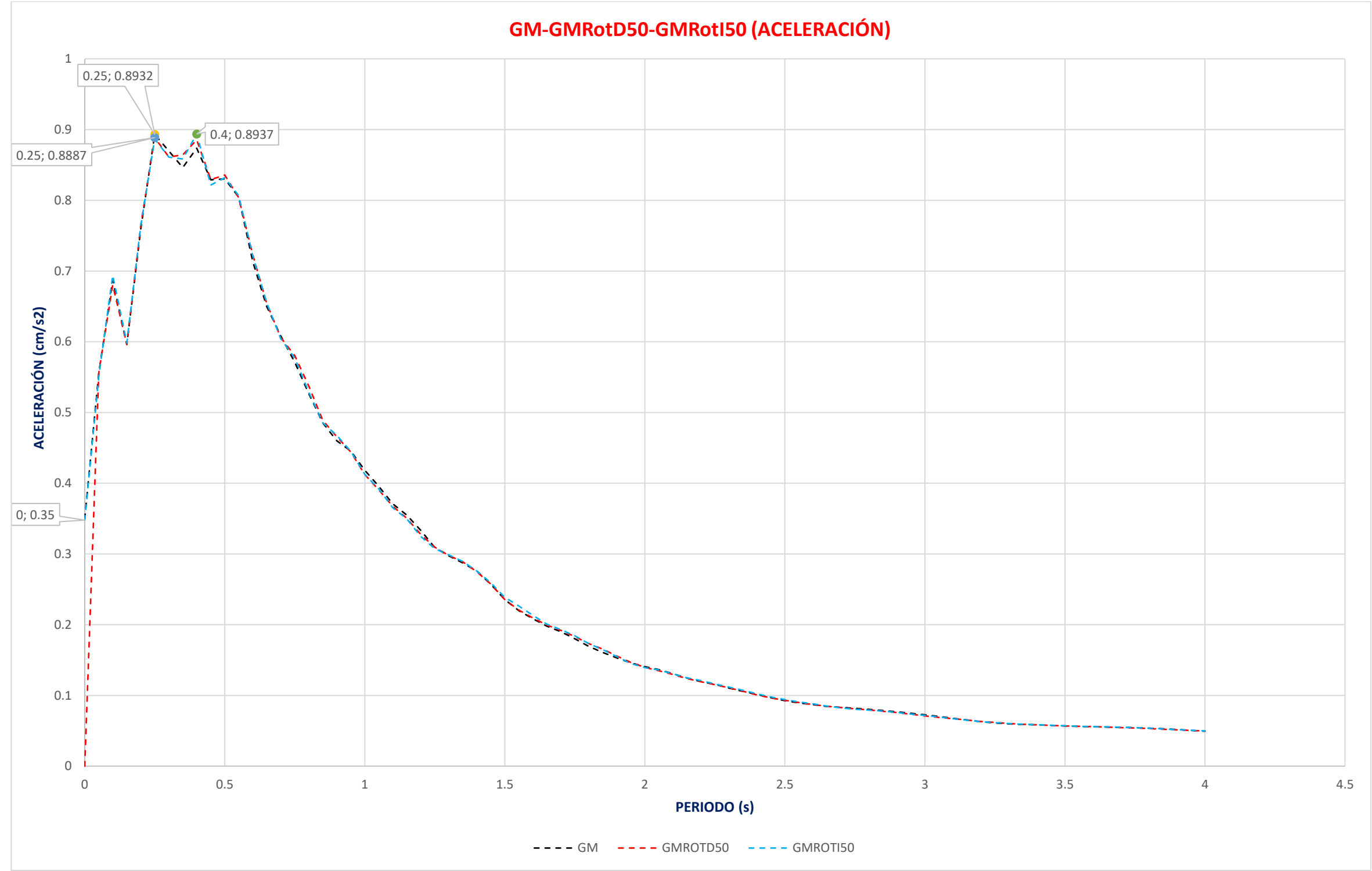
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) se obtiene que la señal 45 cuya $M_w = 7.5$ y nos arroja que la VELOCIDAD = 0.2352 cm/s, para un PERIODO = 1.45 s. El espectro de la ACCELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene la VELOCIDAD = 0.1671 cm/s, para un PERIODO = 1.0s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la VELOCIDAD = 0.0694 cm/s, para un PERIODO = 0.75s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos la VELOCIDAD = 0.1178cm/s, para un PERIODO = 1.4s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la VELOCIDAD = 0.0316 cm/s, para un PERIODO = 0.65s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.0s y en el periodo de la $M_w = 7.5$, que es 1.45s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0977 cm/s. Al comparar la VELOCIDAD de $M_w = 7.5$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0681 cm/s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 45 de $M_w = 7.5$ obtenemos que se diferencian en 0.1658 cm/s.

Figura 79. MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) – DESPLAZAMIENTO – CIP



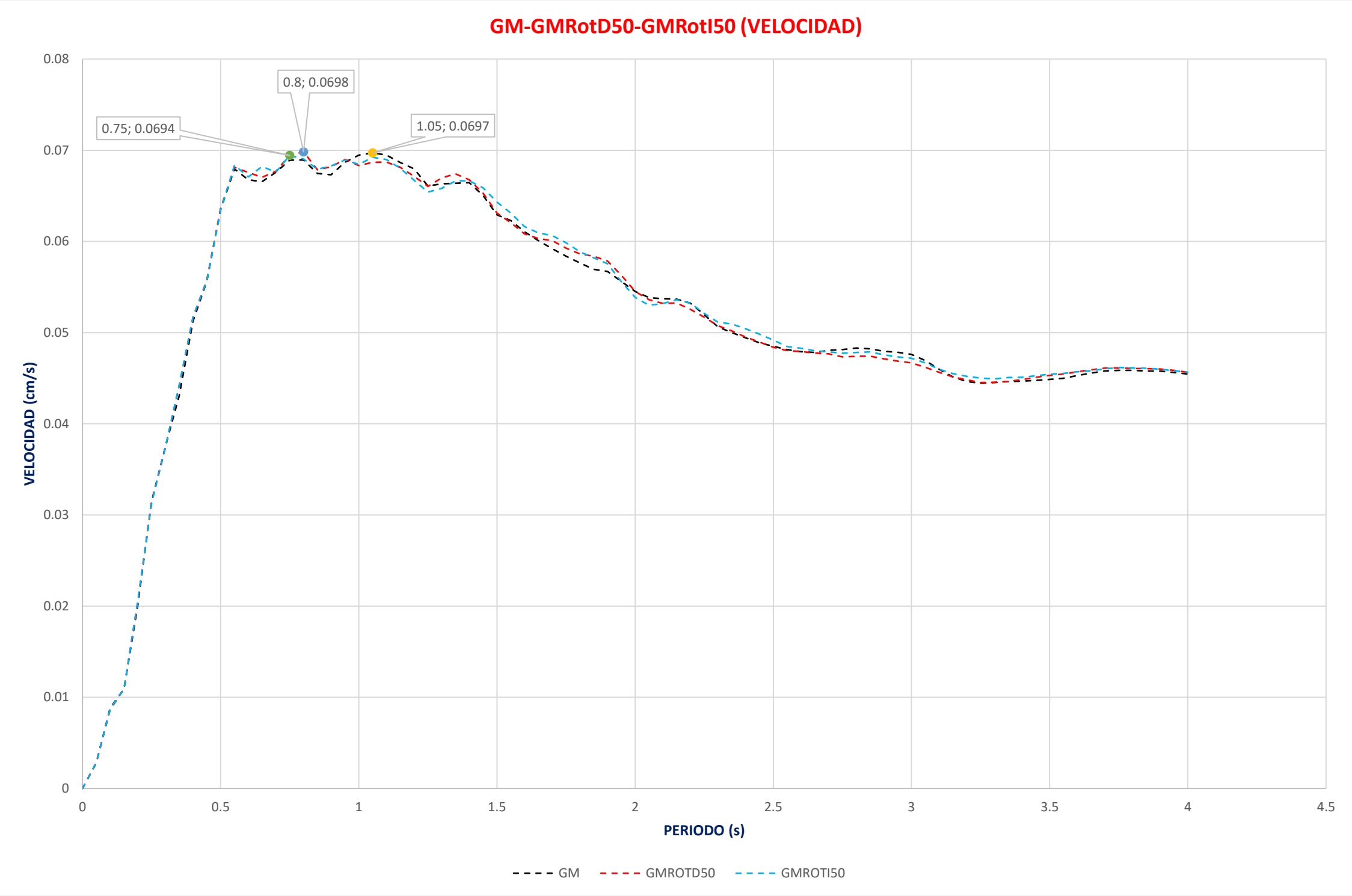
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50) se obtiene que la señal 44 cuya $M_w = 7.4$ y nos arroja que la DESPLAZAMIENTO = 0.0916 cm, para un PERIODO = 3.85 s. El espectro de la ACELERACIÓN según la Norma E030, se obtiene el DESPLAZAMIENTO = 0.0426 cm, para un PERIODO = 1.6s para un suelo S3. El promedio de las 45 señales sísmicas obtenidas del acelerógrafo ubicado en el COLEGIO DE INGENIEROS CAJAMARCA obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0198 cm, para un PERIODO = 4.0s. Para el PERCENTIL 84 obtenemos el DESPLAZAMIENTO = 0.0347 cm, para un PERIODO = 3.9s. Para el PERCENTIL 16 obtenemos la DESPLAZAMIENTO = 0.0051 cm, para un PERIODO = 4.0s. El periodo es diferente en el espectro de la norma E030, que es 1.6s y en el periodo de la $M_w = 7.4$, que es 3.85s. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con el espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0228 cm. Al comparar la DESPLAZAMIENTO de $M_w = 7.4$, con la del espectro de la norma E030 obtenemos que se diferencian en 0.0490cm. Al comparar el promedio de las 45 señales sísmicas con la señal 44 de $M_w = 7.4$ obtenemos que se diferencian en 0.0718 cm.

Figura 80. GM – GMRotD50 - GMRotI50 (ACELERACIÓN) – CIP



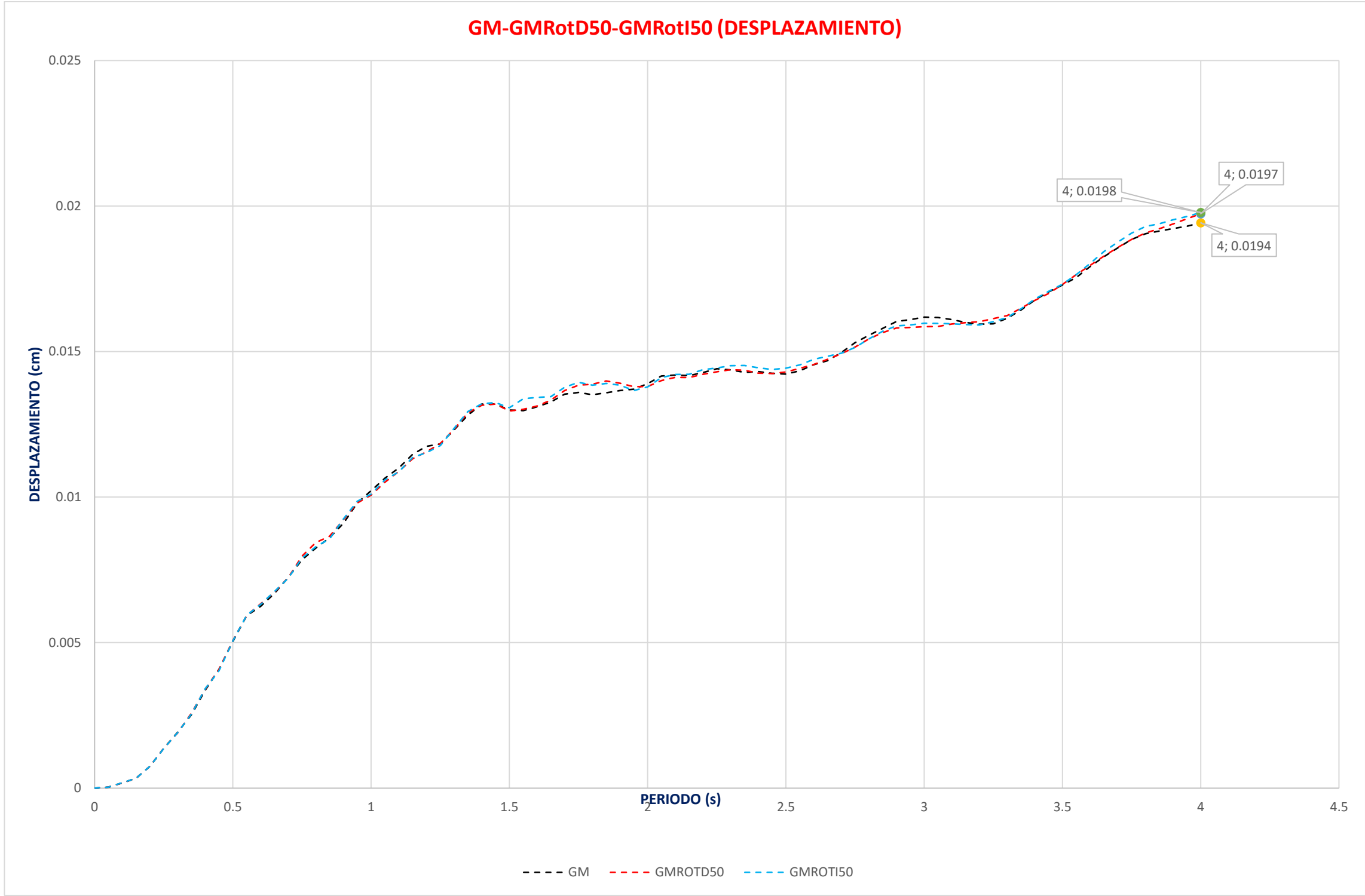
Para la MEDIA GEOMETRICA (GM), la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) y la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50), se obtiene que, para la GM, la ACELERACIÓN = 0.8932cm/s² y su PERIODO = 0.25s, para la GMRotD50 la ACELERACIÓN = 0.8887cm/s² y su PERIODO = 0.25s y para la GMRotI50 la ACELERACIÓN = 0.8937cm/s² y su PERIODO = 0.4s. Al comparar GM con GMRotD50 se obtiene una diferencia de 0.0045cm/s², al comparar GM con GMRotI50 se obtiene una diferencia de 0.0005cm/s² y al comparar GMRotD50 con GMRotI50 se obtiene una diferencia de 0.0005cm/s².

Figura 81. GM – GMRotD50 - GMRotI50 (VELOCIDAD) – CIP



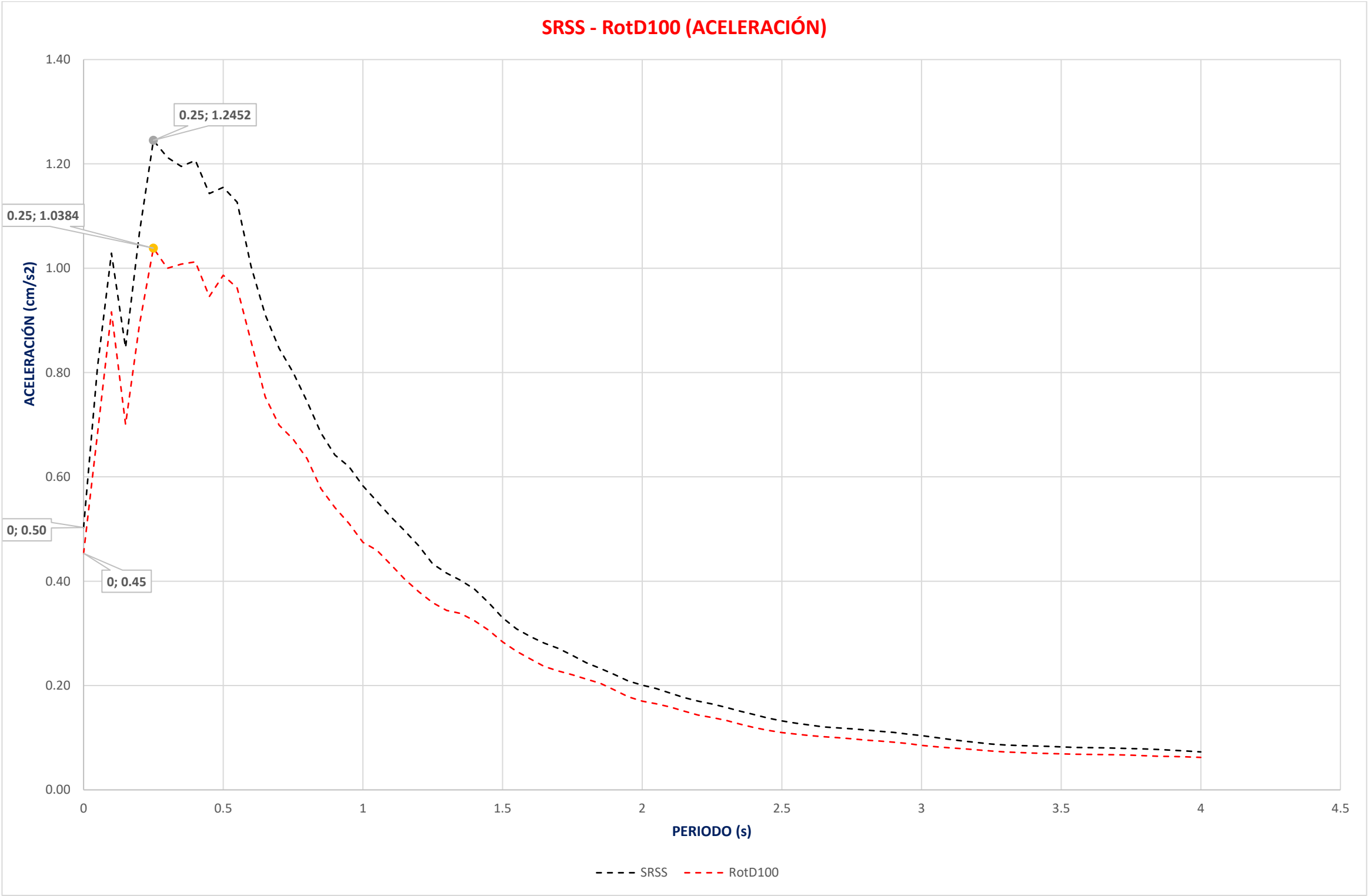
Para la MEDIA GEOMETRICA (GM), la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) y la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50), se obtiene que, para la GM, la VELOCIDAD = 0.0697cm/s y su PERIODO = 1.05s, para la GMRotD50 la VELOCIDAD = 0.0698cm/s y su PERIODO = 0.8s y para la GMRotI50 la VELOCIDAD = 0.0694cm/s y su PERIODO = 0.75s. Al comparar GM con GMRotD50 se obtiene una diferencia de 0.0001cm/s, al comparar GM con GMRotI50 se obtiene una diferencia de 0.0003cm/s y al comparar GMRotD50 con GMRotI50 se obtiene una diferencia de 0.0004cm/s.

Figura 82. GM – GMRotD50 - GMRotI50 (DESPLAZAMIENTO) – CIP



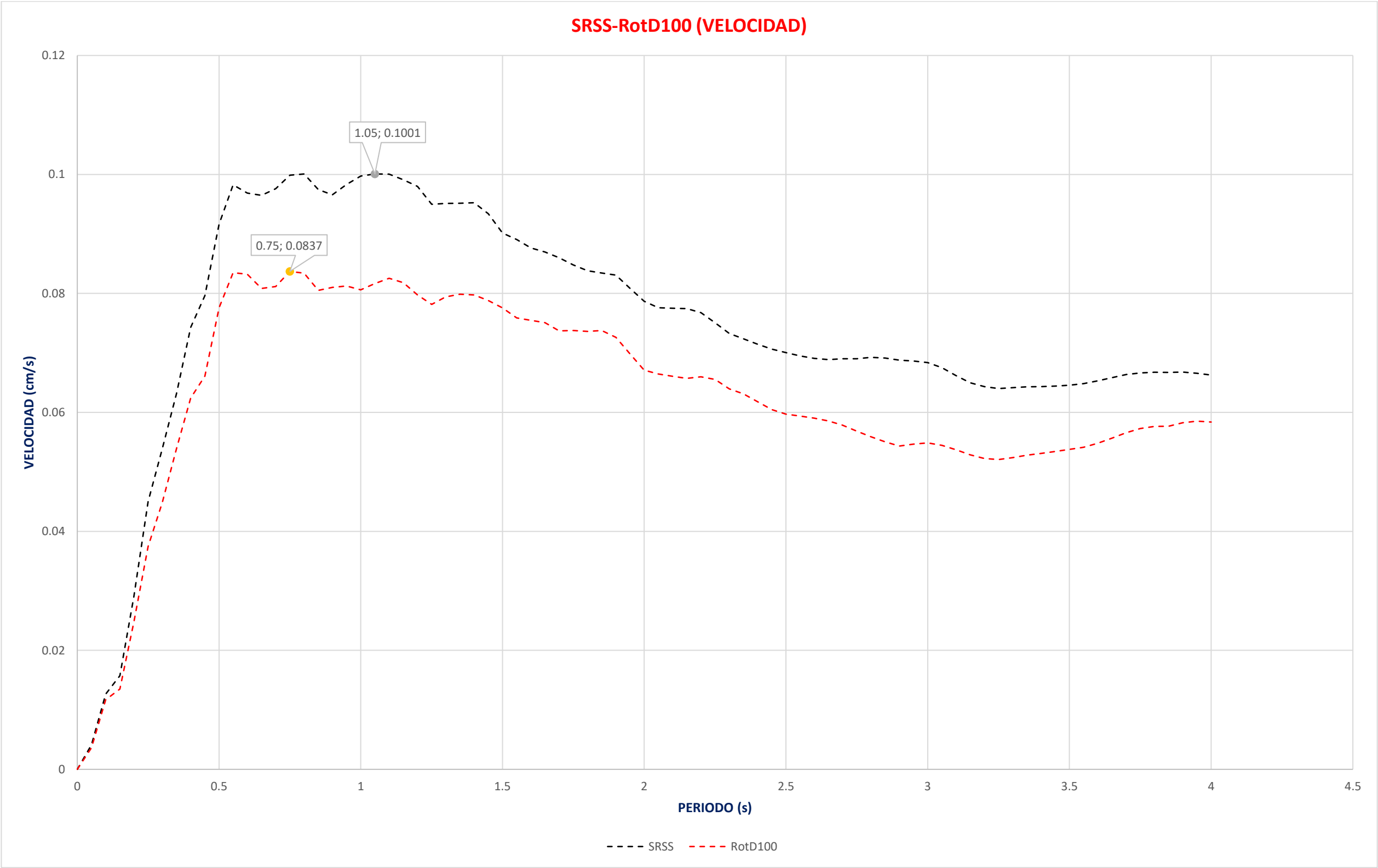
Para la MEDIA GEOMETRICA (GM), la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) y la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, INDEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotI50), se obtiene que, para la GM, el DESPLAZAMIENTO = 0.0194cm y su PERIODO = 4.0s, para la GMRotD50 la DESPLAZAMIENTO = 0.0197cm y su PERIODO = 4.0s y para la GMRotI50 la DESPLAZAMIENTO = 0.0198cm y su PERIODO = 4.0s. Al comparar GM con GMRotD50 se obtiene una diferencia de 0.0003cm, al comparar GM con GMRotI50 se obtiene una diferencia de 0.0004cm y al comparar GMRotD50 con GMRotI50 se obtiene una diferencia de 0.0000cm.

Figura 83. SRSS - RotD100 (ACELERACIÓN) – CIP



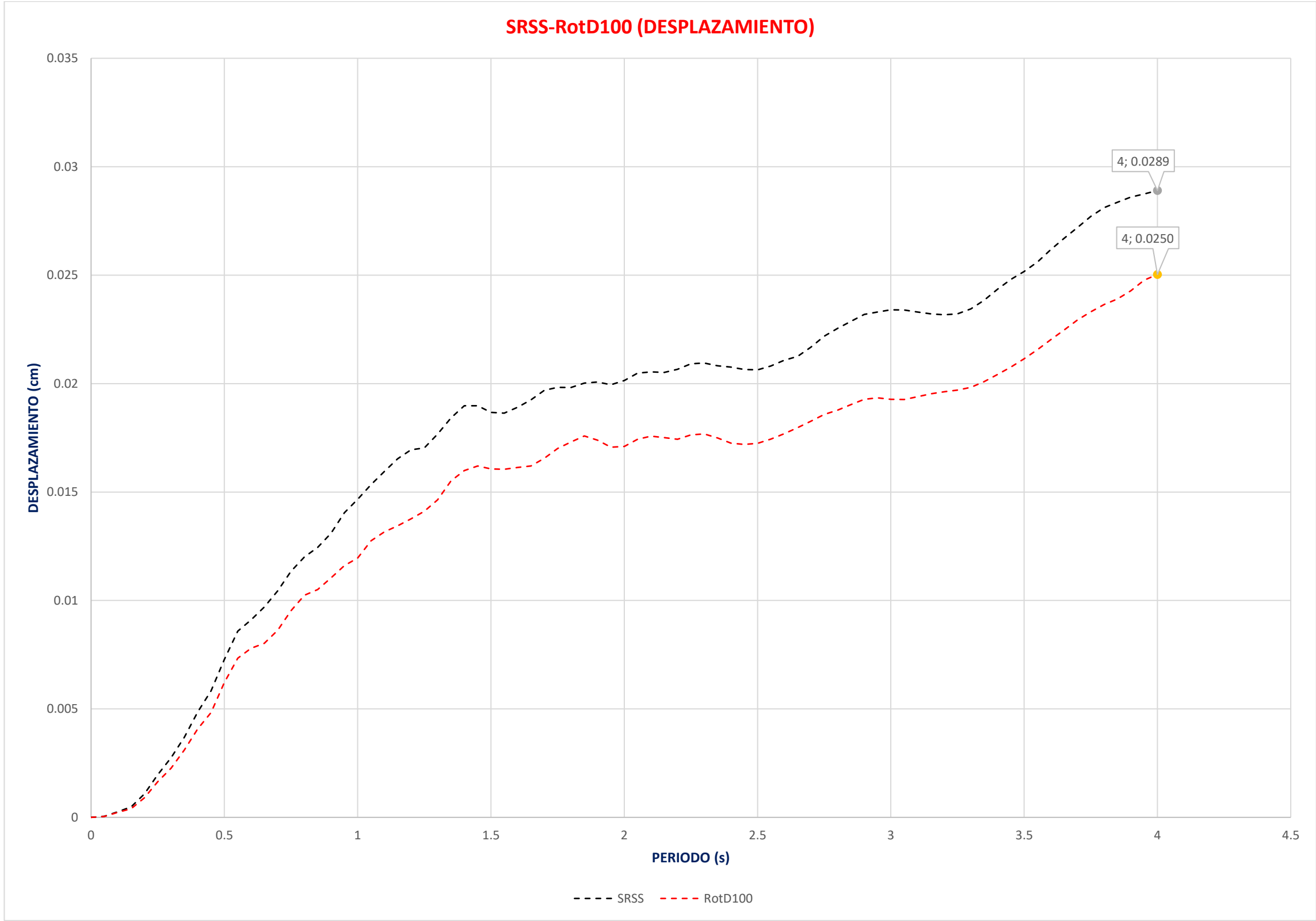
Para la RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS), y RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100), se obtiene que para la SRSS, la ACELERACIÓN = 1.2452cm/s² y su PERIODO = 0.25s, para la RotD100 la ACELERACIÓN = 1.0384cm/s² y su PERIODO = 0.25s. Al comparar SRSS con RotD100 se obtiene una diferencia de 0.2068cm/s².

Figura 84. SRSS - RotD100 (VELOCIDAD) – CIP



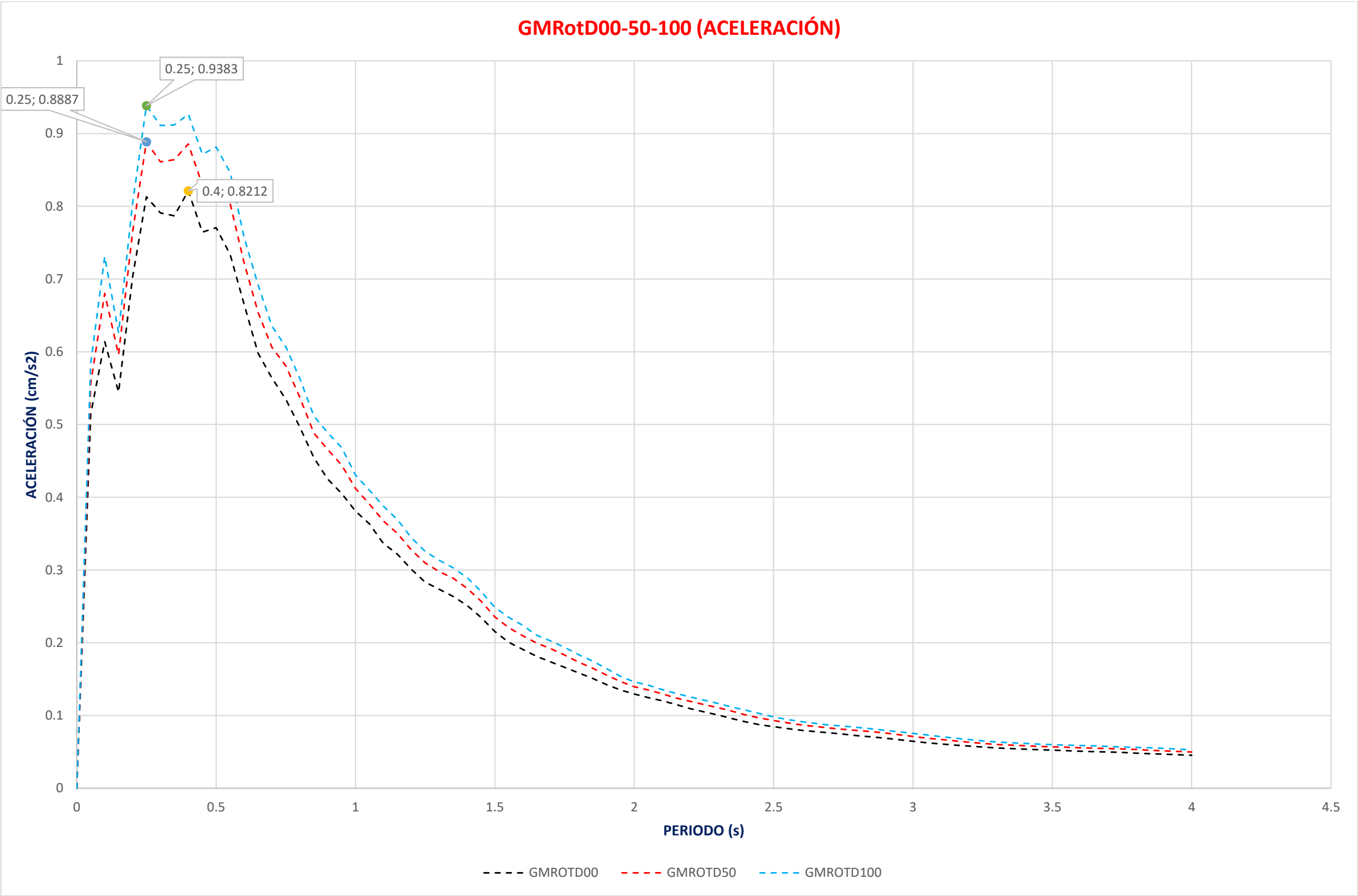
Para la RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS), y RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100), se obtiene que para la SRSS, la VELOCIDAD = 0.1001cm/s y su PERIODO = 1.05s, para la RotD100 la VELOCIDAD = 0.0837cm/s y su PERIODO = 0.75s. Al comparar SRSS con RotD100 se obtiene una diferencia de 0.1001cm/s.

Figura 85. SRSS - RotD100 (DESPLAZAMIENTO) – CIP



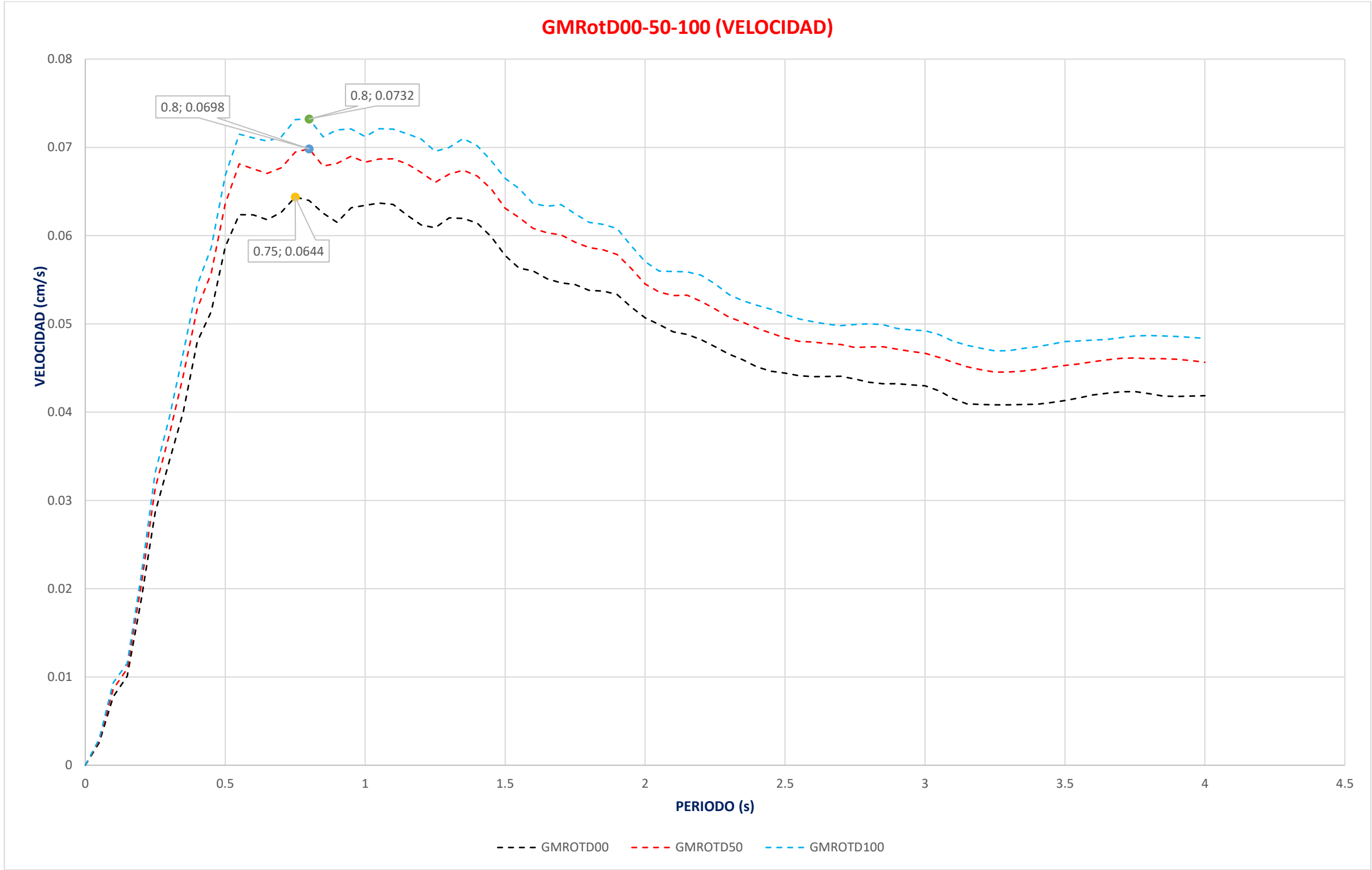
Para la RAIZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS (SRSS), y RESPUESTA MÁXIMA EN EL PLANO HORIZONTAL (RotD100), se obtiene que, para la SRSS, la DESPLAZAMIENTO = 0.0289cm y su PERIODO = 4.0s, para la RotD100 la DESPLAZAMIENTO = 0.0250cm y su PERIODO = 4.0s. Al comparar SRSS con RotD100 se obtiene una diferencia de 0.0039cm.

Figura 86. GMRotD00 – 50 – 100 (ACELERACIÓN) – CIP



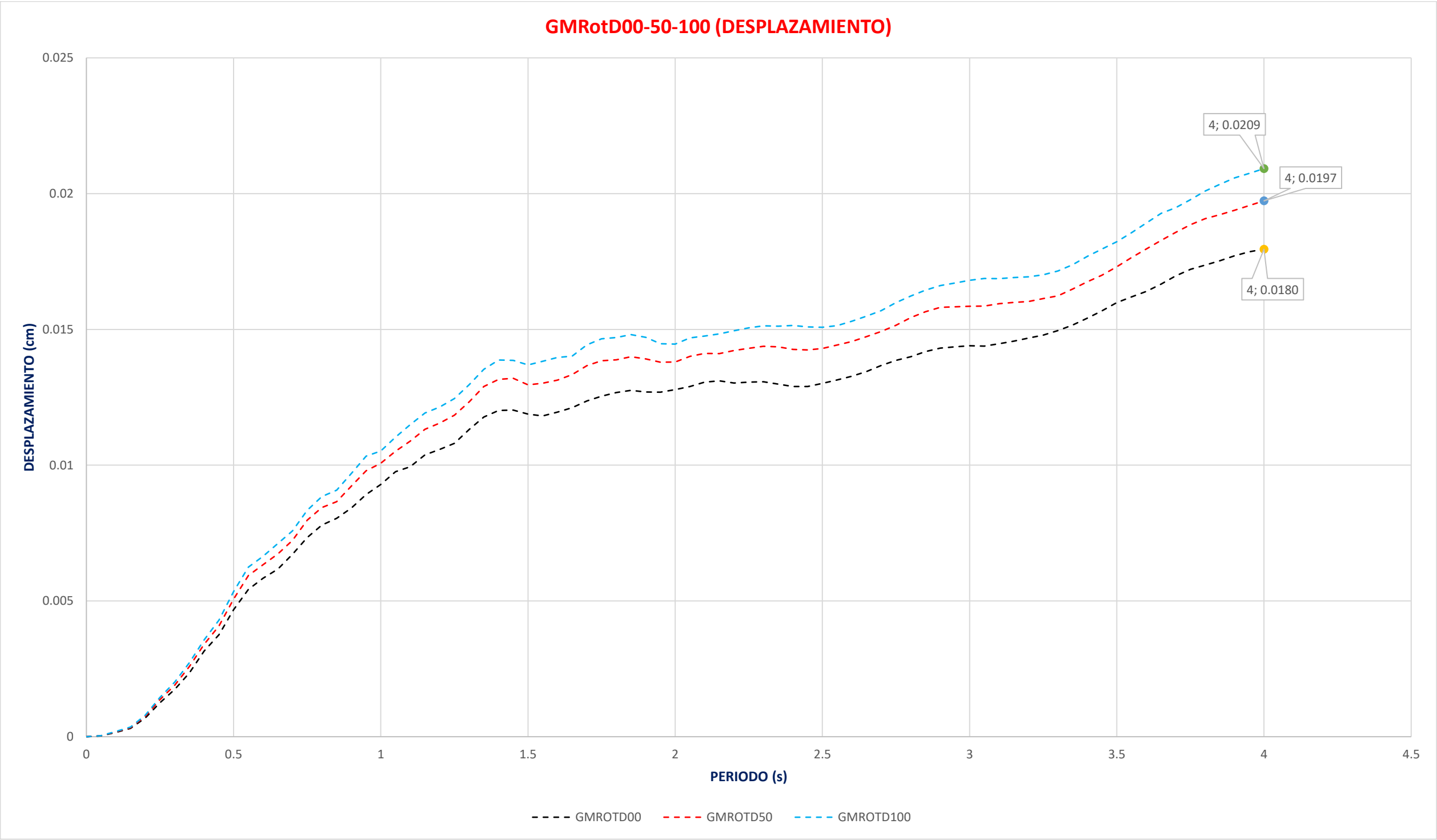
Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00), la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) y la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100), se obtiene que, para la GMRotD00, la ACELERACIÓN = 0.8212cm/s² y su PERIODO = 0.40s, para la GMRotD50 la ACELERACIÓN = 0.8887cm/s² y su PERIODO = 0.25s y para la GMRotD100 la ACELERACIÓN = 0.9383cm/s² y su PERIODO = 0.25s. Al comparar GMRotD00 con GMRotD50 se obtiene una diferencia de 0.0675cm/s², al comparar GMRotD00 con GMRotD100 se obtiene una diferencia de 0.1171cm/s² y al comparar GMRotD50 con GMRotD100 se obtiene una diferencia de 0.0497cm/s².

Figura 87. GMRotD00 – 50 – 100 (VELOCIDAD) – CIP



Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00), la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) y la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100), se obtiene que, para la GMRotD00, la VELOCIDAD = 0.0644cm/s y su PERIODO = 0.75s, para la GMRotD50 la VELOCIDAD = 0.0698cm/s y su PERIODO = 0.8s y para la GMRotD100 la VELOCIDAD = 0.0732cm/s y su PERIODO = 0.8s. Al comparar GMRotD00 con GMRotD50 se obtiene una diferencia de 0.0055cm/s, al comparar GMRotD00 con GMRotD100 se obtiene una diferencia de 0.0088cm/s y al comparar GMRotD50 con GMRotD100 se obtiene una diferencia de 0.0034cm/s.

Figura 88. GMRotD00 – 50 – 100 (DESPLAZAMIENTO) – CIP



Para la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD00), la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD50) y la MEDIA GEOMÉTRICA, ROTACIÓN, DEPENDIENTE, PERCENTIL (GMRotD100), se obtiene que, para la GMRotD00, la DESPLAZAMIENTO = 0.0180cm y su PERIODO = 4.0s, para la GMRotD50 la DESPLAZAMIENTO = 0.0197cm y su PERIODO = 4.0s y para la GMRotD100 la DESPLAZAMIENTO = 0.0209cm y su PERIODO = 4.0s. Al comparar GMRotD00 con GMRotD50 se obtiene una diferencia de 0.0018cm, al comparar GMRotD00 con GMRotD100 se obtiene una diferencia de 0.0030cm y al comparar GMRotD50 con GMRotD100 se obtiene una diferencia de 0.0012cm.