



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE EFECTOS AMBIENTALES EN
PROCESOS DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE ANDRÉS TAMAYO VÁSQUEZ

PROFESOR GUÍA:

RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

VIVIANA MERUANE NARANJO

FABIÁN ROJAS BARRALES

SANTIAGO DE CHILE

AÑO 2014

MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE EFECTOS AMBIENTALES EN PROCESOS DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

Este trabajo de título se enmarca en el estudio de sistemas de monitoreo de salud estructural, y la influencia que tienen los factores ambientales sobre la identificación de cambios de estado en una estructura, debido a daño, deterioro estructural u otros factores.

En estudios previos se ha determinado que la temperatura es la principal variable ambiental que afecta a las frecuencias características de estructuras de hormigón armado. Por esto, en una primera instancia se evaluó experimentalmente el efecto que tiene la temperatura ambiente sobre las frecuencias características de una viga de hormigón armado. Los resultados indican que existe una relación inversa entre estas variables, y que cambios de 30°C generan variaciones de frecuencias del orden del 3%.

Se realizaron modelos analíticos de una estructura, a la cual se le modifican sus propiedades en función de la temperatura. En ella se estudió la relevancia de la temperatura en las variaciones de frecuencias debido a distintos grados y tipos de daño. Además se estudió la manera en que la temperatura ambiente y la radiación solar afecta a estructuras de hormigón armado, determinando analíticamente el retraso del efecto de los cambios de temperatura sobre una estructura.

Finalmente, se estudiaron los efectos que tienen los factores ambientales en las frecuencias del edificio Torre Central de la FCFM de la Universidad de Chile. Se determinó que las variables más importantes son la temperatura ambiente, la radiación solar y la saturación del suelo. Además, se estudiaron metodologías que permiten detectar cambios de estado en la estructura, considerando los efectos que tiene la temperatura sobre ésta, e identificando los inconvenientes en relación a la modelación de los efectos del aumento de la saturación del suelo producto de precipitaciones. Se estableció que la utilización de metodologías que consideran los efectos ambientales es potencialmente útil, pero para que éstas entreguen resultados confiables se requiere una cantidad de datos para su entrenamiento mayor a dos años.

A MIS PADRES,
María Olivia y Fernando,
por su apoyo incondicional y
por forjar la persona que
soy...

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi Profesor Guía, Rubén Boroschek, por su gran ayuda y excelente disposición durante la realización de este trabajo. Gracias también a mi Profesora Co-guía, Viviana Meruane, por ayudarme cada vez que la necesité.

Doy las gracias a mis amigos y compañeros de la U, a los cabros de las peceras de civil, y a toda la gente que tuve la fortuna de conocer y compartir durante mi estadía en la universidad.

Agradezco enormemente a Belen, mi polola, por su compañía a lo largo de este extenso proceso, por darme ánimo cuando todo se veía complicado y por alegrarme cada día.

Finalmente, le doy gracias a mis padres, porque todo lo que he logrado se lo debo a ellos.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	4
1.2. METODOLOGÍA	5
1.3. ALCANCES.....	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1. REGRESIÓN MULTIPARÁMETRICA LINEAL	7
2.1.1. Criterio de selección de variables ambientales para el modelo de regresión	8
2.2. ARX.....	9
2.2.1. Criterio de evaluación de modelos	11
2.2.2. Identificación de daño	12
2.3. PCA.....	14
2.3.1. Interpretación gráfica método PCA	17
CAPÍTULO 3: REVISIÓN DE ANTECEDENTES.....	19
3.1. Descripción del Edificio Torre Central	19
3.2. Instrumentación.....	19
3.2.1. Instrumentación Torre Central.....	20
3.2.2. Estación Meteorológica DGF	22
3.3. Registros de variables ambientales	24
CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE EFECTO TÉRMICO.....	35
4.1. Configuración experimental.....	35
4.1.1. Termoresistores	36
4.1.2. Viga.....	37
4.1.3. Instrumentos ensayo de impacto y adquisición de datos	40
4.2. Descripción ensayos	42
4.2.1. Ensayo de calentamiento.....	42

4.2.2. Ensayo de enfriamiento.....	44
4.3. Resultados	46
4.4. Relación entre el módulo de elasticidad y la temperatura	50
4.5. Recomendaciones.....	55
CAPÍTULO 5: MODELO ANALÍTICO DE VARIACIÓN DE TEMPERATURA EN UN MARCO PLANO.....	57
5.1. Definición de la Estructura.....	57
5.2. Modelos de variación de temperatura en marco plano.....	58
5.2.1. Modelo 1	58
5.2.2. Modelo 2	61
5.2.3. Modelo 3	65
5.3. Modelo de Transferencia de Calor	67
5.3.1. Ley de Fourier	68
5.3.2. Resultados modelo transferencia de calor	71
5.3.3. Modelo 4	75
5.4. Definición de escenarios de daño y aplicación PCA	77
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS	90
6.1. Evaluación del efecto de las variables ambientales en el edificio Torre Central .	90
6.1.1. Determinación de frecuencias con media móvil	96
6.2. Estudio de la correlación de variables ambientales y frecuencias.....	97
6.2.1. Correlación entre las distintas variables ambientales.....	97
6.2.2. Correlación entre variables ambientales y frecuencias	106
6.2.3. Correlación entre variables ambientales y frecuencias (con desfase)	125
6.3. Regresión Multiparamétrica Lineal	132
6.4. ARX.....	139
6.4.1. Elección de modelos	139
6.4.2. Evaluación de modelos base	139

6.4.3. Modelo con mejor ajuste	140
6.4.4. Evaluación de ventanas de entrenamiento de modelos.....	146
6.4.5. Modelo ARX no lineal.....	150
6.5. Detección de daño con modelos predictivos	153
6.6. PCA.....	161
6.6.1. Influencia de los sismos en la detección de daño	164
6.6.2. Influencia de la lluvia en la detección de daño estructural.	165
6.6.3. Influencia de la calidad del proceso de identificación en la detección de daño estructural.....	166
6.6.4. Representación gráfica método PCA.....	168
CAPÍTULO 7: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	172
BIBLIOGRAFÍA.....	175

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Características acelerómetros Torre Central.....	20
Tabla 3-2: Sensores estación meteorológica DGF.....	22
Tabla 4-1: Calibración sensores.....	36
Tabla 4-2: Estado de los sensores y su recubrimiento.....	39
Tabla 4-3: T° de termoresistores antes de cada ensayo (°C). Calentamiento.....	43
Tabla 4-4: T° de termoresistores antes de cada ensayo (°C). Enfriamiento.....	45
Tabla 4-5: Frecuencias viga a distintas temperaturas.....	46
Tabla 4-6: Variación porcentual máxima de frecuencias.....	47
Tabla 4-7: Comparación frecuencias viga. Experimentales vs teóricas.....	49
Tabla 4-8: Variaciones porcentuales módulo de elasticidad.....	54
Tabla 5-1: Frecuencias modelo edificio a 20°C.....	58
Tabla 5-2: Variaciones porcentuales frecuencias características Modelo 2.....	63
Tabla 5-3: Variaciones porcentuales frecuencias características. Modelo 3.....	66
Tabla 5-4: Niveles de variación frecuencias modelo 4.....	76
Tabla 5-5: Variación porcentual cambio de frecuencias en cada escenario de daño.....	78
Tabla 6-1: Coeficientes R variables ambientales.....	97
Tabla 6-2: Coeficientes R ² variables ambientales.....	98
Tabla 6-3: Factores de correlación. Datos pre 27F.....	106
Tabla 6-4: Factores de correlación. Datos pos 27F.....	106
Tabla 6-5: Coeficientes de mejor correlación y lag asociado. Datos pre 27F.....	125
Tabla 6-6: Coeficientes de mejor correlación y lag asociado. Datos pos 27F.....	125
Tabla 6-7: Coeficientes de ajuste y R ² regresiones.....	132
Tabla 6-8: Coeficientes de ajuste y R ² regresiones con lag.....	133
Tabla 6-9: Diferencia porcentual entre modelos sin y con desfase.....	133
Tabla 6-10: Evaluación de modelos con coeficientes unitarios.....	140
Tabla 6-11: Coeficientes de ajuste y R ² modelos ARX, frecuencias 1, 2 y 3.....	141
Tabla 6-12: Modelos de regresión y ARX con mejor ajuste.....	145
Tabla 6-13: Coeficientes de ajuste y R ² para modelos ARX no lineal.....	150
Tabla 6-14: Variaciones porcentuales entre modelos ARX lineal y no lineal.....	150
Tabla 6-15: N° de falsos positivos en función del tiempo de entrenamiento.....	163

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Ejemplo bidimensional del método PCA	17
Figura 3-1: Imágenes Torre Central [Basoalto, 2013]	19
Figura 3-2: Ubicación acelerómetros Torre Central.....	21
Figura 3-3: Pozo en donde se ubican los sensores de humedad [Boroschek, 2010]	22
Figura 3-4: Estación meteorológica DGF	23
Figura 3-5: Temperatura del aire.....	25
Figura 3-6: Humedad relativa del ambiente	25
Figura 3-7: Radiación solar	26
Figura 3-8: Presión barométrica	26
Figura 3-9: Precipitación I. Eventos cada 15 minutos.	27
Figura 3-10: Precipitación II. Eventos de lluvia acumulada.	27
Figura 3-11: Velocidad del viento	28
Figura 3-12: Dirección del viento.....	28
Figura 3-13: Saturación suelo a 5 m de profundidad.....	29
Figura 3-14: Saturación suelo a 10 m de profundidad.....	29
Figura 3-15: Saturación suelo a 20 m de profundidad.....	30
Figura 3-16: Histograma de temperatura del aire.....	31
Figura 3-17: Histograma de humedad relativa del ambiente	31
Figura 3-18: Histograma de radiación solar	32
Figura 3-19: Histograma de presión barométrica	32
Figura 3-20: Histograma de precipitación I. Eventos de lluvia cada 15 minutos.	33
Figura 3-21: Histograma de precipitación II. Eventos de lluvia acumulada.	33
Figura 3-22: Histograma de magnitud del viento.....	34
Figura 3-23: Histograma de dirección del viento	34
Figura 4-1: Ensamble termoresistores	36
Figura 4-2: Cortes longitudinales viga HA	37
Figura 4-3: Corte transversal viga HA	38
Figura 4-4: Disposición de sensores en la viga (vista lateral, dimensiones en cm).....	38
Figura 4-5: Vista de sensores 7, 8 y 9 a la izquierda y 10, 11 y 12 a la derecha.	38
Figura 4-6: Viga montada en el marco de acero	40
Figura 4-7: <i>Impact Hammer</i> (izquierda) y Acelerómetro PCB Plezotronics (derecha) ...	41

Figura 4-8: Ubicación puntos de impacto y acelerómetro (vista superior, dimensiones en cm)	41
Figura 4-9: Disposición focos halógenos.....	42
Figura 4-10: Temperatura vs tiempo, ensayo de calentamiento.....	43
Figura 4-11: Ensayo enfriamiento	44
Figura 4-12: Temperatura vs Tiempo, ensayo de enfriamiento	45
Figura 4-13: Frecuencias en función de la temperatura	47
Figura 4-14: Modos viga simplemente apoyada.....	48
Figura 4-15: Ley constitutiva térmica hormigón [Yan, 2005]	50
Figura 4-16: Efecto de la temperatura en el módulo de elasticidad de distintos tipos de hormigón [Kodur y Harmathy, 2002].....	51
Figura 4-17: E vs T° - Modo 1	51
Figura 4-18: E vs T° - Modo 2	52
Figura 4-19: E vs T° - Modo 3	52
Figura 4-20: E vs T° - Modo 4	53
Figura 4-21: Módulo de elasticidad hormigón armado vs Temperatura	54
Figura 5-1: Edificio de corte plano.....	57
Figura 5-2: Frecuencia 1 y temperatura, modelo 1, año 2011	59
Figura 5-3: Frecuencias 1-8, modelo 1, año 2011	60
Figura 5-4: Efecto de la radiación solar a lo largo del día	62
Figura 5-5: Temperaturas nodos en marco 2D con gradiente térmico	63
Figura 5-6: Comparación modelos 1 y 2	64
Figura 5-7: Comparación modelos 1 y 3	65
Figura 5-8: Retraso en valores peak de frecuencia con respecto a la temperatura	67
Figura 5-9: Temperatura interior y exterior de muro de hormigón, sin radiación solar. ..	71
Figura 5-10: Perfil de temperatura en el tiempo y en el interior del hormigón, sin radiación solar	72
Figura 5-11: Retraso en el cambio de temperatura hacia el interior del hormigón, sin radiación solar	72
Figura 5-12: Temperatura interior y exterior de muro de hormigón, con radiación solar	73
Figura 5-13: Perfil de temperatura en el tiempo y en el interior del hormigón, con radiación solar	74

Figura 5-14: Retraso en el cambio de temperatura hacia el interior del hormigón, con radiación solar	74
Figura 5-15: Comparación frecuencia 1, modelo 1 y 4.....	75
Figura 5-16: Frecuencia 1 versus temperatura.....	76
Figura 5-17: Caracterización de estructura para determinación de escenarios de daño	77
Figura 5-18: Frecuencias daño E1	79
Figura 5-19: Frecuencias daño E2	79
Figura 5-20: Frecuencias daño E3.1	80
Figura 5-21: Frecuencias daño E3.2	80
Figura 5-22: Frecuencias daño E3.3	81
Figura 5-23: Frecuencias daño E4.1	81
Figura 5-24: Frecuencias daño E4.2	82
Figura 5-25: Análisis PCA escenario daño E1.....	83
Figura 5-26: Análisis PCA escenario daño E2.....	84
Figura 5-27: Análisis PCA escenario daño E3.1.....	85
Figura 5-28: Análisis PCA escenario daño E3.2.....	86
Figura 5-29: Análisis PCA escenario daño E3.3.....	87
Figura 5-30: Análisis PCA escenario daño E4.1.....	88
Figura 5-31: Análisis PCA escenario daño E4.2.....	89
Figura 6-1: Frecuencias Torre Central - Identificación SSI.....	91
Figura 6-2: Variación diaria de frecuencias debido a temperatura	92
Figura 6-3: Variación estacional de frecuencias debido a temperatura.....	93
Figura 6-4: Variación de frecuencias debido a precipitación	93
Figura 6-5: Histogramas de las frecuencias características del edificio Torre Central, para antes y después del 27F.	94
Figura 6-6: Histogramas de frecuencias normalizados para el periodo post 27F. Los datos filtrados corresponden a las frecuencias sin la influencia de sismos, lluvia y seleccionadas en un rango de temperatura 20.5°C a 21.5°C.	95
Figura 6-7: Frecuencia 1 original y calculada con media móvil, en un rango de 13 días.	96
Figura 6-8: Relación entre Temperatura y Humedad Relativa	99
Figura 6-9: Relación entre Temperatura y Radiación Solar	100
Figura 6-10: Relación entre Temperatura y Presión Atmosférica.....	101

Figura 6-11: Relación entre Radiación Solar y Humedad Relativa.....	102
Figura 6-12: Relación entre Precipitación y Saturación del suelo a 10 m	103
Figura 6-13: Relación entre Precipitación y Saturación del suelo a 20 m	104
Figura 6-14: Gráfico de Trellis - Variables ambientales.....	105
Figura 6-15: Relación entre Frecuencia 1 y Temperatura	108
Figura 6-16: Relación entre Frecuencia 2 y Temperatura	108
Figura 6-17: Relación entre Frecuencia 3 y Temperatura	109
Figura 6-18: Relación entre Frecuencia 1 y Presión Atmosférica.....	109
Figura 6-19: Relación entre Frecuencia 2 y Presión Atmosférica.....	110
Figura 6-20: Relación entre Frecuencia 3 y Presión Atmosférica.....	110
Figura 6-21: Relación entre Frecuencia 1 y Radiación Solar	111
Figura 6-22: Relación entre Frecuencia 2 y Radiación Solar	111
Figura 6-23: Relación entre Frecuencia 3 y Radiación Solar	112
Figura 6-24: Relación entre Frecuencia 1 y Humedad Relativa	112
Figura 6-25: Relación entre Frecuencia 2 y Humedad Relativa	113
Figura 6-26: Relación entre Frecuencia 3 y Humedad Relativa	113
Figura 6-27: Relación entre Frecuencia 1 y Saturación del suelo a 10 m	114
Figura 6-28: Relación entre Frecuencia 2 y Saturación del suelo a 10 m	115
Figura 6-29: Relación entre Frecuencia 3 y Saturación del suelo a 10 m	115
Figura 6-30: Relación entre Frecuencia 1 y Temperatura. Análisis mensual.	116
Figura 6-31: Relación entre Frecuencia 2 y Temperatura. Análisis mensual.	117
Figura 6-32: Relación entre Frecuencia 3 y Temperatura. Análisis mensual.	118
Figura 6-33: Relación entre Frecuencia 1 y Humedad Relativa. Análisis mensual.	119
Figura 6-34: Relación entre Frecuencia 2 y Humedad Relativa. Análisis mensual.	120
Figura 6-35: Relación entre Frecuencia 3 y Humedad Relativa. Análisis mensual.	121
Figura 6-36: Relación entre Frecuencia 1 y Presión Atmosférica. Análisis mensual....	122
Figura 6-37: Relación entre Frecuencia 2 y Presión Atmosférica. Análisis mensual....	123
Figura 6-38: Relación entre Frecuencia 3 y Presión Atmosférica. Análisis mensual....	124
Figura 6-39: Relación entre Frecuencia 1 y Temperatura. Desfase 2 h 30 min	127
Figura 6-40: Relación entre Frecuencia 2 y Temperatura. Desfase 18 h	127
Figura 6-41: Relación entre Frecuencia 3 y Temperatura. Desfase 16 h 30 min	128
Figura 6-42: Relación entre Frecuencia 1 y Presión Atmosférica. Desfase 2 h 45 min	128
Figura 6-43: Relación entre Frecuencia 2 y Presión Atmosférica. Desfase 18 h.....	129

Figura 6-44: Relación entre Frecuencia 3 y Presión Atmosférica. Desfase 16 h 15 min	129
Figura 6-45: Relación entre Frecuencia 1 y Humedad Relativa. Desfase 45 min	130
Figura 6-46: Relación entre Frecuencia 2 y Humedad Relativa. Desfase 15 h 30 min	130
Figura 6-47: Relación entre Frecuencia 3 y Humedad Relativa. Desfase 17 h 45 min	131
Figura 6-48: Modelos regresión multiparamétrica T y T-P-H, frecuencia 1	135
Figura 6-49: Modelos regresión multiparamétrica T y T-P-H, frecuencia 1 (2)	135
Figura 6-50: Modelos regresión multiparamétrica T y T-P-H, frecuencia 2	136
Figura 6-51: Modelos regresión multiparamétrica T y T-P-H, frecuencia 2 (2)	136
Figura 6-52: Modelos regresión multiparamétrica T y T-P-H, frecuencia 3	137
Figura 6-53: Modelos regresión multiparamétrica T y T-P-H, frecuencia 3 (3)	137
Figura 6-54: Modelos ARX T y T-P, frecuencia 1	141
Figura 6-55: Modelos ARX T y T-P, frecuencia 1 (2)	142
Figura 6-56: Modelos ARX T y T-P, frecuencia 2	142
Figura 6-57: Modelos ARX T y T-P, frecuencia 2 (2)	143
Figura 6-58: Modelos ARX T y T-P, frecuencia 3	143
Figura 6-59: Modelos ARX T y T-P, frecuencia 3 (2)	144
Figura 6-60: Evaluación ventanas de entrenamiento regresión T-P-H	147
Figura 6-61: Validación modelo ARX, frecuencia 1, entrenamiento mensual	148
Figura 6-62: Validación modelo ARX, frecuencia 1, entrenamiento anual	149
Figura 6-63: Modelos NLARX T y T-P-H, frecuencia 1	151
Figura 6-64: Modelos NLARX T y T-P-H, frecuencia 2	152
Figura 6-65: Modelos NLARX T y T-P-H, frecuencia 3	152
Figura 6-66: Identificación de daño, frecuencia 1. Modelo regresión con T-P-H	154
Figura 6-67: Error periodo de validación modelo regresión- frecuencia 1	154
Figura 6-68: Identificación de daño, frecuencia 2. Modelo regresión con T-P-H	155
Figura 6-69: Error periodo de validación modelo regresión - frecuencia 2	155
Figura 6-70: Identificación de daño, frecuencia 3. Modelo regresión con T-P-H	156
Figura 6-71: Error periodo de validación modelo regresión - frecuencia 3	156
Figura 6-72: Identificación de daño, frecuencia 1. Modelo ARX con T-P	157
Figura 6-73: Error periodo de validación modelo ARX - frecuencia 1	157
Figura 6-74: Identificación de daño, frecuencia 2. Modelo ARX con T-P	158
Figura 6-75: Error periodo de validación modelo ARX - frecuencia 2	158

Figura 6-76: Frecuencias Torre Central Post 27F - Identificación SSI	161
Figura 6-77: Gráficos de Control para 1, 3, 6, 9 y 12 meses de entrenamiento. Novelty Index achurado corresponde al tiempo de entrenamiento de cada gráfico.	162
Figura 6-78: Frecuencias Torre Central y Gráfico de Control, sin sismos. Entrenamiento 12 meses.....	164
Figura 6-79: Frecuencias Torre Central y Gráfico de Control, sin lluvia. Entrenamiento 12 meses.....	165
Figura 6-80: Frecuencias Torre Central y Gráfico de Control, media móvil. Entrenamiento 12 meses.....	167
Figura 6-81: Relación frecuencias 1 y 2	168
Figura 6-82: Relación frecuencias 1 y 3	169
Figura 6-83: Relación frecuencias 2 y 3	169
Figura 6-84: Relación frecuencias 1, 2 y 3	170
Figura 6-85: Relación frecuencias 1, 2 y 3 (2).....	171
Figura 6-86: Relación frecuencias 1, 2 y 3 (3).....	171

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La metodología de identificación de sistemas consiste en analizar la respuesta dinámica, obtenida de manera experimental, con el objetivo de obtener propiedades dinámicas (frecuencias, amortiguamientos y/o formas modales). La adquisición de datos puede ser durante un lapso corto de tiempo, o bien, de manera permanente, lo que corresponde a un sistema de monitoreo de salud estructural (SHM, Structural Health Monitoring).

Un SHM utiliza un conjunto de sensores que se instalan en una estructura de interés (que comprende además un sistema de adquisición y rutinas de procesamiento de datos), con el objetivo de obtener información relativa a la salud de ésta en todo momento mediante el análisis de sus propiedades dinámicas. La implementación de sistemas de monitoreo estructural bien diseñados permiten, entre otras aplicaciones, corroborar suposiciones de diseño (periodos, amortiguamientos, etc.), evaluar la condición estructural y detectar posibles daños en una etapa temprana, proveer información para evaluaciones de seguridad inmediatamente después de eventos extremos tales como un terremoto, determinar si existe deterioro en estructuras antiguas, etc. [Magalhães, 2010].

Sin embargo, la implementación de sistemas de monitoreo estructural confiables requiere tomar en cuenta factores ajenos a la integridad de la estructura, ya que las propiedades dinámicas se ven influenciadas por distintos efectos producidos por la interacción de la estructura con su entorno, además de la variación intrínseca debido a cambios en su configuración y en sus materiales. Así, se pueden apreciar cambios en las propiedades dinámicas debido a efectos ambientales, tales como temperatura, saturación del suelo de fundación, radiación solar, etc., y también por factores operacionales, como por ejemplo la intensidad del tráfico en el caso de puentes [Magalhães, 2009]. Se ha determinado que la temperatura es el factor que tiene la mayor influencia en la variación de las propiedades dinámicas. En [Ni, 2009] se registraron variaciones de hasta 6.69% en las frecuencias naturales en el puente Ting Kau (Hong Kong), debido principalmente a la variación de temperatura.

Producto de lo anterior, y considerando que todos los factores que afectan a las propiedades dinámicas de una estructura pueden actuar de manera simultánea, la evaluación de los efectos ambientales y de operación resulta indispensable para contar con buenos sistemas de monitoreo estructural que provean resultados confiables para cada una de sus aplicaciones, y en particular para la detección de daño estructural, lo cual surge como la principal aplicación de los SHM, y que ha sido objeto de amplia investigación durante el último tiempo.

En general, las características más utilizadas para la implementación de los SHM son las frecuencias características de las estructuras, considerando sólo en algunas ocasiones los factores de amortiguamiento y las formas modales debido a la mayor incertidumbre en su determinación.

En los últimos años se han desarrollado diversas investigaciones para estudiar y evaluar metodologías que permiten considerar el efecto que tienen las condiciones ambientales sobre la variación de las propiedades dinámicas en estructuras [Deraemaeker, 2008; He, 2008; Hu, 2011; Magalhães, 2010; Ni, 2009; Yan, 2005a; Yan, 2005b; Zhou, 2011]. El objetivo principal de estas investigaciones es mejorar los procesos de identificación de sistemas, cuyos resultados se ven afectados debido a los diversos factores ambientales que alteran la respuesta dinámica de las estructuras. El creciente interés en esta área de estudio se debe a que la capacidad de los sistemas de monitoreo de detectar, por ejemplo, daño estructural, se basa en pequeños cambios de las propiedades dinámicas de las estructuras, los cuales son del mismo orden de magnitud o incluso inferiores que los cambios producidos por los efectos ambientales, llevando a que pueda existir un mal diagnóstico de dicho daño [Hu, 2011]. De hecho, se ha establecido que los efectos ambientales plantean uno de los mayores obstáculos en desarrollar aplicaciones exitosas de detección de daño en estructuras reales [Zhou, 2011].

Existen diversas metodologías para considerar los efectos ambientales de la respuesta dinámica de una estructura, las cuales se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. Desarrollo de modelos capaces de representar el fenómeno físico detrás del cambio de las frecuencias de una estructura.
2. Desarrollo de metodologías tipo 'cajas negras', cuyos parámetros están ajustados usando una gran cantidad de observaciones, con el objetivo de establecer relaciones entre las frecuencias naturales y los factores que las pueden afectar. Es necesario contar con las mediciones de los factores que influyen los cambios de frecuencias (temperatura, viento, tráfico, etc). Estos métodos se denominan *Input-Output*.
3. Desarrollo de metodologías basadas en herramientas estadísticas que permitan corregir las frecuencias naturales sin la necesidad de medir los efectos ambientales y operacionales. Estos métodos se denominan *Output-Only*.

Usualmente se estudian las últimas dos opciones, ya que el primer enfoque, a pesar de ser interesante para entender los factores principales que influyen el comportamiento dinámico de las estructuras, no es adecuado para el monitoreo estructural, debido a que para cada nueva aplicación un nuevo modelo debería ser desarrollado, e incluso si así fuera, algunos efectos no podrían ser considerados debido a la complejidad de su modelación.

Los enfoques comúnmente considerados tienen ventajas y desventajas. En el caso de los métodos *input-output*, es difícil obtener buenos resultados cuando un factor con un impacto importante en las frecuencias naturales no es medible. Además, al requerir la medición de los factores ambientales, se requieren más recursos experimentales. Por otra parte, el método *output-only* no necesita medir los parámetros ambientales, lo cual supone una ventaja frente al otro método. Sin embargo, producto de que existe menos información disponible, no todos los cambios que pueden ser detectados por el método *Input-Output* pueden ser detectados con este método.

El presente trabajo estudia metodologías que permiten desacoplar los efectos ambientales sobre la identificación de las propiedades dinámicas de una estructura. El estudio se centra en el comportamiento de edificios de hormigón armado, en los cuales

se ha reportado que la variación de las propiedades dinámicas debido a efectos de servicio no es relevante en comparación a los efectos ambientales, por lo que este factor no es considerado [Lazcano, 2008].

1.1. OBJETIVOS

Los objetivos generales del presente trabajo son los siguientes:

- 1) Estudiar los efectos que tienen los factores ambientales sobre las frecuencias características de una estructura instrumentada.
- 2) Estudiar la efectividad de diversas metodologías que permiten identificar y considerar los efectos ambientales (temperatura, radiación solar, lluvia, etc.) en el contexto de la detección de cambios de estado de una estructura, utilizando registros de frecuencias y factores ambientales.
- 3) Realizar un análisis de cada una de las metodologías estudiadas en el contexto de la detección de daño o deterioro estructural.
- 4) Caracterizar en forma preliminar y experimentalmente la variación de las propiedades del hormigón armado en un rango de temperatura ambiente.
- 5) Realizar un modelo analítico que permita determinar cómo varían las propiedades dinámicas de una estructura frente a variaciones de temperatura.

1.2. METODOLOGÍA

- a) Se realiza una revisión bibliográfica del fenómeno, de tal manera de estudiar y conocer cómo se han implementado las metodologías existentes y analizar los resultados obtenidos de la aplicación de estas metodologías a estructuras existentes.
- b) Se estudian e implementan en el software MATLAB las siguientes metodologías que han sido seleccionadas para considerar los efectos ambientales del proceso de identificación de sistemas:
 - Modelo de Regresión Multiparamétrica Lineal
 - Modelo Autoregresivo con Variable Exógena (ARX)
 - Análisis de las Componentes Principales (PCA)

Estas rutinas se utilizan para procesar los registros de frecuencias del Edificio Torre Central de la FCFM de la Universidad de Chile, en conjunto con los registros de condiciones ambientales obtenidos de la estación meteorológica del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y con los datos de saturación del suelo obtenidos del SHM de la Torre Central.

Estas metodologías se evalúan y se establece su utilidad en el contexto de la detección de cambios de estado en una estructura instrumentada.

- c) Se realiza un ensayo a una viga de hormigón armado, instalando termoresistores en su interior antes del hormigonado, con el objetivo de observar la variación de las propiedades del hormigón en un rango de temperatura ambiente, mediante ensayos de caracterización dinámica.
- d) Se desarrolla un modelo analítico de un edificio bidimensional, utilizando rutinas computacionales, que permita estudiar el comportamiento de las estructuras frente a cambios en la temperatura ambiente, y su relación con el cambio en las propiedades dinámicas. Se generan registros de frecuencias con variaciones por efecto térmico a partir del modelo, con el objetivo de aplicar la metodología PCA sobre ellos.

1.3. ALCANCES

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Se realiza una revisión bibliográfica del tema. Se describen los objetivos, metodología y alcances del trabajo de título.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Se describen las metodologías a utilizar, estableciendo la teoría que las sustenta y describiendo la manera de utilizarlas.

CAPÍTULO 3: REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Se describen las características principales del edificio a analizar. Se establecen las características de las mediciones y datos procesados, así como los instrumentos utilizados en dichas mediciones.

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE EFECTO TÉRMICO

Se describe el experimento que se realiza para observar la variación de propiedades del hormigón armado.

CAPÍTULO 5: MODELO ANALÍTICO

Se describe el modelo analítico realizado para estudiar el comportamiento de una estructura frente a cambios de temperatura, y su relación con la variación de sus propiedades dinámicas.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se analizan los resultados obtenidos de cada uno de los métodos desarrollados, así como el análisis del efecto de los factores ambientales sobre las frecuencias características de un edificio instrumentado.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

Se concluye con respecto a los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describen las metodologías en estudio, estableciendo su teoría y la manera en que cada una es utilizada.

2.1. REGRESIÓN MULTIPARÁMETRICA LINEAL

Un análisis de regresión es una metodología estadística utilizada para predecir valores de una o más variables dependientes a partir de un conjunto de predictores o variables independientes. En particular, en este estudio se desarrollan análisis de regresión a partir de las frecuencias características estimadas de la estructura y de los factores ambientales medidos mediante una estación meteorológica.

El método más simple para establecer un modelo que relacione los efectos ambientales y las frecuencias naturales es la regresión multiparamétrica lineal, cuya forma general se muestra en la siguiente ecuación [Johnson and Wichern, 1992]:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot z_{i1} + \dots + \beta_k z_{ik} + \dots + \beta_r z_{ir} + \varepsilon_i \quad (2.1)$$

En donde:

- y_i : Variable dinámica en el tiempo i
- z_{ik} : Variable ambiental k en el tiempo i
- β_k : Coeficiente asociado a la variable ambiental k
- ε_i : Error asociado a la observación en el instante de tiempo i

En forma matricial, el modelo anterior se representa como:

$$Y = Z \cdot \beta + \varepsilon \quad (2.2)$$

En donde:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}; \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_k \end{pmatrix}; Z = \begin{pmatrix} 1 & z_{11} & \dots & z_{1r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & z_{n1} & \dots & z_{nr} \end{pmatrix}; \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$$

De (2.2) se tiene que:

$$\varepsilon = Y - Z \cdot \beta \quad (2.3)$$

Y pre multiplicando por el traspuesto a cada lado de la ecuación, se obtiene:

$$\varepsilon^t \cdot \varepsilon = (Y - Z \cdot \beta)^t \cdot (Y - Z \cdot \beta) \quad (2.4)$$

Utilizando el método de los mínimos cuadrados se determinan los valores de β de manera de minimizar la suma de los cuadrados de los errores. Dado que los valores para β encontrados con el método de los mínimos cuadrados son estimaciones, éstos se denominan $\hat{\beta}$.

Por lo tanto, se definen las estimaciones de $\hat{\beta}$ de la siguiente manera:

$$\hat{\beta} = (Z^t \cdot Z)^{-1} \cdot Z^t \cdot Y \quad (2.5)$$

Estas estimaciones se obtienen utilizando distintos periodos de datos, para determinadas variables ambientales. Estas variables se definen en función de su correlación con las frecuencias características de la estructura, además de la correlación que existe entre variables ambientales.

2.1.1. Criterio de selección de variables ambientales para el modelo de regresión

Para seleccionar las variables ambientales para el modelo de regresión, se debe realizar un estudio de los coeficientes de correlación entre las variables ambientales y las propiedades dinámicas. Para llevar a cabo este análisis, se estudia el coeficiente de correlación R y el coeficiente de determinación R², definidos como:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{var(z, y)}{\sqrt{cov(z) \cdot cov(y)}} \quad (2.6)$$

$$R^2 = \frac{var(z, y)^2}{cov(z) \cdot cov(y)} \quad (2.7)$$

En donde:

z_i : Variable 1

y_i : Variable 2

El coeficiente de correlación R se encuentra entre -1 y 1 indicando una correlación negativa o positiva respectivamente, mientras que el coeficiente de determinación R^2 se encuentra entre 0 y 1 indicando una correlación nula o máxima respectivamente.

Para tener una noción sobre qué variables se podrían utilizar en los modelos, se utiliza el siguiente criterio [Basoalto, 2013]:

- Si el valor de R^2 entre una variable dinámica y una ambiental es muy baja (<0,30), no se considera dicha variable ambiental en el análisis multiparamétrico de la variable dinámica en cuestión.
- Si el valor de R^2 entre dos variables ambientales es muy alta (>0,60), solo es necesario incluir una de estas en el análisis multiparamétrico, la de mejor correlación con cada variable dinámica.

2.2. ARX

ARX (*AutoRegressive eXogenous model*) es un tipo de modelación que mediante la utilización de variables de entrada y de salida (modelo *input-output*) permite generar predicciones de una variable objetivo, dadas observaciones previas. El término autoregresivo hace referencia a la utilización de valores conocidos de la variable que se quiere modelar, mientras que la parte exógena corresponde a variables usadas como predictores. En el caso de la modelación de los efectos ambientales en el proceso de

identificación de daño mediante el análisis de las propiedades dinámicas de una estructura, las variables de entrada del modelo corresponden a los efectos ambientales que producen variación en dichas propiedades, mientras que las variables de salida corresponden a las propiedades dinámicas, como por ejemplo, las frecuencias características de vibrar.

En el caso en que se considera solamente un input y un output (*SISO: single input single output*), la forma general de un modelo ARX se muestra en la siguiente ecuación:

$$y_k = -a_1 \cdot y_{k-1} - \dots - a_{n_a} \cdot y_{k-n_a} + b_1 \cdot u_{k-n_k} + \dots + b_{n_b} \cdot u_{k-n_k-n_b+1} + \varepsilon_k \quad (2.8)$$

Donde y_k es el valor de la variable dependiente (output) en el instante k , u_k es el valor del predictor (input), a_k y b_k son parámetros del modelo que se estiman mediante mínimos cuadrados, y ε_k es el error que modela las perturbaciones que actúan en el proceso [Peeters, 2001]. Si se quieren considerar varias variables de entrada, la ecuación (2.8) se puede adaptar, reemplazando u_k y b_k por vectores columna y fila respectivamente.

El modelo ARX está caracterizado por 3 coeficientes:

1. El orden autoregresivo n_a : número de observaciones pasadas de la variable de salida que se consideran en el modelo.
2. El orden exógeno n_b : número de valores a considerar de la variable de entrada.
3. El retraso n_k : número de muestras que ocurren antes de que las variables de entrada afecten a las variables de salida.

En forma matricial, la predicción del modelo ARX se expresa como:

$$\hat{Y} = \varphi^T \cdot \Theta \quad (2.9)$$

En donde:

$$\varphi = \begin{pmatrix} -y_{k-1} \\ \dots \\ -y_{k-n_a} \\ u_{k-n_a} \\ \dots \\ u_{k-n_k-n_b+1} \end{pmatrix}; \Theta = \begin{pmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_{n_a} \\ b_1 \\ \dots \\ b_{n_b} \end{pmatrix}$$

Por lo que:

$$\varepsilon = Y - \varphi^T \cdot \Theta \quad (2.10)$$

Y definiendo la función de pérdida (*loss function*):

$$V_N(\Theta) = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{n=1}^N \varepsilon_k^2 \quad (2.11)$$

Finalmente, los coeficientes del modelo ARX se obtienen minimizando la función de pérdida $V_N(\Theta)$.

2.2.1. Criterio de evaluación de modelos

Para la evaluación tanto de los modelos de regresión como de los modelos ARX se utiliza un coeficiente de ajuste llamado *Normalized root-mean-square error*, el cual es utilizado en el *System Identification Tool* de MATLAB para determinar la calidad de los modelos. Este coeficiente se define en la ecuación siguiente:

$$NRMSE = 100 \cdot \left(1 - \frac{||y - \hat{y}||}{||y - \bar{y}||}\right) \quad (2.12)$$

En donde:

- y : Frecuencias medidas
- \hat{y} : Frecuencias modeladas
- \bar{y} : Promedio frecuencias medidas

2.2.2. Identificación de daño

Los modelos obtenidos a partir de la regresión multiparamétrica (o a partir de ARX) generados en un estado saludable de la estructura, permiten crear predicciones de las frecuencias de dicha estructura en base a las variables ambientales utilizadas como predictores, comparando dichas predicciones con los registros reales de frecuencias, permitiendo establecer la existencia de daño estructural en el caso en que las predicciones se alejen más allá de un umbral de las frecuencias medidas.

En [Peeters, 2001; He, 2008] se define el error de simulación, dado por la diferencia entre las frecuencias medidas y las frecuencias simuladas en el tiempo k como:

$$\hat{d}_k = y_k - \hat{y}_k \quad (2.13)$$

Analizando las propiedades estadísticas de esta diferencia, se llega a la conclusión que el intervalo de confianza igual a $100 \cdot (1 - \alpha)$ para y_k está dado por:

$$\left[\hat{y}_k - t_{\alpha/2,v} \sqrt{\hat{P}_{\hat{d}_k}}, \hat{y}_k + t_{\alpha/2,v} \sqrt{\hat{P}_{\hat{d}_k}} \right] \quad (2.14)$$

En donde:

\hat{y}_k : Frecuencia simulada en el instante k

$t_{\alpha/2,v}$: Valor encontrado en una tabla estadística de la distribución t

$\hat{P}_{\hat{d}_k}$: Varianza del error de simulación

Para $\alpha = 0.05$ (intervalo de confianza de 95%) y considerando que $v = N - d$, con N la cantidad de datos y d la cantidad de parámetros del modelo ($N > d$), se tiene que $t_{\alpha/2,v} = 1.96$. El significado de un intervalo de confianza de 95% es que el 95% de los datos y_k estarán dentro del intervalo.

Lo anterior permite generar un gráfico de control en donde se visualiza la existencia de variaciones fuera de lo predecible con las variables ambientales, lo que podría suponer la existencia de daño estructural.

Este método se utiliza tanto para los modelos de regresión multiparamétrica como para los modelos con ARX.

2.3. PCA

PCA (*Principal Component Analysis*) es una herramienta estadística usada comúnmente para reducir la dimensión de un conjunto de datos, sustituyendo un grupo de variables relacionadas, por un nuevo grupo más pequeño de variables independientes, las cuales son designadas como componentes principales.

Consideremos una matriz $Y \in R^{n \times N}$, en la cual cada fila corresponde a una variable, y cada columna corresponde a la medición de dicha variable en cada instante de tiempo t_k . Las variables originales almacenadas en la matriz Y pueden ser transformadas en un conjunto de variables $X \in R^{m \times N}$ a través de la siguiente ecuación:

$$X = T \cdot Y \quad (2.15)$$

Donde $T \in R^{m \times n}$, con $m \leq n$, es una matriz ortogonal (su inversa coincide con su traspuesta) que aplica una rotación al sistema de coordenadas original.

El objetivo de PCA es encontrar una transformación que lleve a una serie de variables X (componentes principales) que sean independientes entre sí, de tal manera que la matriz de covarianza de X sea diagonal, y además, que las variables se ordenen de mayor a menor en función de sus varianzas. De esta manera, la primera componente principal, X_1 , explica la mayor proporción de la varianza de las variables originales, mientras que las últimas componentes principales explican una menor proporción de dicha varianza.

Considerando la relación entre X e Y dada en la ecuación (2.15), y teniendo en cuenta la ortogonalidad de T , la matriz de covarianza de Y designada por Σ , puede relacionarse con la matriz de covarianza de X designada por Λ , a través de la siguiente expresión:

$$\Sigma = E[Y \cdot Y^T] = E[T^T \cdot X \cdot X^T \cdot T] = T^T \cdot \Lambda \cdot T \quad (2.16)$$

Y dado que la descomposición en valores singulares da:

$$\Sigma = U \cdot S \cdot U^T \quad (2.17)$$

Las matrices obtenidas mediante la descomposición SVD se pueden usar para obtener la matriz de transformación ($T = U^T$) y las varianzas de las componentes de X (elementos en la diagonal de la matriz S).

La característica principal del método consiste en la posibilidad de determinar componentes principales que explican en mayor o menor medida la variabilidad de las variables medidas. Dado que los algoritmos que realizan la descomposición SVD entregan valores singulares en orden decreciente, el primer elemento de la diagonal de S coincide con la varianza de X_1 , mientras que el resto de los valores singulares decrecen, así como las varianzas de las componentes de X . De esta manera es posible dividir la matriz S en dos partes: $S_1 = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_p)$ y $S_2 = \text{diag}(s_{p+1}, s_{p+2}, \dots, s_m)$, en donde S_1 es una matriz diagonal que contiene los primeros p valores singulares, y S_2 , una matriz diagonal que tiene el resto de valores singulares, los cuales no son relevantes para explicar la variabilidad de las componentes de Y .

Una manera de determinar el valor de p es mediante la determinación de la siguiente relación:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^p s_i}{\sum_{i=1}^m s_i} \quad (2.18)$$

Esta razón determina el porcentaje de la varianza de los datos observados que está representada por los p primeros componentes de X . De esta manera, para determinar p es posible definir un valor mínimo para I , por ejemplo 0.95.

Una vez que se ha escogido p , el conjunto de variables X_1 a X_p puede ser calculado mediante la ecuación (2.15), usando una matriz \hat{T} construida a partir de las primeras p columnas de U . Una vez reducida la dimensión del conjunto de variables originales a través de la matriz \hat{T} , es posible hacer una reasignación de las variables al espacio original. De esta manera se tiene que:

$$\hat{Y} = \hat{T}^T \cdot \hat{T} \cdot Y \quad (2.19)$$

En donde \hat{Y} corresponde a las variables originales modificadas, las cuales conservan la variación debido a aquellos factores que producen más varianza en los datos originales, descartando los factores que producen poca variabilidad en éstos, los cuales en el caso de que las variables medidas sean, por ejemplo, frecuencias en una estructura, pueden corresponder a errores de medición o a daño estructural.

Una vez que las variables modificadas son calculadas, la matriz de error residual puede ser obtenida de la siguiente manera:

$$\varepsilon = Y - \hat{Y} \quad (2.20)$$

A partir del error de predicción ε_k obtenido en el tiempo t_k , el *Novelty Index* (NI) se define usando la norma euclidiana:

$$NI_k^\varepsilon = \|\varepsilon_k\| \quad (2.21)$$

Definiendo \overline{NI} y σ como el valor medio y la desviación estándar de NI obtenidos en el estado de referencia, un gráfico de control (*control chart*) se construye dibujando una línea central (*Center Line, CL*) en \overline{NI} y dos líneas horizontales adicionales correspondientes a los límites superior e inferior (*Upper Control Limit, UCL*, y *Lower Control Limit, LCL*), definidos como sigue:

$$CL = \overline{NI} \quad (2.22)$$

$$UCL = \overline{NI} + \alpha\sigma \quad (2.23)$$

$$LCL = \overline{NI} - \alpha\sigma \quad (2.24)$$

Donde el coeficiente α se toma igual a 3, lo que corresponde a un intervalo de confianza de 99.7%, bajo la suposición de una distribución normal. En la ausencia de daño, el *Novelty Index* debería permanecer entre los límites UCL y LCL, y en el caso

que existiera daño estructural el índice debería salirse de los límites del gráfico de control [Yan, 2005].

2.3.1. Interpretación gráfica método PCA

En la Figura 2-1 se muestra una interpretación gráfica bidimensional del método PCA, en donde se tienen dos propiedades, f_1 y f_2 , las cuales corresponde a frecuencias en una estructura. Los datos en círculos corresponden a un estado de referencia de la estructura (estado saludable), los que se reparten en una nube de puntos de forma elíptica, cuyo eje mayor está en la dirección del eje PC-I, mientras que el eje menor está en la dirección del eje perpendicular PC-II. En el caso de una estructura, la variación principal (componente principal I) corresponde principalmente al efecto que tiene la temperatura sobre ésta, y la variación en el otro eje se produce por otros efectos, como imprecisiones en el proceso de identificación, daño estructural u otros factores ambientales.

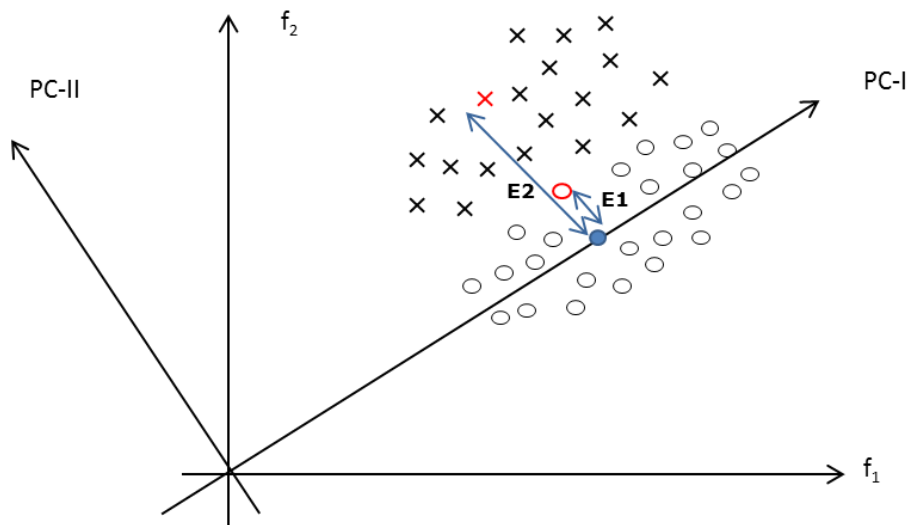


Figura 2-1: Ejemplo bidimensional del método PCA

En el caso en que se produzca daño o deterioro estructural, la relación entre las frecuencias f_1 e f_2 cambiará, produciendo que la nube de puntos migre en el espacio $f_1 - f_2$. Los nuevos valores de frecuencias se representan por cruces en la figura. Estos datos corresponden a un estado dañado de la estructura. El objetivo de PCA es identificar este daño, cuantificando cuánto varían las frecuencias en función de un

estado de referencia, lo que se realiza proyectando las frecuencias en el estado de referencia en la componente principal I, lo cual considera solo los efectos producidos por la temperatura (círculo azul en la figura). Una vez proyectados los datos al eje PC-I, los datos se re proyectan en los ejes originales y se cuantifica la diferencia entre el dato original y el dato re proyectado, lo cual se denomina como error E1. Por otra parte, una vez que la estructura se ha dañado, se cuantifica la diferencia entre el dato de la estructura dañada y el dato re proyectado, lo cual se denomina como error E2. Si el error E2 difiere del error E1 dentro de un rango, el método indicará que se produjo daño estructural.

CAPÍTULO 3: REVISIÓN DE ANTECEDENTES

En el presente capítulo se describe el edificio a analizar y se caracteriza la red de sensores instalados en éste, así como la red de sensores que registra las condiciones ambientales.

3.1. Descripción del Edificio Torre Central

El edificio Torre Central es una estructura ubicada en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, la cual fue construida en 1962 y que alberga oficinas administrativas, el Departamento de Ingeniería Mecánica y las dependencias del Decanato.

La estructura consta de 9 pisos y 2 subterráneos, con una altura de 30.2 m y un área en planta de 30 x 19 m², sumando una superficie total aproximada de 4.600 m². El edificio está estructurado en base a muros de hormigón armado, con un espesor típico de muro de 35 cm y un espesor típico de losa de 25 cm. La razón entre el área total de muros y el área total en planta es de 7.7%.

En la Figura 3-1 se muestran fotografías de las fachadas de la estructura.



Fachada Norte



Fachada Poniente



Fachada Sur



Fachada Oriente

Figura 3-1: Imágenes Torre Central [Basoalto, 2013]

3.2. Instrumentación

Desde el año 2009 la Torre Central cuenta con un sistema de monitoreo estructural, el cual consiste en una red de 11 sensores, de los cuales 8 son

acelerómetros uniaxiales y 3 son sensores de humedad instalados a un costado del edificio a distintas profundidades. Adicionalmente, se cuenta con la información meteorológica obtenida por medio de 6 sensores ambientales, los cuales forman parte de una estación meteorológica mantenida por el Departamento de Geofísica de la FCFM.

3.2.1. Instrumentación Torre Central

La Torre Central cuenta con una red de sensores para monitorear el estado de la estructura y la humedad del suelo de fundación. En particular, se dispone de 8 acelerómetros uniaxiales de fuerza balanceada, modelo ES-U2 de marca Kinometrics, configurados en un rango de ± 0.25 g, con dos sistemas de adquisición paralelos: uno para eventos sísmicos, el cual no posee amplificación de la señal y que cuenta con un sistema para gatillar la adquisición de datos, mientras que el otro sistema posee una amplificación de 10 para vibraciones ambientales [Boroschek, 2010].

Las características y la disposición de los sensores se muestran en la Tabla 3-1 y en la Figura 3-2 [León, 2013].

Tabla 3-1: Características acelerómetros Torre Central

Canal	Ubicación	Sensor	Serial	Dirección	Observaciones
1	Piso 8	EPI 4	346	Este - Oeste	-
2	Piso 8	EPI 5	345	Norte - Sur	-
3	Piso 8	EPI 6	504	Norte - Sur	Exterior
4	Piso 3	EPI 7	1334	Este - Oeste	-
5	Piso 3	EPI 8	1336	Norte - Sur	-
6	Piso 3	EPI 9	1335	Norte - Sur	Exterior
7	Subterráneo	EPI 10	1337	Este - Oeste	-
8	Subterráneo	EPI 12	1339	Norte - Sur	-

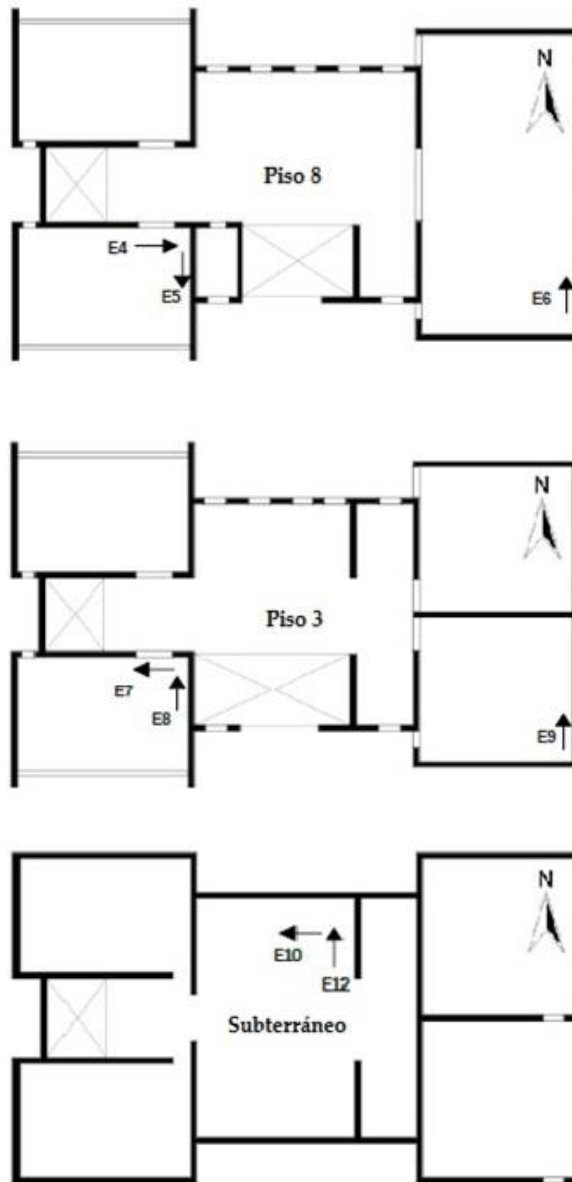


Figura 3-2: Ubicación acelerómetros Torre Central.

Por otra parte, se dispone de 3 sensores de humedad, modelo MP406 de marca ICT International, instalados en un pozo (Figura 3-3) en el lado poniente de la estructura, a 5, 10 y 20 metros de profundidad. Estos sensores registran la saturación del suelo de manera permanente, y reportan los datos de manera conjunta con la red de acelerómetros.

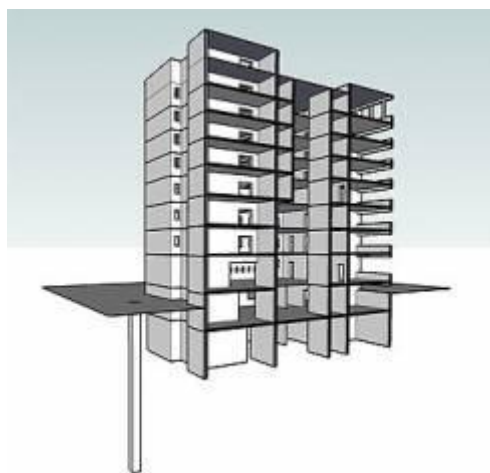


Figura 3-3: Pozo en donde se ubican los sensores de humedad [Boroschek, 2010]

3.2.2. Estación Meteorológica DGF

El departamento de Geofísica de la FCFM dispone de una estación meteorológica instalada en el techo del edificio que alberga los departamentos de Ingeniería Civil y Geofísica. Esta estación registra las condiciones ambientales de manera continua: velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación solar, precipitación, humedad relativa y presión atmosférica. Las condiciones meteorológicas son reportadas cada 15 minutos (el valor reportado corresponde al promedio de los datos adquiridos en los 15 minutos previos). Las características de los sensores se muestran en la Tabla 3-2. La estación meteorológica se muestra en la Figura 3-4.

Tabla 3-2: Sensores estación meteorológica DGF

Variable	Instrumento	Marca / Modelo
Temperatura del aire (°C)	Higro-termómetro de estado sólido	CS-500, Campbell Sci.
Humedad relativa (%)	Higro-termómetro de estado sólido	CS-500, Campbell Sci.
Radiación Solar (W/m ²)	Piranómetro silicon	LI200X, Campbell Sci.
Presión Atmosférica (hPa)	Barómetro estado sólido	PTA-127, Vaisala.
Precipitación (mm)	Pluviómetro de báscula	TE525mm, Texas Instruments
Viento (Magnitud en m/s, dirección en grados sex.)	Anemómetro + veleta	03001 Wind Sentry Wind Set, Young.



Figura 3-4: Estación meteorológica DGF

3.3. Registros de variables ambientales

Para el análisis del efecto de las variables ambientales sobre las propiedades dinámicas de la Torre Central, se cuenta con los registros obtenidos por la estación meteorológica descrita en 3.2.2. Como se indica en la mencionada sección, las variables ambientales obtenidas por esta estación meteorológica son:

- Temperatura del aire
- Humedad relativa del ambiente
- Radiación solar
- Presión barométrica
- Precipitación
- Velocidad del viento
- Dirección del viento

Por otra parte, se cuenta con la información obtenida de los sensores de humedad instalados a un costado de la Torre Central, los cuales registran la saturación del suelo a 5, 10 y 20 m de profundidad. A continuación se muestran las series de tiempo de las variables ambientales entre los años 2009 y 2011. Para el caso de la lluvia se presentan dos gráficos distintos: uno considera cada dato de lluvia como un evento independiente (cada 15 minutos), y el segundo considera que existen eventos de lluvia acumulada, los cuales se separan en función de si ha llovido o no una hora antes de cada nuevo evento.

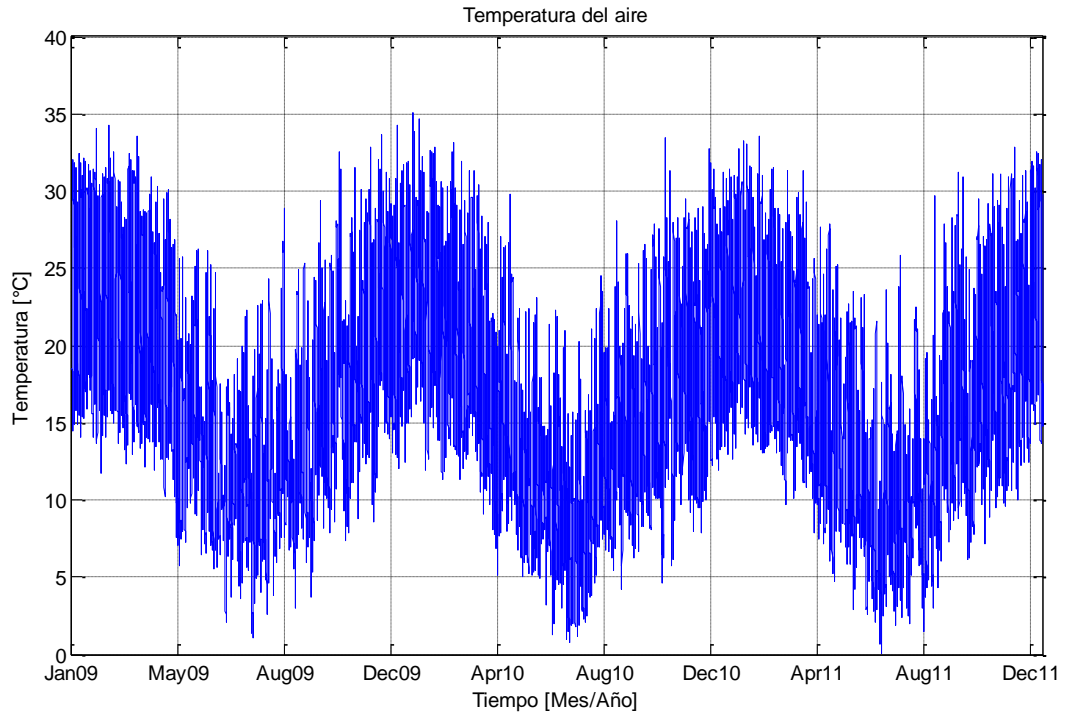


Figura 3-5: Temperatura del aire

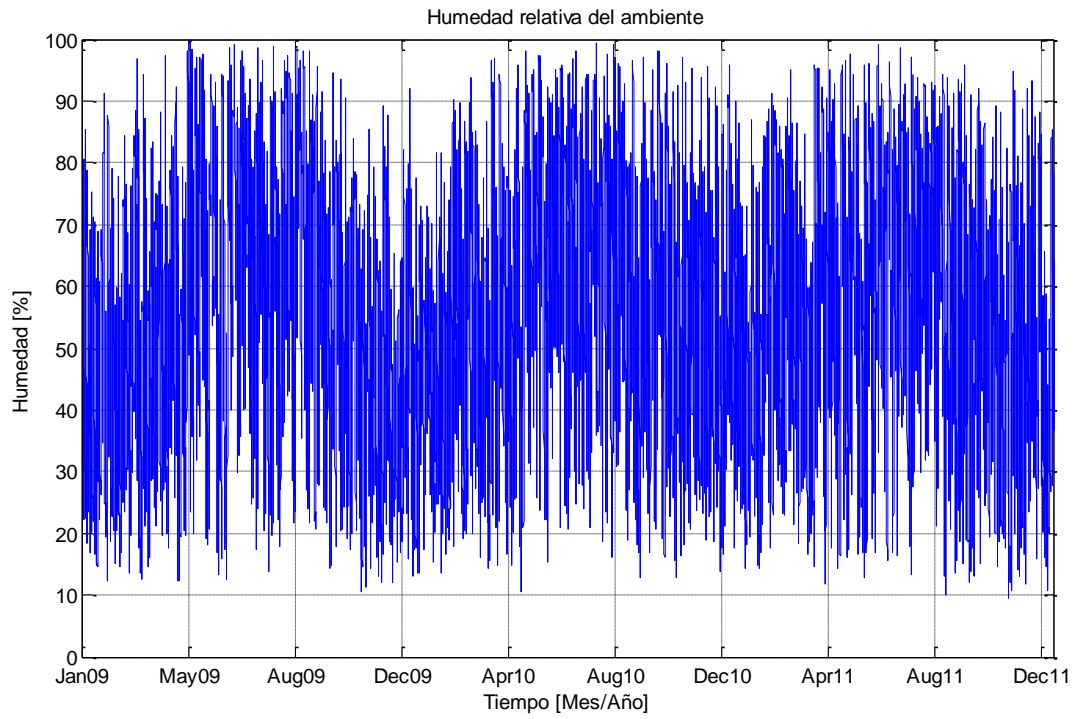


Figura 3-6: Humedad relativa del ambiente

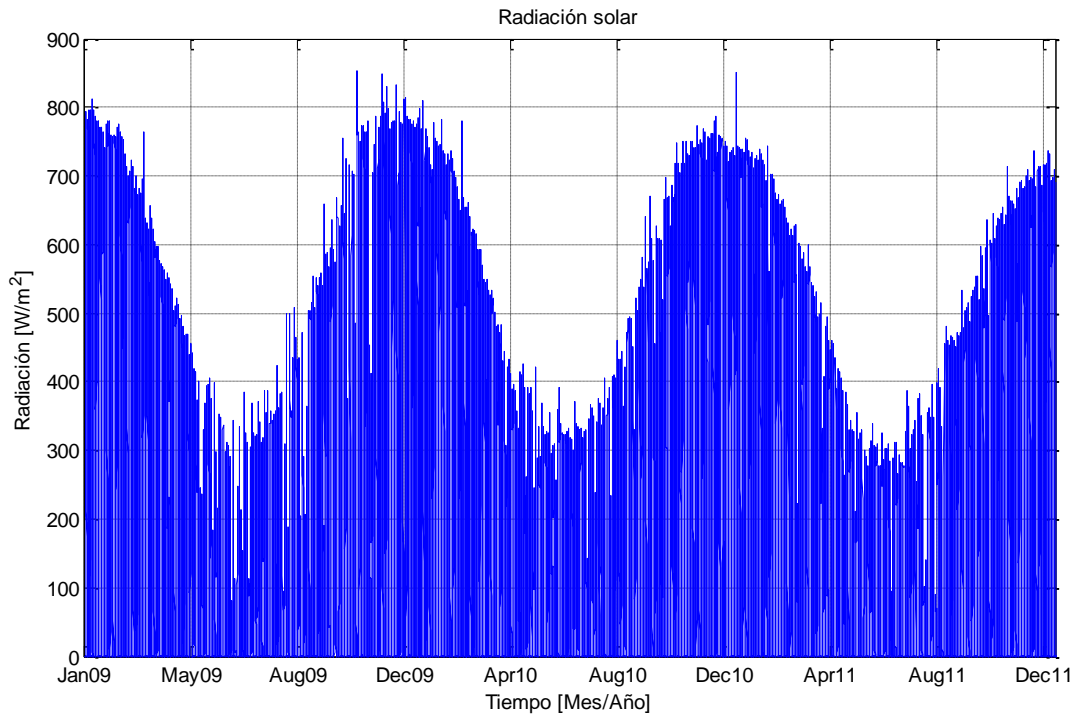


Figura 3-7: Radiación solar

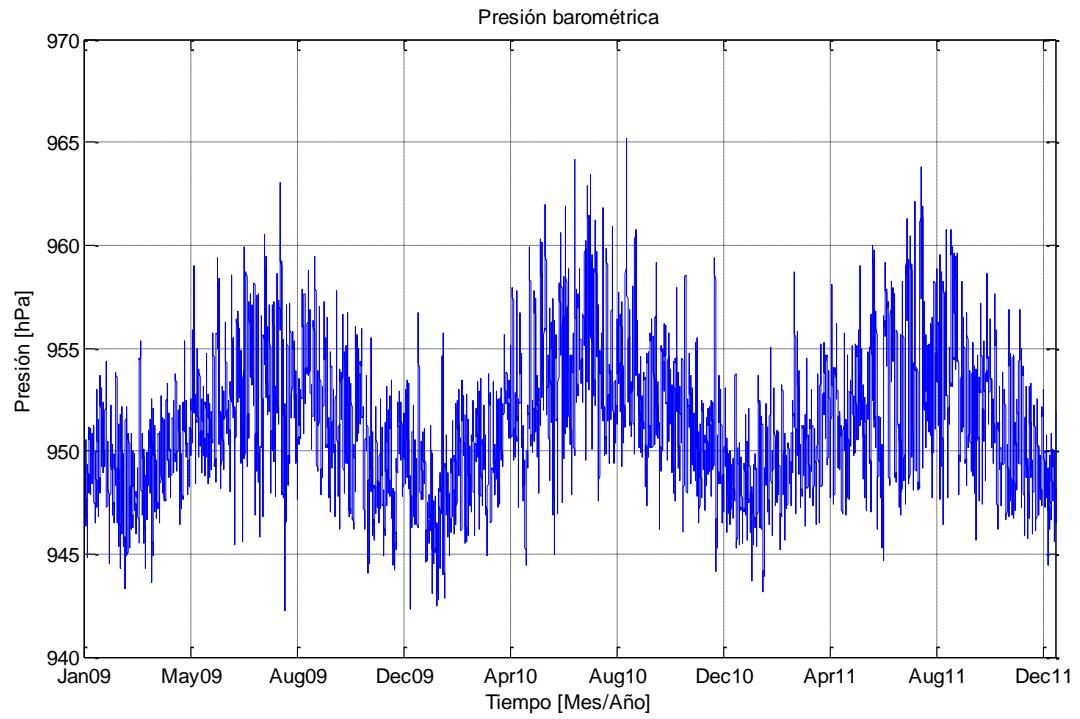


Figura 3-8: Presión barométrica

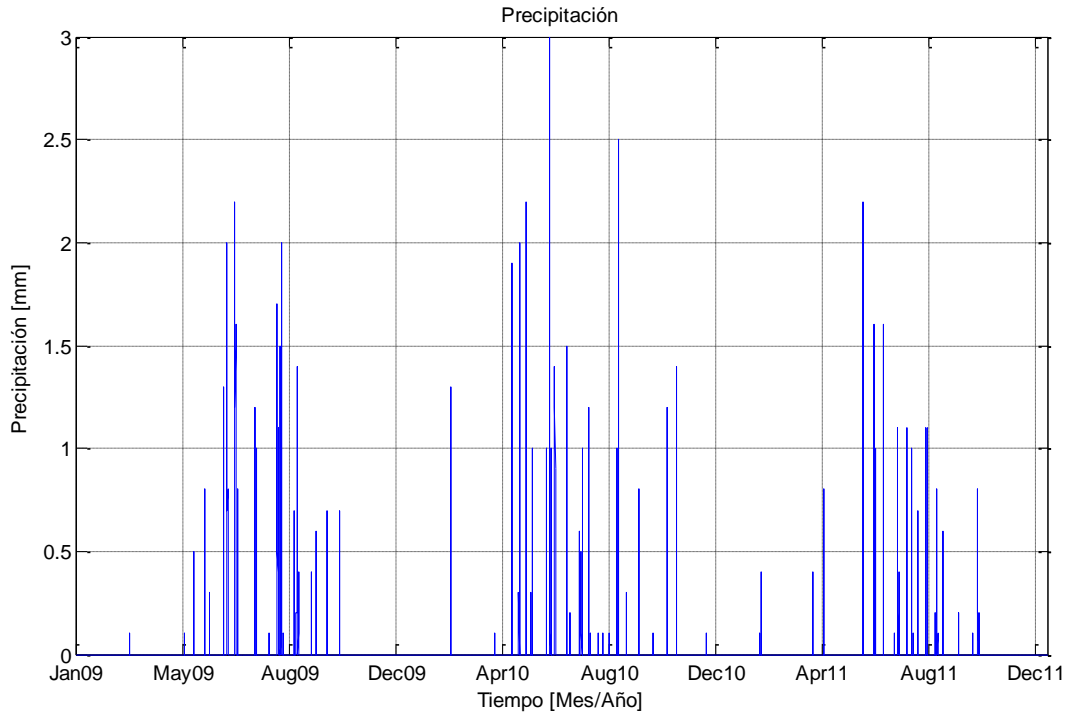


Figura 3-9: Precipitación I. Eventos cada 15 minutos.

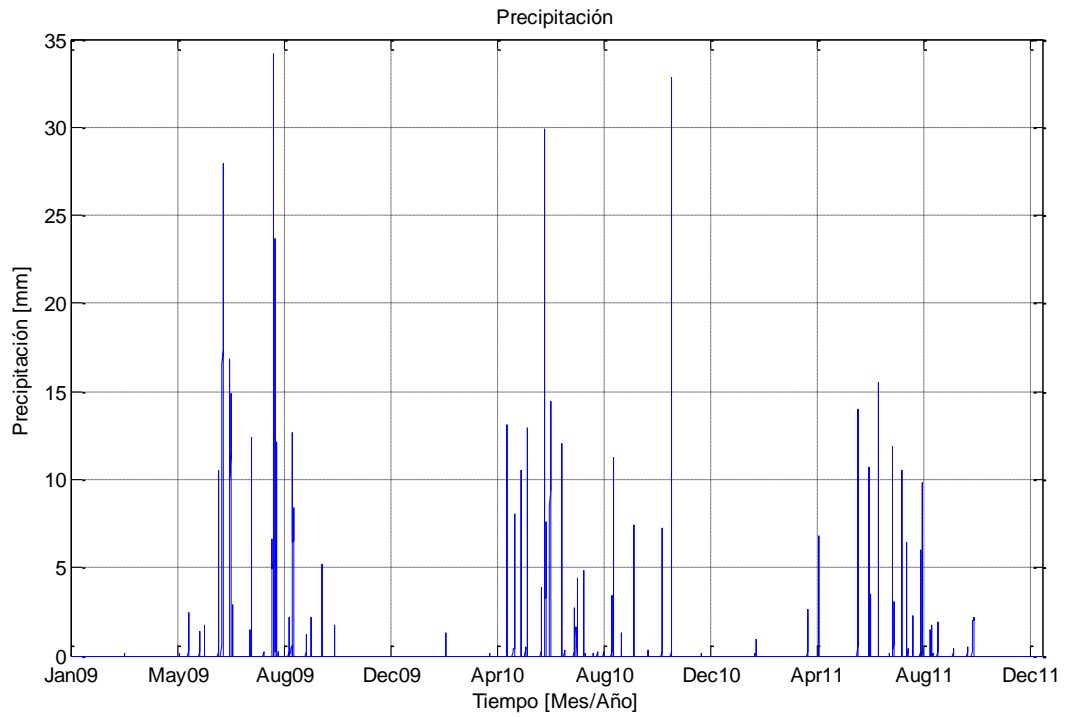


Figura 3-10: Precipitación II. Eventos de lluvia acumulada.

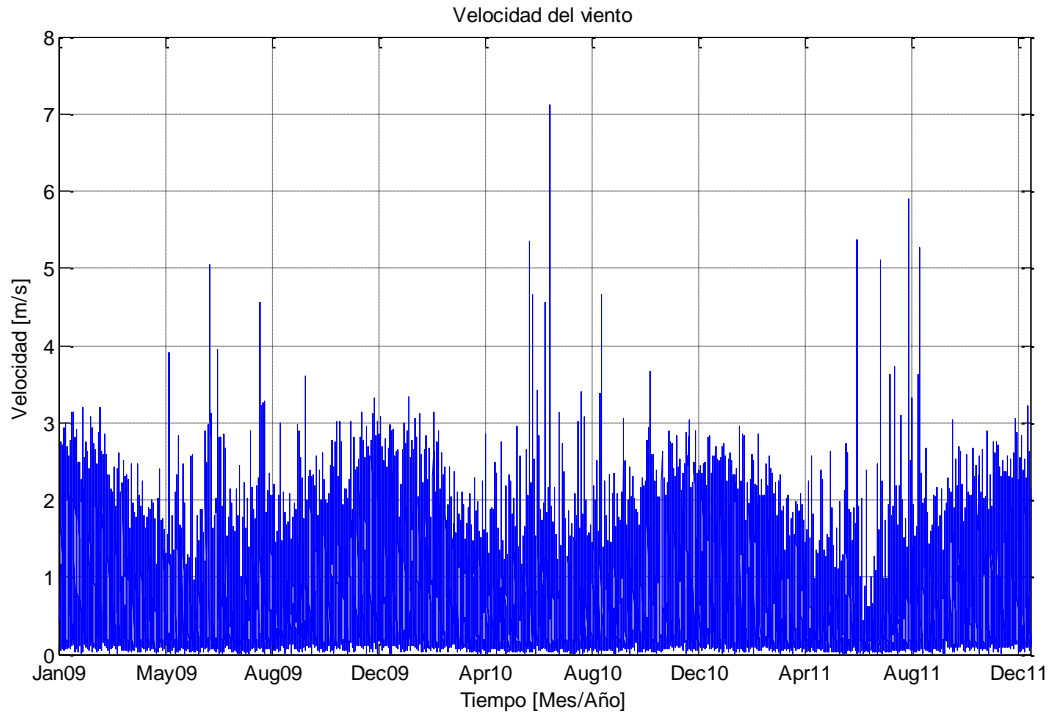


Figura 3-11: Velocidad del viento

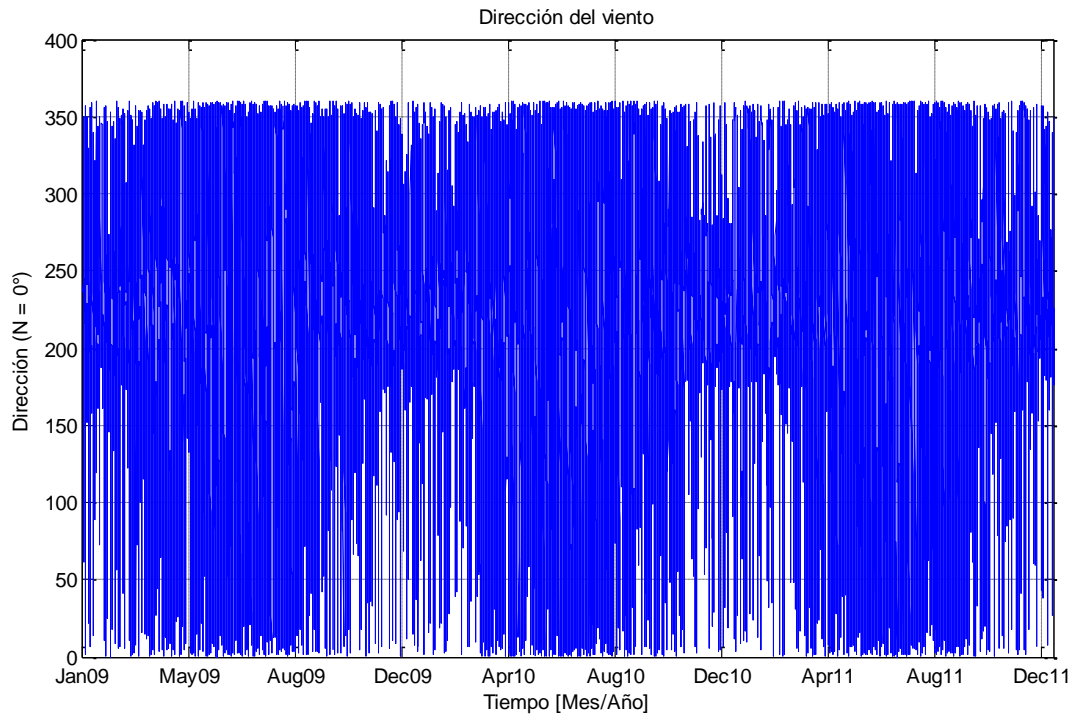


Figura 3-12: Dirección del viento

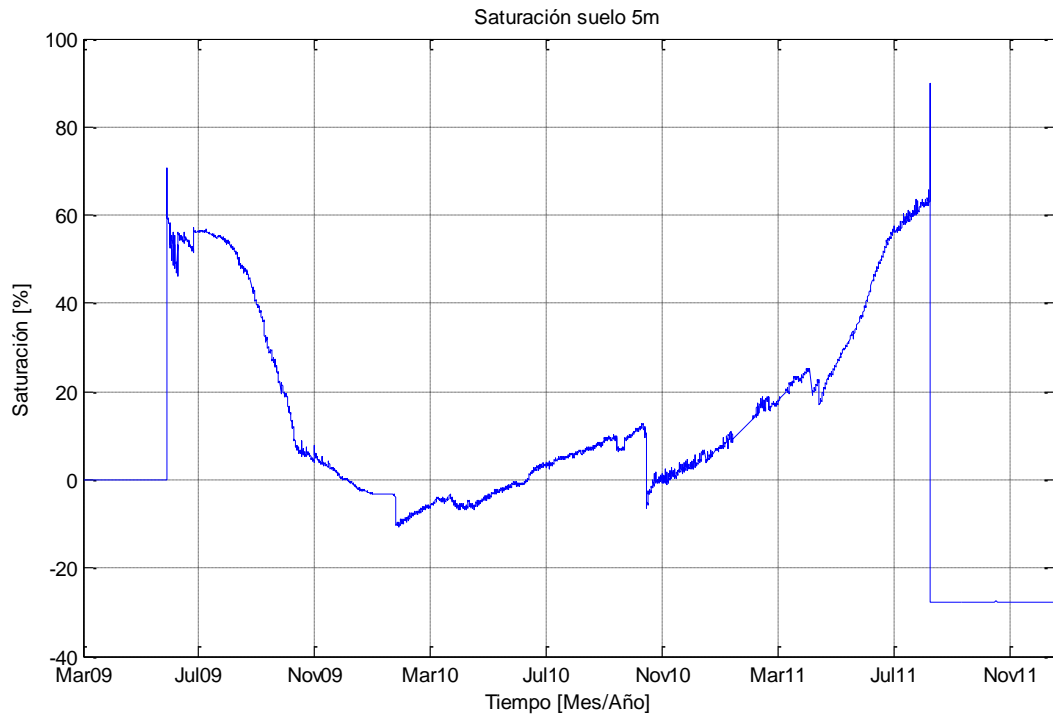


Figura 3-13: Saturación suelo a 5 m de profundidad

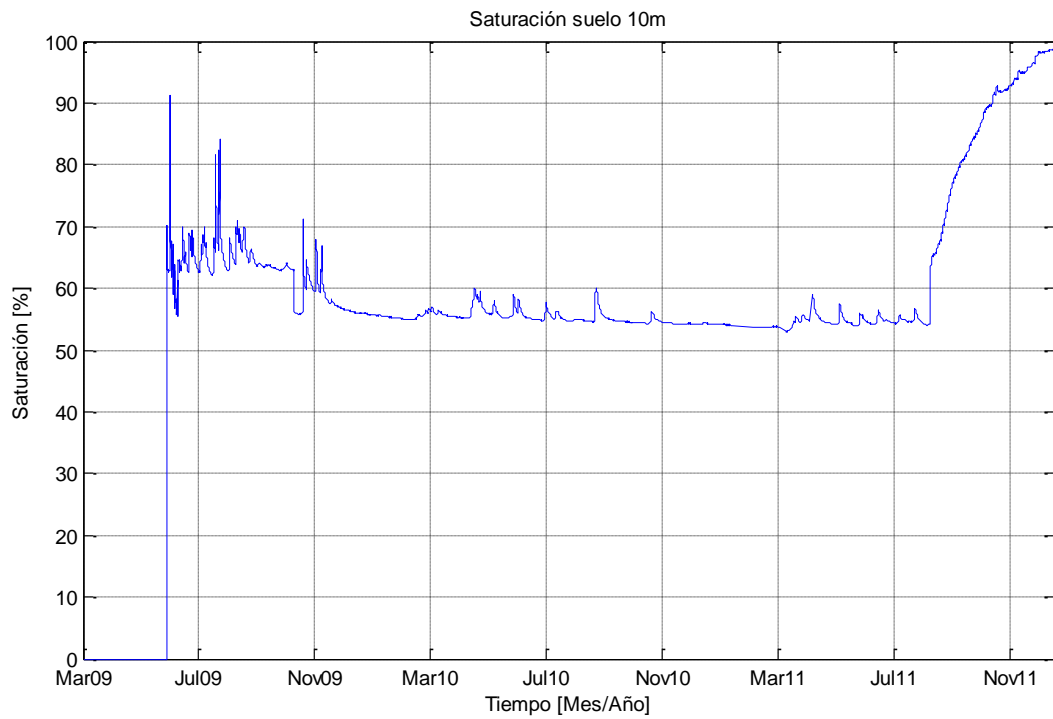


Figura 3-14: Saturación suelo a 10 m de profundidad

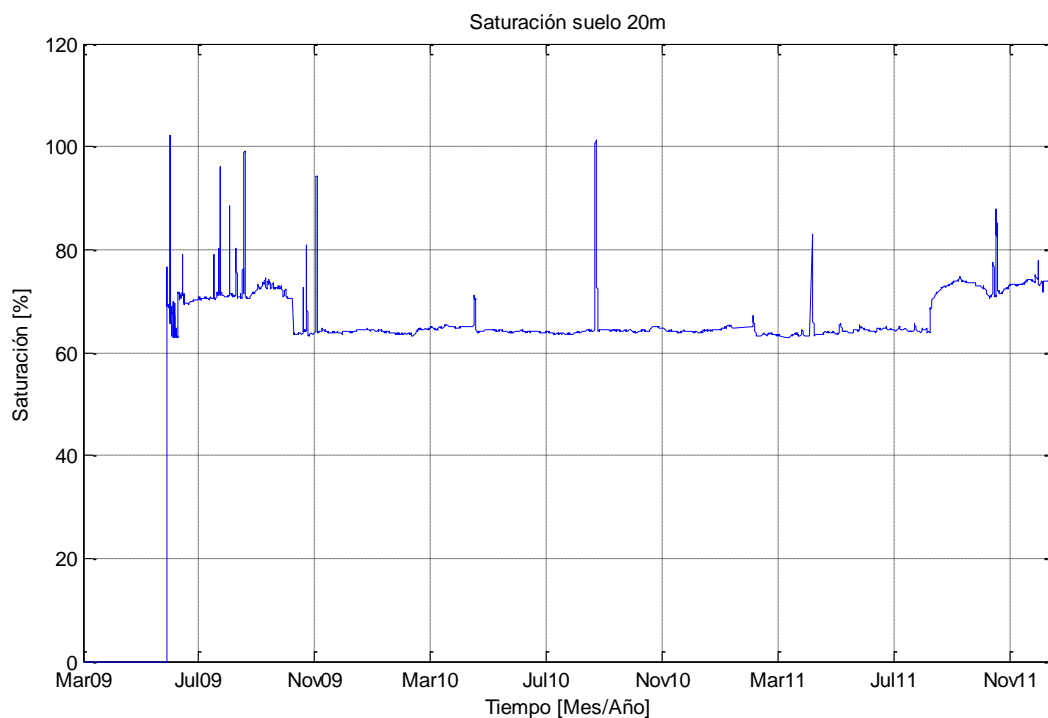


Figura 3-15: Saturación suelo a 20 m de profundidad

Adicionalmente, se generan histogramas de las variables ambientales y se obtienen valores estadísticos de los datos. Para el caso de los datos de precipitación y radiación solar se omiten los datos igual a 0, pues al ser valores tan recurrentes, los histogramas no se pueden mostrar con claridad. Por otra parte, los datos de precipitación se grafican en dos histogramas distintos: uno considera cada dato de lluvia como un evento independiente (cada 15 minutos), y el segundo considera que existen eventos de lluvia acumulada, los cuales se separan en función de si ha llovido o no una hora antes de cada nuevo evento.

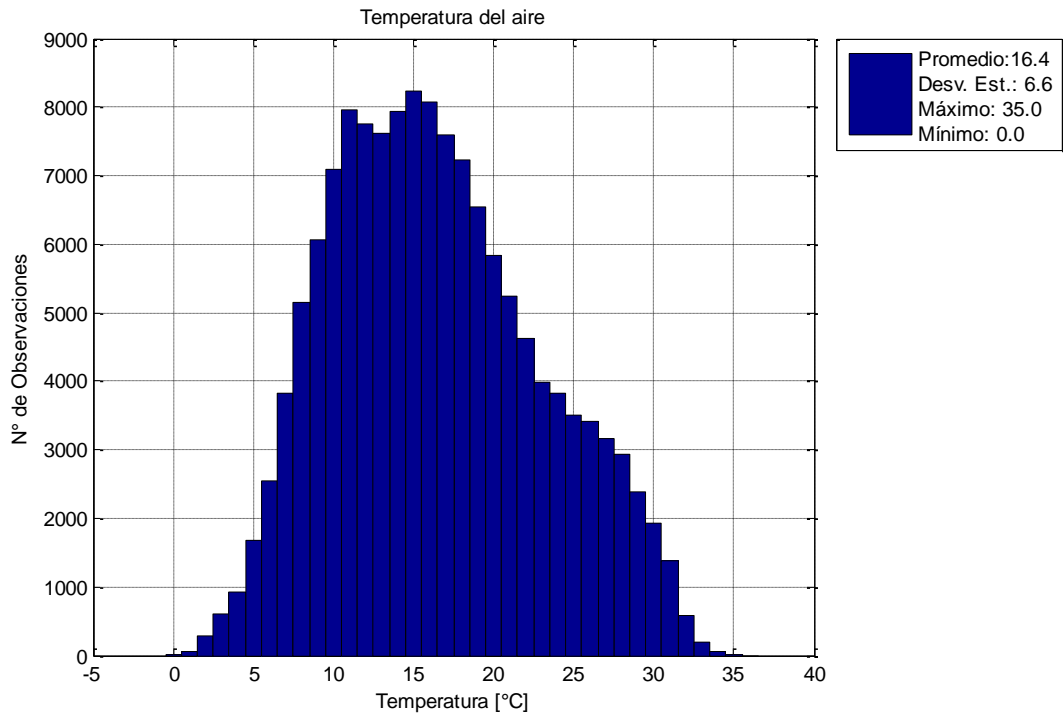


Figura 3-16: Histograma de temperatura del aire

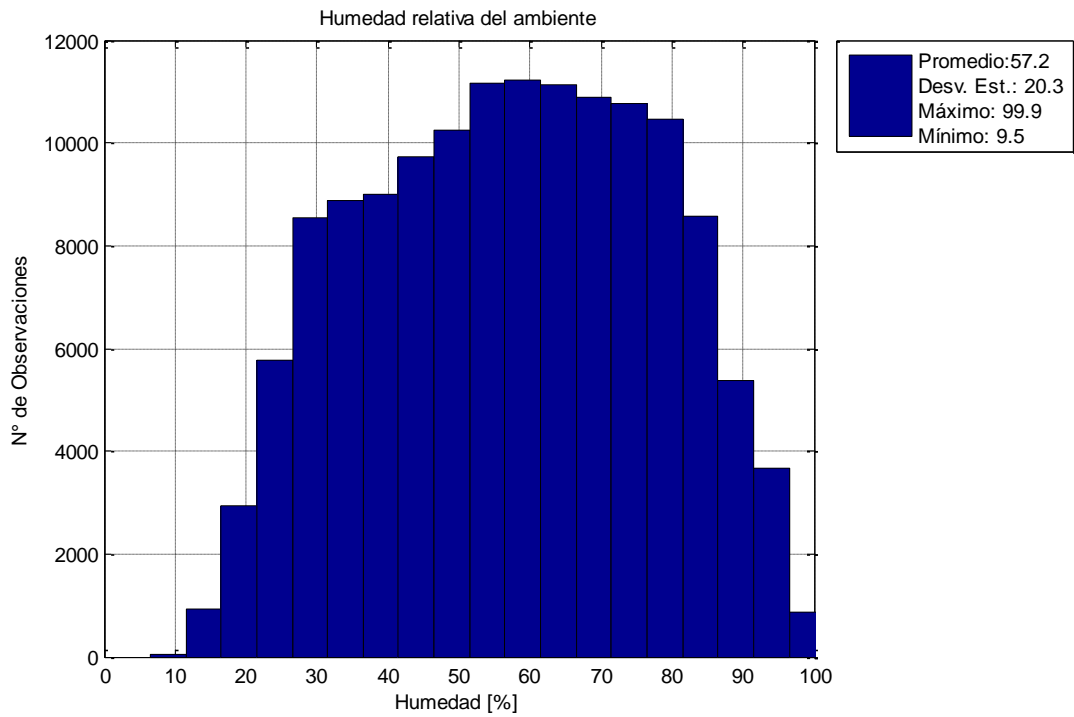


Figura 3-17: Histograma de humedad relativa del ambiente

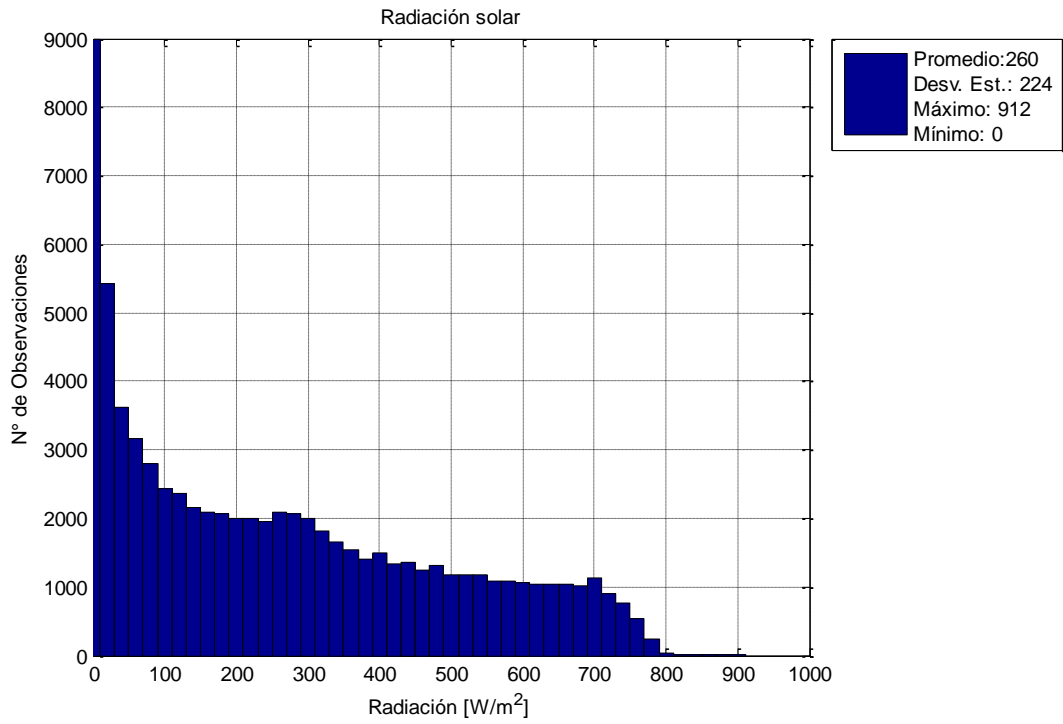


Figura 3-18: Histograma de radiación solar

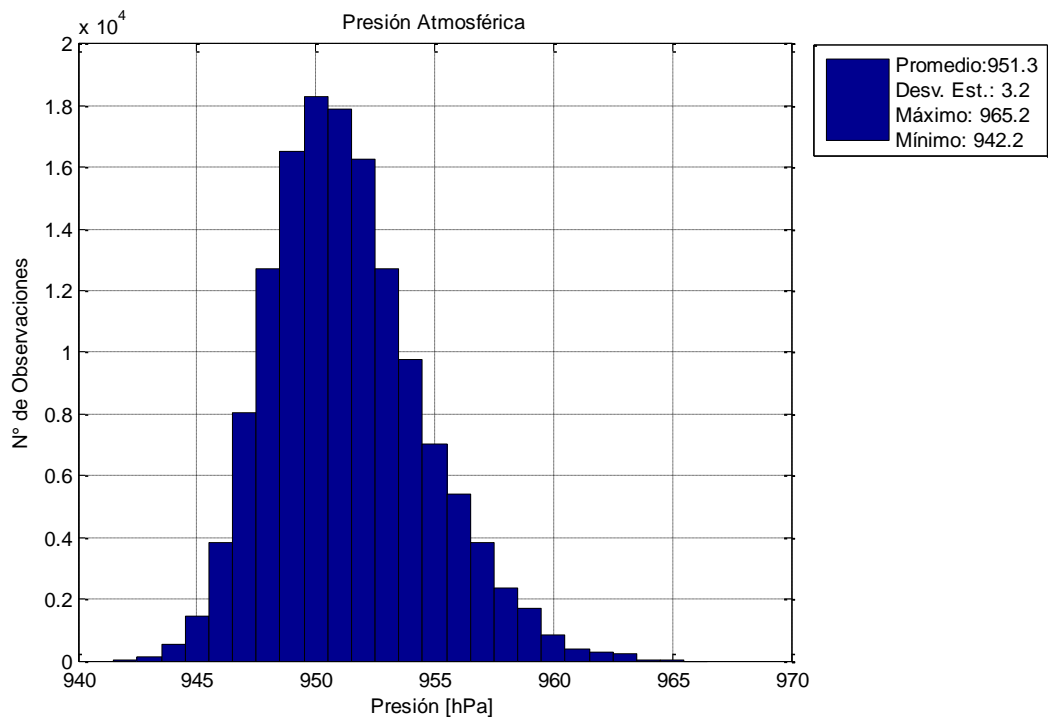


Figura 3-19: Histograma de presión barométrica

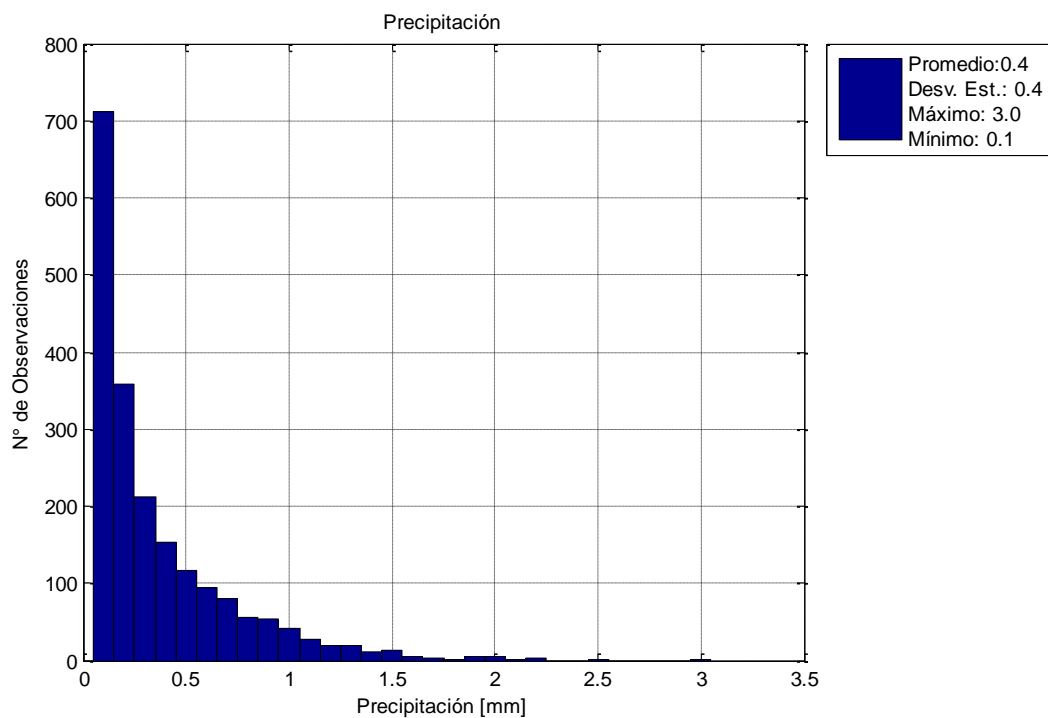


Figura 3-20: Histograma de precipitación I. Eventos de lluvia cada 15 minutos.

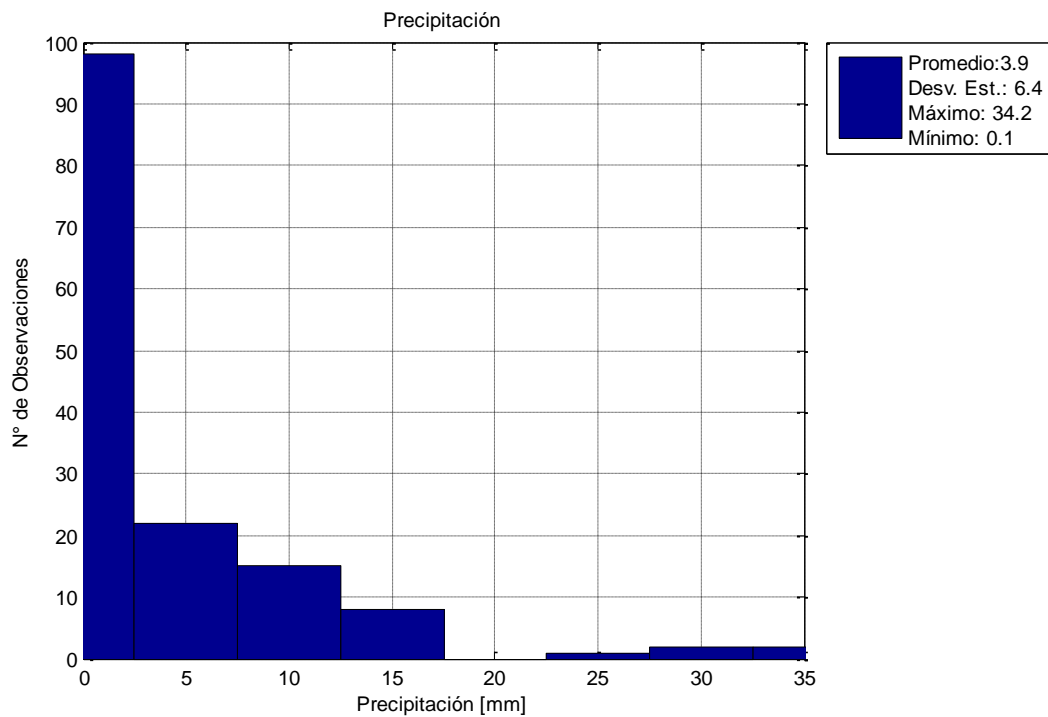


Figura 3-21: Histograma de precipitación II. Eventos de lluvia acumulada.

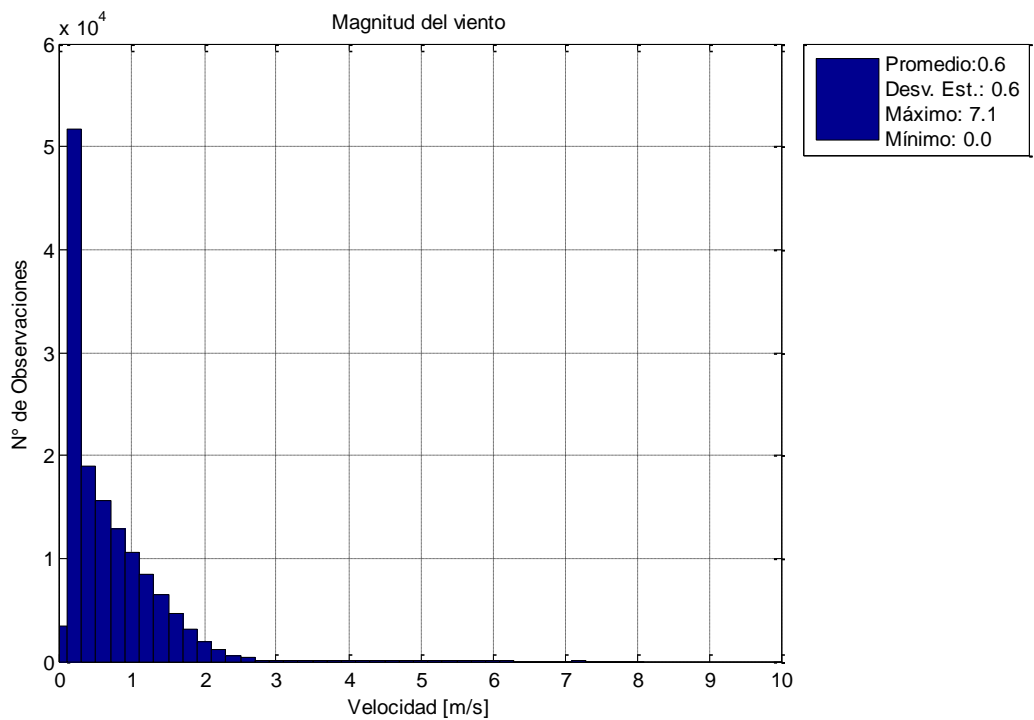


Figura 3-22: Histograma de magnitud del viento

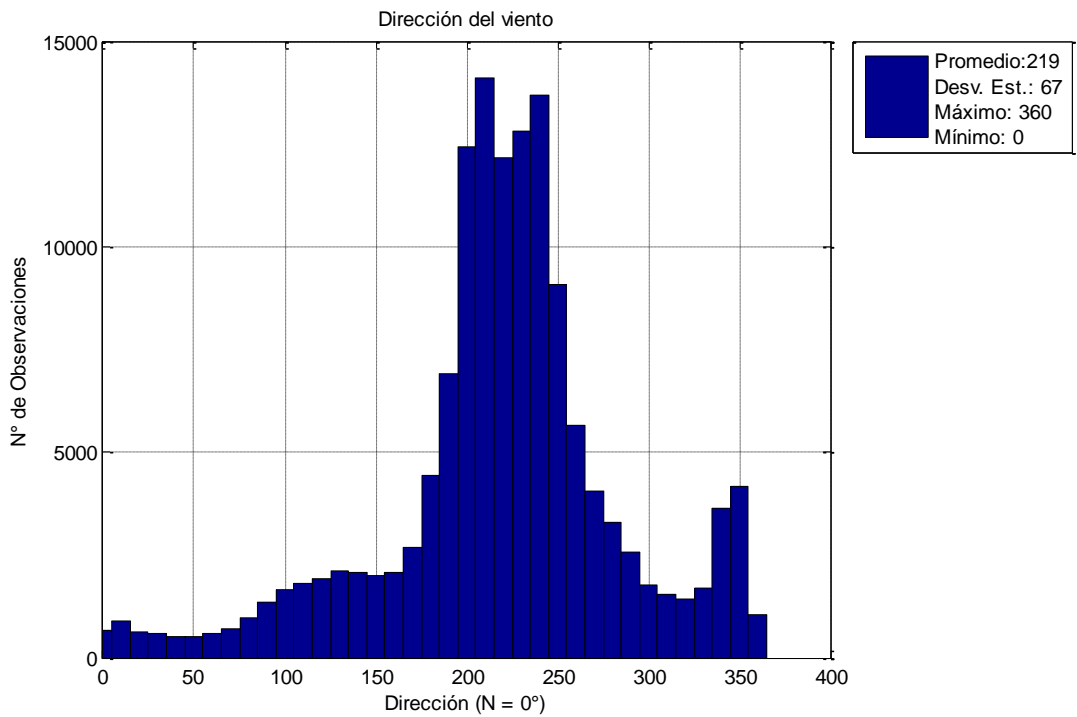


Figura 3-23: Histograma de dirección del viento

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE EFECTO TÉRMICO

En el contexto del estudio del efecto que tienen las condiciones ambientales sobre las propiedades dinámicas de las estructuras, se realiza una evaluación experimental de la influencia que tiene la temperatura sobre las frecuencias características de vibrar de una viga de hormigón armado, considerando que se ha reportado que la temperatura es el factor que más incide en la variación de las propiedades dinámicas de las estructuras [Ni, 2009].

La manera en que la temperatura incide en las estructuras es a través de la modificación del módulo de elasticidad de los materiales que las componen. Por lo tanto, es necesaria la caracterización de la ley constitutiva térmica (E vs T°) de éstos para modelar computacionalmente los efectos que tiene la temperatura en las estructuras. Hay investigaciones que presentan leyes constitutivas térmicas tanto para el hormigón como para el acero en el rango de temperatura ambiente [Yan, 2005; Deraemaeker, 2008] las cuales son utilizadas en modelos computacionales, sin embargo, la obtención de dichas curvas no está documentada y presentan incongruencias entre sí, por lo que se hace necesario determinarlas experimentalmente. Por estas razones, el objetivo de este estudio es evaluar los efectos de la temperatura en un espécimen de hormigón armado en un rango de temperatura ambiente. Para esto se realizan ensayos de impacto en una viga de hormigón armado, a la cual se le modifica su temperatura para determinar las frecuencias características de vibrar en un rango variado de temperatura.

4.1. Configuración experimental

Se instrumenta una viga de hormigón armado con 17 termoresistores en su interior dispuestos antes del hormigonado, con el objetivo de conocer la temperatura al interior de la viga en diversos puntos mientras se le modifica su temperatura. La viga se sitúa en un marco de reacción ubicado en el Laboratorio de Sólidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, y se le instala un acelerómetro para medir las vibraciones producto de ensayos de impacto.

4.1.1. Termoresistores

Los sensores que se utilizan para medir la temperatura de la viga son termoresistores LM-35, los cuales funcionan en el rango -55°C a 150°C con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Éstos se ensamblan de la forma en que se muestra en la Figura 4-1.

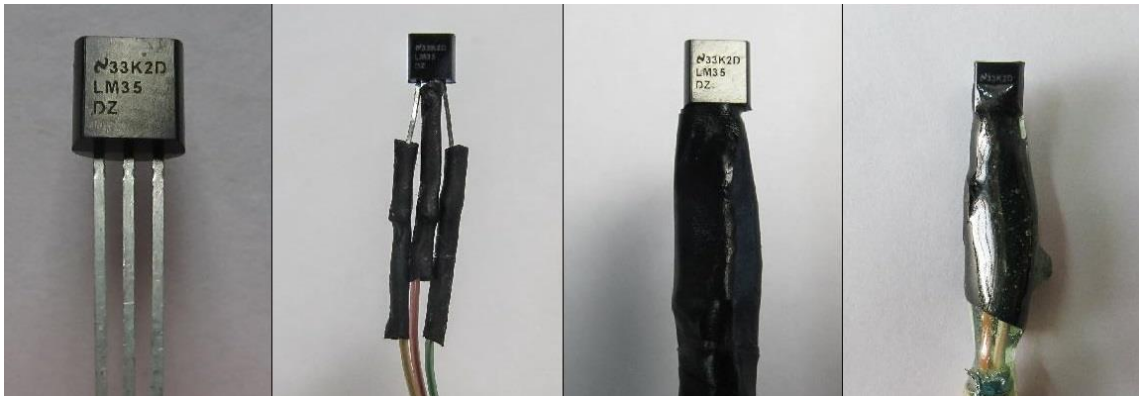


Figura 4-1: Ensamble termoresistores

En una primera instancia, se sueldan los termoresistores a los cables recubiertos, incluyendo en la unión un material termo retráctil para prevenir el contacto entre las conexiones. Posteriormente, el resistor se aísla con huincha aislante, para finalmente embeberlo en una matriz de Araldite®, un adhesivo epóxico utilizado para proteger la conexión en el momento del hormigonado.

Los termoresistores se calibran con respecto a un termómetro digital con termocupla tipo K, registrando la temperatura ambiente con ambos instrumentos y determinando el error de cada termoresistor, con lo cual se obtienen los factores de calibración indicados en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Calibración sensores

N° Sensor	Factor de Calibración
1	98.3
2	97.0
3	97.4
4	93.4
5	96.2
6	93.8
7	98.7
8	96.6

9	93.4
10	98.3
11	97.0
12	95.4
13	95.4
14	97.9
15	99.1
16	96.6
17	97.9

4.1.2. Viga

La viga a ensayar tiene una sección de $20 \times 14 \text{ cm}^2$ y un largo total de 190 cm. La enfierradura se compone de 2 barras longitudinales $\phi 12$ para la armadura positiva, 2 barras longitudinales $\phi 8$ para la armadura negativa y estribos $\phi 8 @ 15 \text{ cm}$. El acero a utilizar corresponde a un A440. El hormigón a utilizar corresponde a un H20, con resistencia a la compresión $f'_c = 25 \text{ MPa}$ y módulo de elasticidad $E = 23.500 \text{ MPa}$. Un esquema de la enfierradura y de las dimensiones de la viga se muestra en las Figuras 4-2 y 4-3.

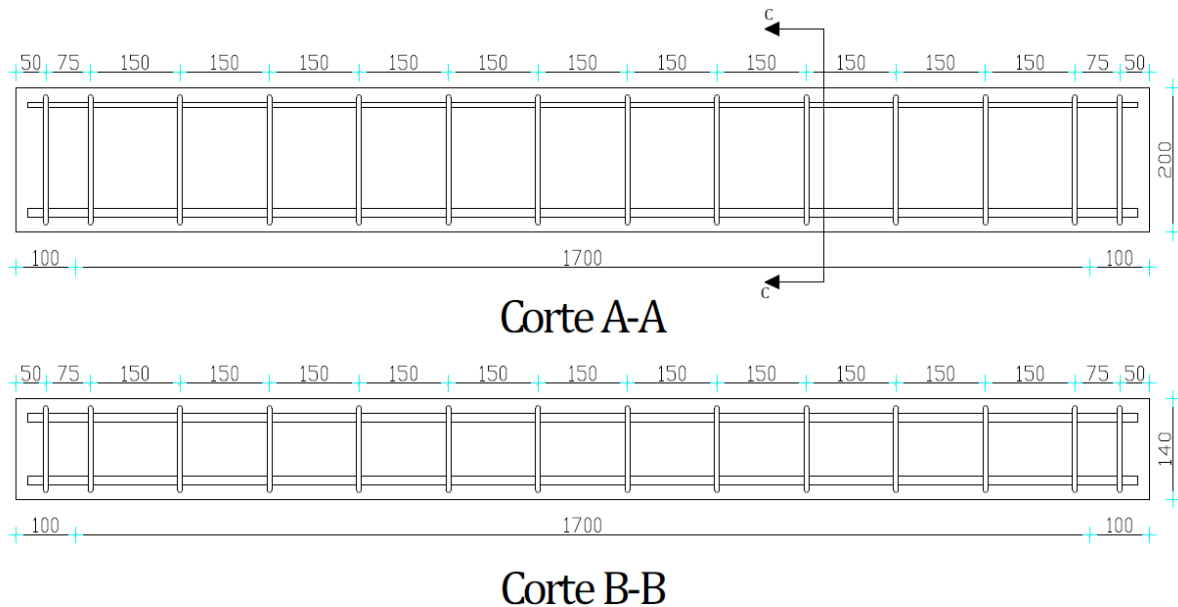
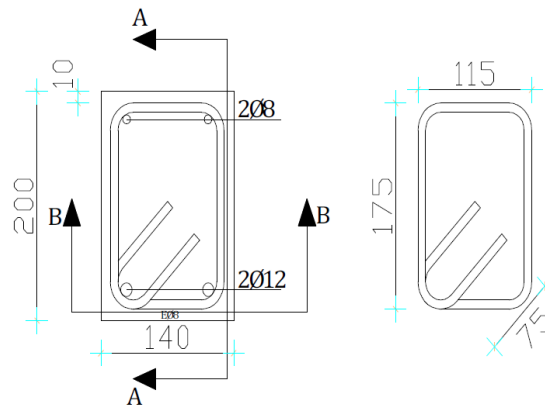


Figura 4-2: Cortes longitudinales viga HA



Corte C-C

Figura 4-3: Corte transversal viga HA

Los sensores se disponen como se muestra en la Figura 4-4 (vista lateral). En la Figura 4-5 se muestra la disposición final de los termoresistores adosados a la enfierradura.

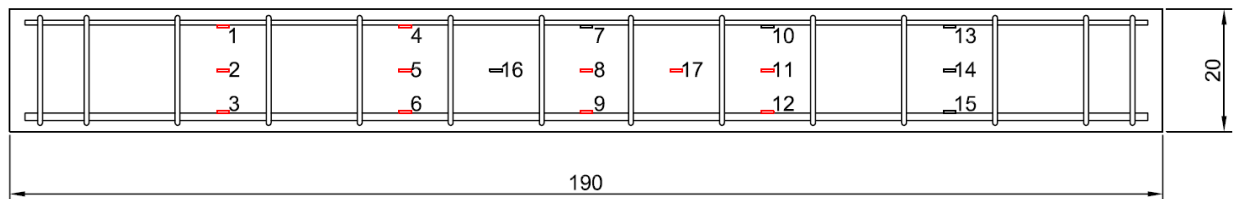


Figura 4-4: Disposición de sensores en la viga (vista lateral, dimensiones en cm)

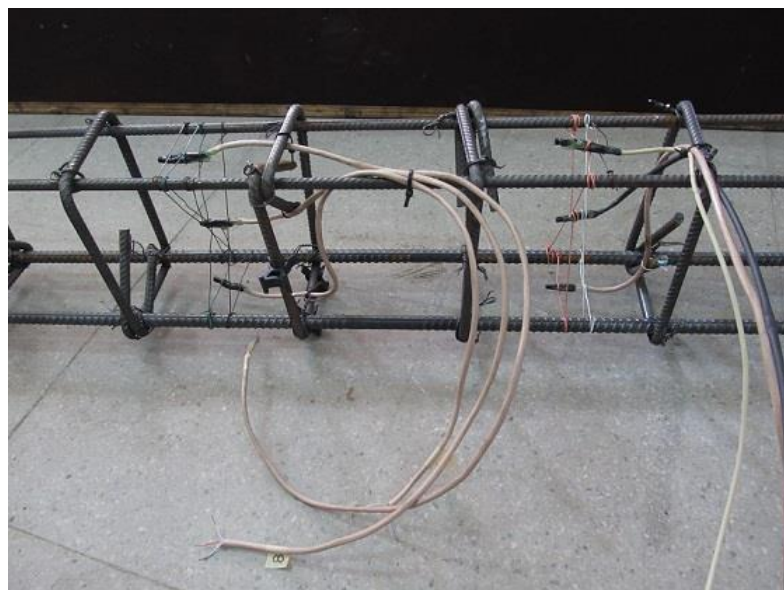


Figura 4-5: Vista de sensores 7, 8 y 9 a la izquierda y 10, 11 y 12 a la derecha.

Debido a la faena de hormigonado, dejaron de funcionar 6 termoresistores, posiblemente por un mal proceso de vibrado, o bien, por el uso de un cable de un recubrimiento de inferior calidad, dado que, como se observa en la Tabla 4-2, la mayoría de los termoresistores que dejaron de funcionar poseen un cable de menor diámetro, y aparentemente más delicado. En la Figura 4-4 se muestran en rojo los sensores funcionales después de la faena de hormigonado.

Tabla 4-2: Estado de los sensores y su recubrimiento

N° Sensor	Recubrimiento	Estado
1	C	✓
2	A	✓
3	A	✓
4	A	✓
5	A	✓
6	A	✓
7	A	X
8	A	✓
9	A	✓
10	A	✓
11	C	✓
12	B	X
13	B	X
14	B	X
15	B	X
16	B	X
17	B	✓

A:	Cable grueso
B:	Cable delgado
C:	Termo retráctil

La viga se instala en un marco de acero, con apoyos rotulados separados a 170 cm. La disposición de la viga se muestra en la Figura 4-6, en donde se indica la ubicación del acelerómetro anclado a ésta.



Figura 4-6: Viga montada en el marco de acero

4.1.3. Instrumentos ensayo de impacto y adquisición de datos

En los ensayos de impacto se utiliza un martillo con un sensor de fuerza en su cabeza (*Impact Hammer*), marca Sinocera, modelo LC-04A, el cual se muestra en la Figura 4-7 (izquierda). Para el ensayo de impacto se selecciona una punta de nylon (punta color blanco).

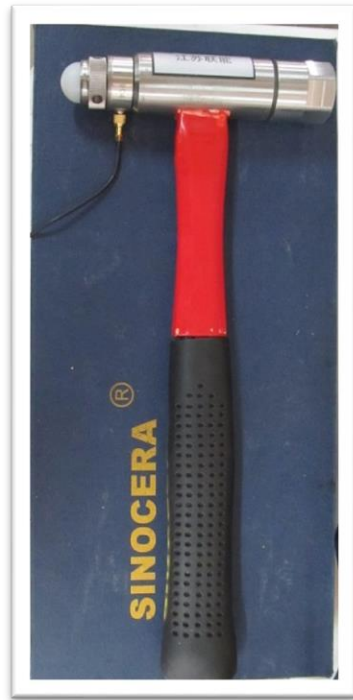


Figura 4-7: Impact Hammer (izquierda) y Acelerómetro PCB Piezotronics (derecha)

Por otro lado, se instala un acelerómetro uniaxial sobre la viga, marca *PCB Piezotronics*, modelo 601A01, el cual se muestra en la Figura 4-7 (derecha).

La ubicación del acelerómetro sobre la viga y los puntos de impacto del ensayo (enumerados del 1 al 11) se muestran en la Figura 4-8 (vista superior).

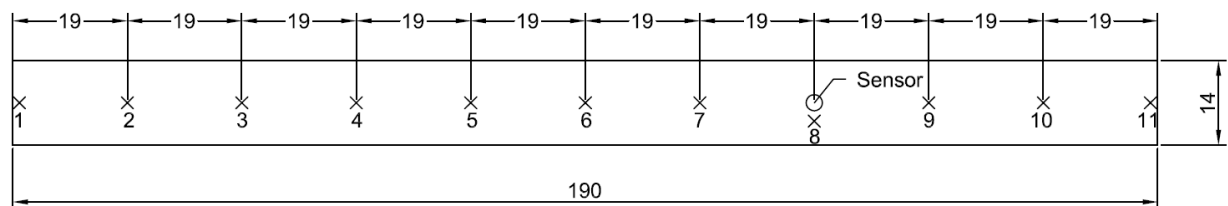


Figura 4-8: Ubicación puntos de impacto y acelerómetro (vista superior, dimensiones en cm)

El sistema de adquisición es de marca *ECON*, modelo *AVANT MI-7016*, con 16 canales de entrada y 2 canales de salida.

Finalmente, la identificación de las propiedades dinámicas de la viga se realiza con el software *FEMTools*, utilizando el método de identificación en el dominio de la frecuencia llamado *pLSCF* (poly-reference Least Square Complex Frequency) [FEMtools, 2013].

4.2. Descripción ensayos

Con el objetivo de obtener las propiedades dinámicas de la viga, se realizan diversos ensayos de impacto, los cuales consisten en golpear con un martillo en reiteradas oportunidades y en distintas ubicaciones sobre la viga, registrando la respuesta mediante un acelerómetro y registrando el impacto generado mediante un sensor de fuerzas ubicado en la cabeza del martillo. Además, para obtener las propiedades a distintas temperaturas, se realiza un proceso de calentamiento y de enfriamiento de la viga, procesos que se describen a continuación.

4.2.1. Ensayo de calentamiento

El ensayo de calentamiento consiste en elevar la temperatura de la viga y medir sus propiedades dinámicas a distintas temperaturas. Para ello, se utilizan 4 focos halógenos de 1500 W cada uno, los cuales se disponen alrededor de la viga, y se colocan en distintas posiciones para generar un aumento de temperatura homogéneo. Algunas de las disposiciones utilizadas se muestran en la Figura 4-9, las que se varían en función de la temperatura registrada en los termoresistores al interior de la viga.

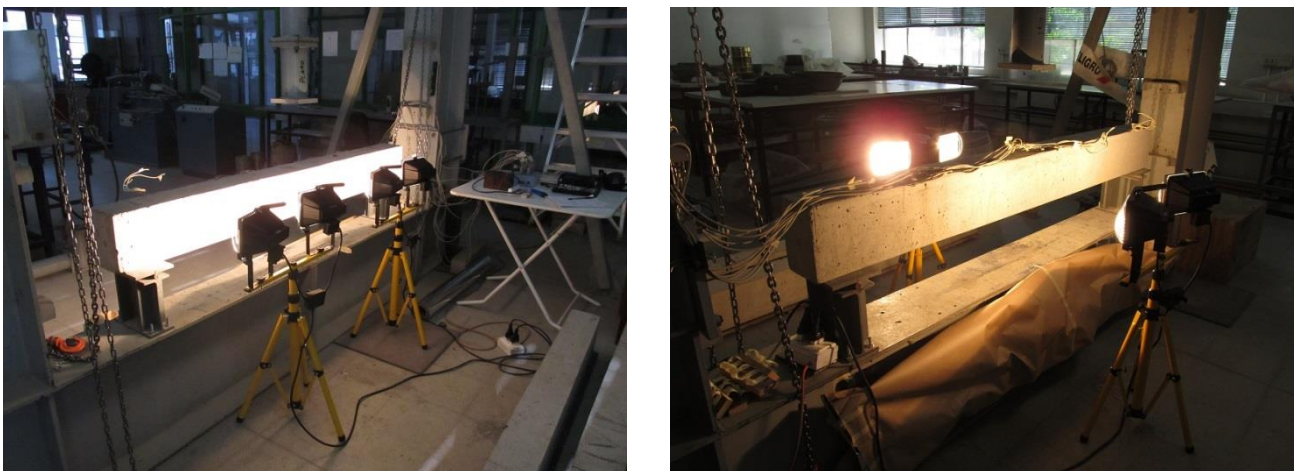


Figura 4-9: Disposición focos halógenos

El proceso de calentamiento se realiza en un tiempo aproximado de 3:15 horas, alcanzando una temperatura máxima promedio de 40.5°C. Al alcanzar esta temperatura, se retiran los focos, procediendo a realizar los ensayos de impacto e identificación de frecuencias características de vibrar. Durante un periodo de 5:20 horas, se realizan 7 ensayos equidistantes en el tiempo, hasta que la temperatura

promedio de la viga cae a 28.3°C. La temperatura registrada en el momento previo a cada uno de los ensayos se muestra en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: T° de termoresistores antes de cada ensayo (°C). Calentamiento.

		Ensayo						
Sensor	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	
T 11	45.8	43.2	40.1	38.1	34.7	30.7	29.1	
T 8	39.6	38.7	37.1	35.9	33.6	30.3	29.0	
T 5	41.4	39.7	37.4	35.8	33.1	29.6	28.4	
T 2	39.6	38.1	36.0	34.5	32.0	28.9	27.6	
T 6	39.9	38.1	35.9	34.5	32.1	29.1	28.1	
T 4	39.1	37.6	35.8	34.5	32.1	29.3	28.0	
T 3	39.1	37.4	35.4	34.0	31.8	28.9	27.9	
T 1	38.5	37.3	35.6	34.3	32.0	29.2	28.1	

El registro de las temperaturas de los termoresistores en el tiempo, desde el inicio del proceso de calentamiento hasta la realización del último ensayo de identificación, se muestra en la Figura 4-10.

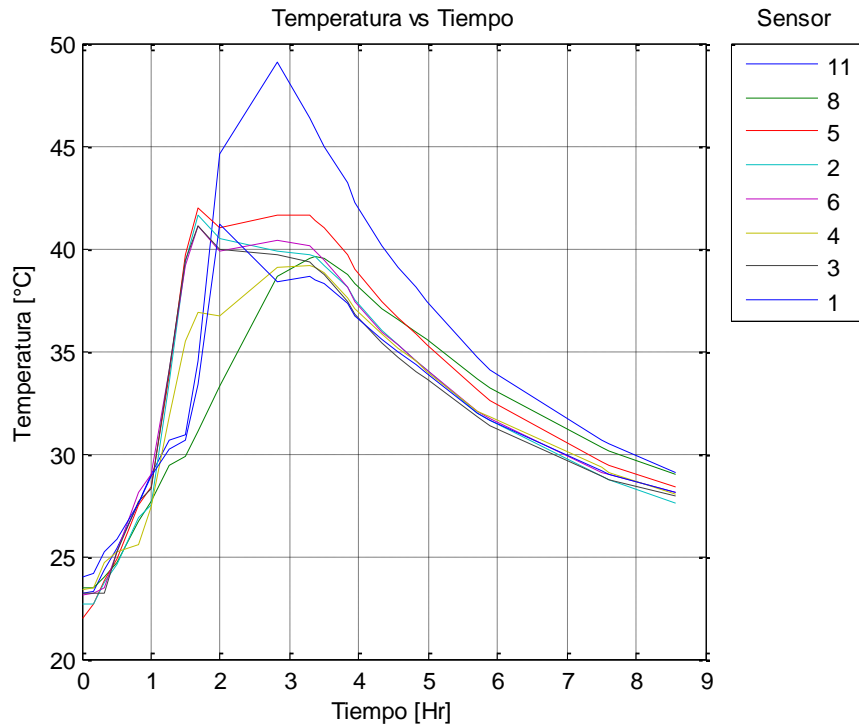


Figura 4-10: Temperatura vs tiempo, ensayo de calentamiento

De la figura anterior se observa que al momento de realizar los ensayos a partir de la hora 3 aproximadamente, todos los sensores registran una temperatura en un

rango no mayor a 3°C a excepción del sensor 11 cuyo registro de temperatura es superior.

4.2.2. Ensayo de enfriamiento

El ensayo de enfriamiento consiste en disminuir la temperatura de la viga y medir sus propiedades dinámicas a distintas temperaturas. Para ello, se disponen alrededor de la viga 46 kg de hielo en bolsas individuales de 2 kg, las cuales se amarran alrededor de ésta para que toda su superficie esté en contacto con el hielo. Posteriormente, se aísla la viga con un papel aluminizado (papel kraft adherido a una lámina de aluminio), el cual cumple la función de evitar que el hielo se derrita en un corto tiempo y crea un ambiente que mantiene una baja temperatura. La viga envuelta en bolsas de hielo y recubierta con el papel aluminizado se muestra en la Figura 4-11.



Figura 4-11: Ensayo enfriamiento

El proceso de enfriamiento se realiza en un tiempo aproximado de 2.30 horas, alcanzando una temperatura mínima promedio de 10.9°C. Al alcanzar esta temperatura se realizan los ensayos de impacto e identificación de frecuencias características de vibrar. Durante un periodo de 1:30 horas, se realizan 3 ensayos de impacto aproximadamente equidistantes en el tiempo, hasta que la temperatura promedio de la viga es 18.8°C. La temperatura registrada en el momento previo a cada ensayo se muestra en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: T° de termoresistores antes de cada ensayo (°C). Enfriamiento.

Sensor	Ensayo		
	E1	E2	E3
T 11	11.6	12.9	16.3
T 8	10.7	12.8	16.4
T 5	11.8	14.3	17.5
T 2	11.0	13.2	15.8
T 6	12.4	15.3	19.0
T 4	10.8	15.5	18.5
T 3	7.9	14.7	17.4
T 1	11.0	14.8	17.3
T 10	10.8	14.1	17.8
T 17	11.1	14.0	18.7

El registro de las temperaturas de los termoresistores en el tiempo, desde el inicio del proceso de enfriamiento hasta la realización del último ensayo de identificación, se muestra en la Figura 4-11.

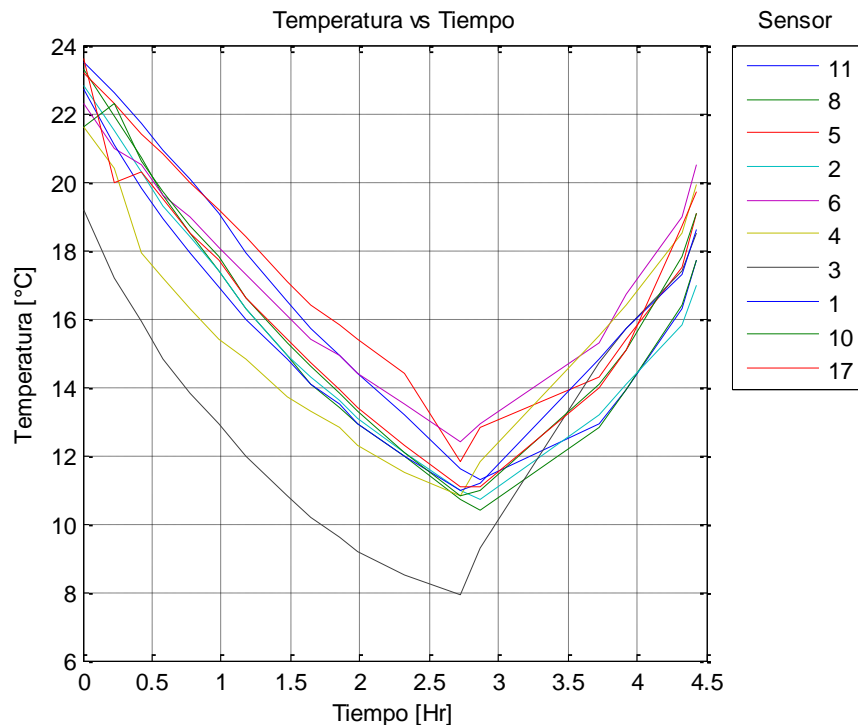


Figura 4-12: Temperatura vs Tiempo, ensayo de enfriamiento

De la figura anterior se observa que al momento de realizar los ensayos a partir de la hora 3 aproximadamente, todos los sensores registran una temperatura en un rango no mayor a 3°C a excepción del sensor 3 cuyo registro de temperatura es inferior.

4.3. Resultados

Los ensayos de impacto que se realizan a la viga permiten obtener sus frecuencias características a distintas temperaturas. Estos resultados se muestran en la Tabla 4-5 para las primeras 4 frecuencias características.

Tabla 4-5: Frecuencias viga a distintas temperaturas

Temperatura [°C]	Frecuencias [Hz]			
	1	2	3	4
11.1	65.0	415.2	752.6	1,122.4
14.7	64.8	413.7	743.3	1,117.9
18.1	65.0	412.5	739.1	1,111.5
28.5	65.2	412.2	747.8	1,113.7
29.7	65.2	410.6	746.7	1,111.4
32.9	65.5	411.2	746.0	1,110.7
35.5	65.9	412.1	746.2	1,111.8
36.5	66.0	411.7	745.3	1,110.7
38.5	66.1	411.1	744.6	1,109.6
40.2	66.0	409.3	742.8	1,107.5

Los gráficos de cada frecuencia en función de la temperatura se muestran en la Figura 4-13. Se observa que la frecuencia 1 aumenta a medida que aumenta la temperatura, mientras que las frecuencias 2, 3 y 4 disminuyen.

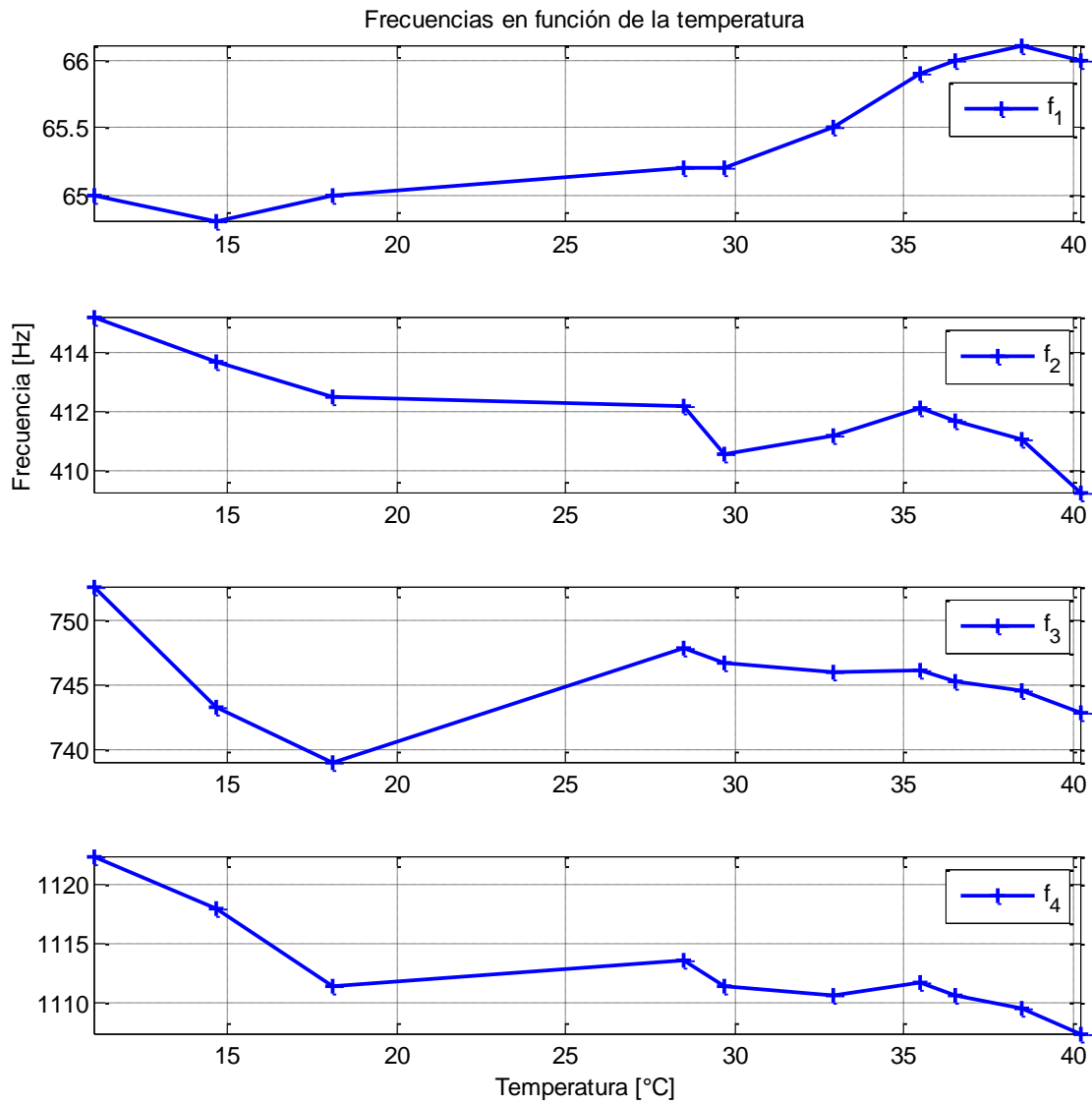


Figura 4-13: Frecuencias en función de la temperatura

En la Tabla 4-6 se muestra la variación porcentual de las frecuencias, obtenida considerando el mínimo y el máximo valor de cada frecuencia característica.

Tabla 4-6: Variación porcentual máxima de frecuencias

Frecuencia N°	Variación Porcentual [%]
1	1.99
2	1.43
3	1.81
4	1.34

Las formas modales de los primeros 4 modos de una viga simplemente apoyada son los que se muestran en la Figura 4-14. Estas formas modales son las que se determinan en la viga para cada una de las 4 frecuencias identificadas.

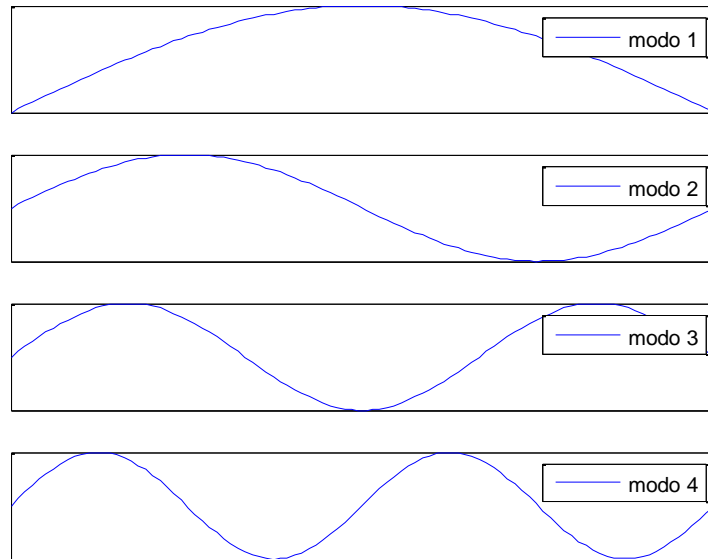


Figura 4-14: Modos viga simplemente apoyada

Una vez obtenidas las frecuencias en función de la temperatura, es posible relacionar dichas frecuencias con el módulo de elasticidad del material mediante la determinación de las frecuencias características de vibrar de una viga simplemente apoyada por medio de la teoría de medios continuos. Lo anterior permite determinar las frecuencias características de vibrar de manera analítica, mediante la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \quad (4.1)$$

En donde:

- n : Número de modo
- L : Largo de la viga
- E : Módulo de elasticidad

I : Momento de inercia

\bar{m} : Masa por unidad de largo

Con lo anterior, se obtienen las frecuencias teóricas que se muestran en la Tabla 4-7, comparándolas con las frecuencias obtenidas de manera experimental (el promedio entre las frecuencias experimentales). Se observa que existe una concordancia en los órdenes de magnitud de las frecuencias, aunque para los dos primeros modos, las diferencia entre la frecuencias teórica y la real es considerable, llegando a un 26.5% de variación para el segundo modo. Los modos 3 y 4 presentan una diferencia porcentual menor entre los valores teóricos y los valores experimentales.

Tabla 4-7: Comparación frecuencias viga. Experimentales vs teóricas

Modo	Frecuencia Teórica [Hz]	Frecuencia Real (\bar{x}) [Hz]	$\Delta\%$
1	75.7	65.5	-15.6
2	302.7	411.9	26.5
3	681.2	745.4	8.6
4	1210.9	1112.7	-8.8

4.4. Relación entre el módulo de elasticidad y la temperatura

En la Figura 4-15 se observa la ley constitutiva térmica para el hormigón que se encuentra en [Yan, 2005], sin embargo no se indica cómo se obtuvo dicha curva ni se muestran referencias relacionadas. Se observa que sobre los 30°C existe un aumento del módulo de elasticidad lo cual no tiene fundamento físico, debido a que al aumentar la temperatura en un material éste no se rigidiza. Además, lo anterior se fundamenta experimentalmente en los registros de frecuencia en estructuras de hormigón armado en donde la frecuencia siempre disminuye a medida que la temperatura aumenta.

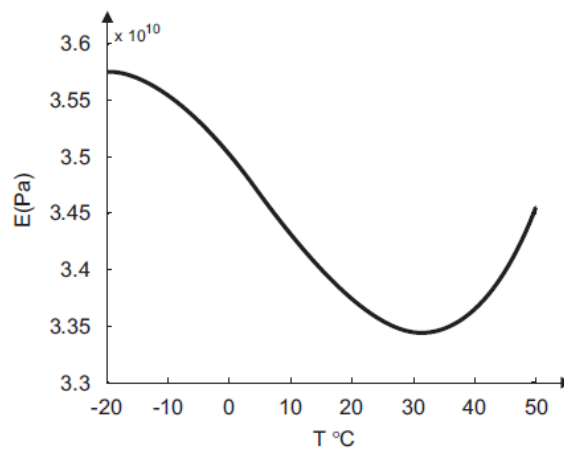


Figura 4-15: Ley constitutiva térmica hormigón [Yan, 2005]

Por otra parte, en la Figura 4-16 se muestran los resultados obtenidos por [Kodan y Harmathy, 2002], en donde se observa que para cualquier rango de temperatura, el módulo de elasticidad disminuye a medida que aumenta la temperatura.

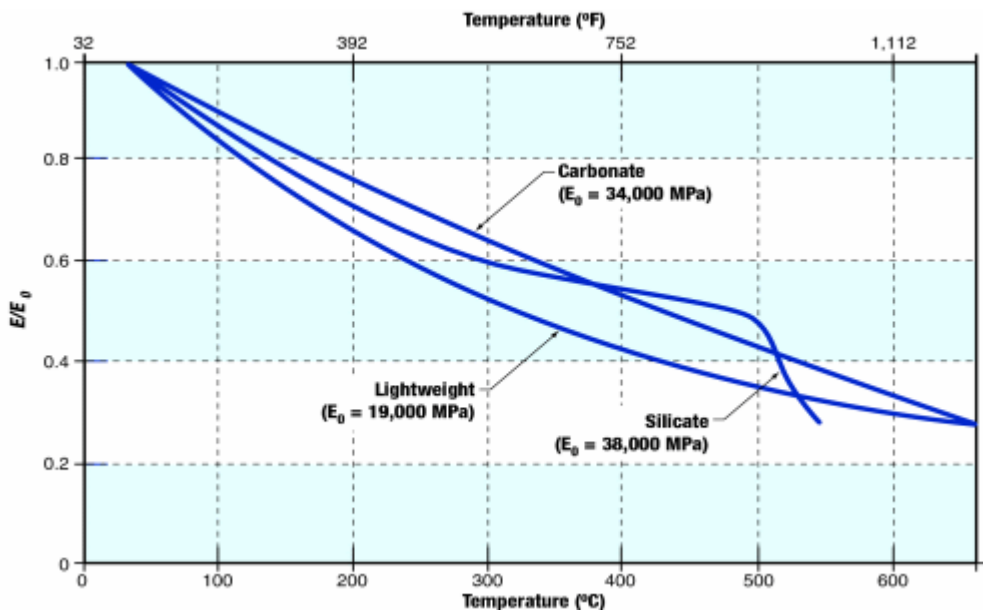


Figura 4-16: Efecto de la temperatura en el módulo de elasticidad de distintos tipos de hormigón [Kodur y Harmathy, 2002]

Si se considera que el módulo de elasticidad disminuye al aumentar temperatura, se puede extrapolar la curva de la Figura 4-15 hasta los 40°C teniendo un valor del módulo de elasticidad de aproximadamente 33.300 [MPa], y evaluando la diferencia entre el módulo de elasticidad a 10°C ($E = 34.300$ [MPa]) y a 40°C, se obtiene que entre estas temperaturas el módulo de elasticidad sufre una disminución porcentual de 3.0%. Este valor se calcula para tener una referencia de la variación del módulo de elasticidad.

En la Figura 4-17 a la Figura 4-20 se muestran los resultados experimentales de la relación entre el módulo de elasticidad y temperatura para los modos 1 al 4.

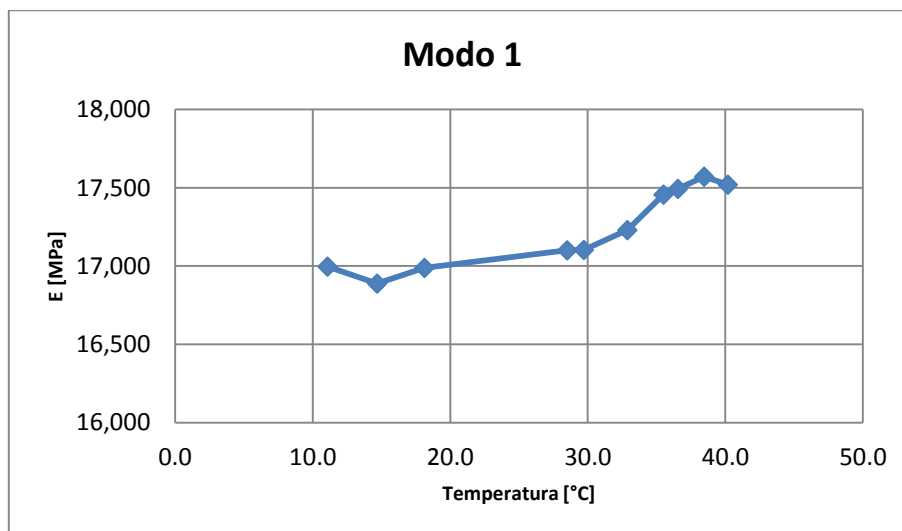


Figura 4-17: E vs T° - Modo 1

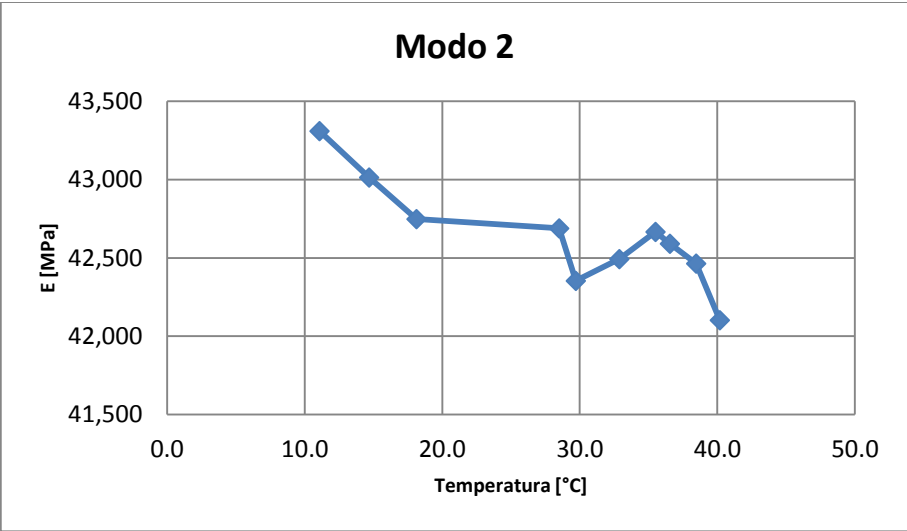


Figura 4-18: E vs T° - Modo 2

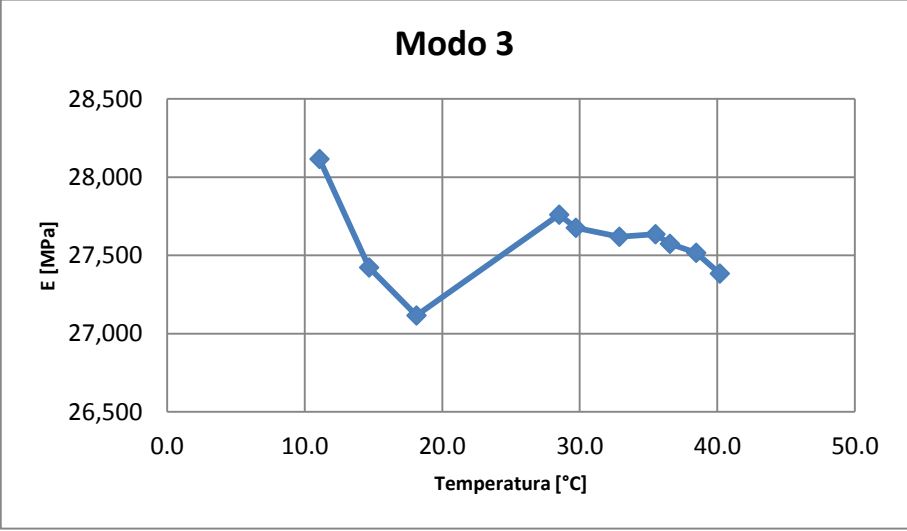


Figura 4-19: E vs T° - Modo 3

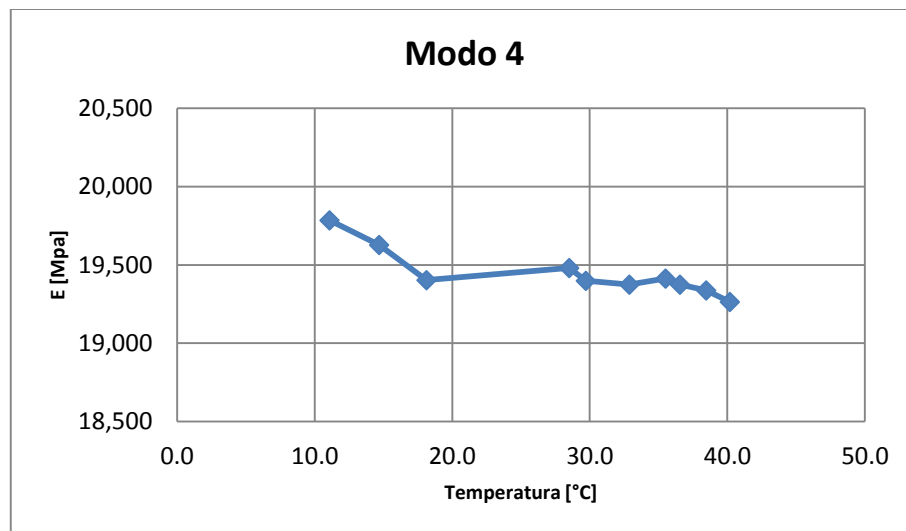


Figura 4-20: E vs T° - Modo 4

Se observa que el módulo de elasticidad obtenido con los datos del modo 1 aumenta a medida que aumenta la temperatura, lo cual no era esperable en un primer momento. Sin embargo, lo anterior se pudo haber debido a la influencia del acero en la viga y al hecho de que debido a la manera de oscilación del modo 1, la influencia de la enfierradura es mayor, alterando el comportamiento esperable de una viga solo de hormigón. Otra posible razón responde a la desestabilización de los apoyos de la viga producto de su deformación, lo que pudo haber producido un error al momento de ensayar.

Por otra parte, para los modos 2, 3 y 4 se obtuvo el comportamiento esperado, disminuyendo el módulo de elasticidad a medida que aumentaba la temperatura. Se observa que para los modos 2 y 3 existe una gran variabilidad en los valores del módulo de elasticidad, lo cual se puede explicar en el hecho de que debido a la manera de variar la temperatura de la viga, ésta no era totalmente homogénea durante todos los ensayos.

Debido a la variabilidad de los datos mencionada anteriormente no es posible determinar el comportamiento no lineal tal como se muestra en la literatura, lo cual requeriría una mayor cantidad de ensayos, por lo que se decide generar una ley constitutiva lineal en un rango acotado de temperaturas (0°C – 50°C).

Considerando un comportamiento lineal entre los valores mínimos y máximos del módulo de elasticidad, los resultados experimentales muestran que entre 10°C y 40°C las variaciones porcentuales del módulo de elasticidad son las que se muestran en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Variaciones porcentuales módulo de elasticidad

Modo	Variación porcentual [%]
1	3.0
2	-2.9
3	-2.7
4	-2.7

Con los datos experimentales se decidió finalmente establecer un módulo de elasticidad variable entre 0°C y 50°C, cuya variación porcentual entre 10°C y 40°C fuera de -3% tal como se obtuvo en los datos experimentales, y similar a lo que se encuentra en la literatura. Además, dado que el rango de temperaturas es pequeño se estableció una relación lineal, considerando además que no se puede establecer otro tipo de relación con los datos que se poseen. El módulo de elasticidad en función de la temperatura se muestra en la Figura 4-21, considerando un módulo de elasticidad a 20°C igual a 23.500 [MPa]. La ecuación que describe la relación anterior es $E = -23.5 \cdot T^\circ + 23.970$ [MPa].

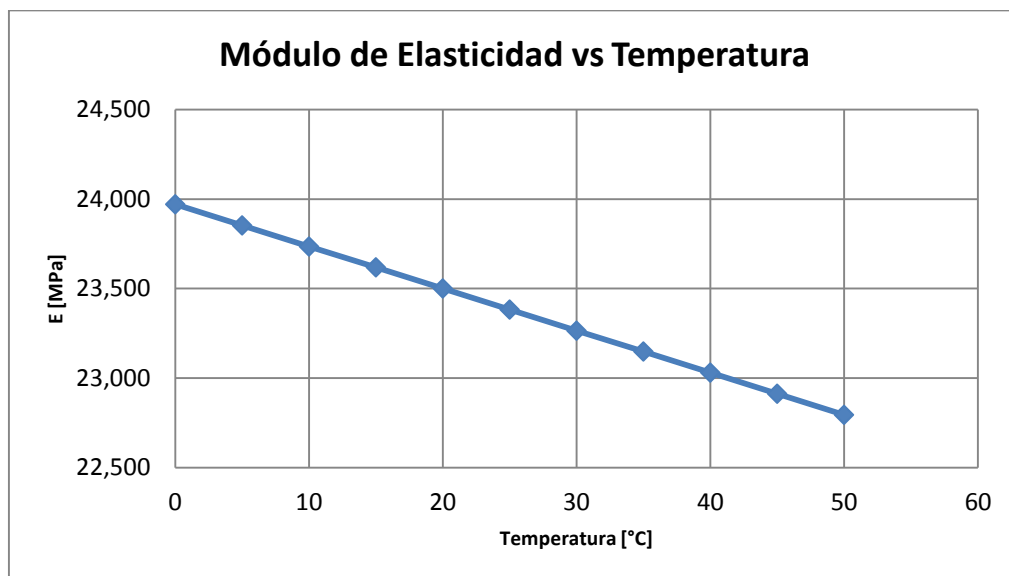


Figura 4-21: Módulo de elasticidad hormigón armado vs Temperatura

4.5. Recomendaciones

La evaluación experimental descrita en este capítulo es susceptible de diversas mejoras, dado el poco conocimiento anterior para un ensayo de este tipo. A continuación se listan algunas recomendaciones para futuras investigaciones:

- La explicación más factible en relación a la falla de los termoresistores es la utilización de un cable de menor calidad, por lo que se recomienda utilizar un cable con un recubrimiento resistente. Además, es importante tener extremo cuidado al momento del hormigonado y en el proceso de vibrado.
- Para obtener un mejor mapeo de la temperatura en la viga, se recomienda utilizar otras configuraciones de los termoresistores para conocer la temperatura fuera del plano central vertical de la viga. Por ejemplo, en vez de colocar 3 sensores en una línea vertical en una sección de la viga, se podrían colocar 4 sensores formando un diamante, de tal manera que quede un sensor cercano a cada una de las caras de la viga.
- Se recomienda visualizar la temperatura en tiempo real en un computador, para así tener un mejor control de ésta.
- Para calentar la viga, la utilización de focos halógenos es efectiva, pero se recomienda tener una mayor cantidad de focos, para que la viga se caliente de manera homogénea.
- Como se explicó anteriormente, tanto para el proceso de calentamiento como para el de enfriamiento de la viga, éste se realizó llegando a una cierta temperatura y luego dejando que la viga se enfriara (o calentara) de manera natural. Este procedimiento puede haber producido un gradiente de temperatura dentro de la viga, por el hecho de que en las zonas exteriores de la viga existe un cambio más rápido de temperatura. Para solucionar este inconveniente se recomienda que el proceso de calentamiento y los posteriores ensayos de impacto no se realicen de manera continua, es decir, para cada ensayo a cierta temperatura determinada se establezca dicha temperatura y luego se ensaye. Para el caso del ensayo de enfriamiento es más difícil estabilizar la temperatura y

ensayar, pues el tiempo de enfriamiento está limitado al tiempo en que el hielo se mantenga en estado sólido. Por esto se recomienda evaluar las frecuencias solo en dos temperaturas bajo la temperatura ambiente, por ejemplo a 5°C y a 15°C, de tal manera de que al llegar a 15°C se retiren los hielos y se haga el ensayo, para posteriormente volver a colocar los hielos hasta alcanzar los 5°C. Notar que en el ensayo realizado solamente se alcanzó una temperatura mínima aproximada de 10°C, pero esto fue por limitaciones de tiempo durante el ensayo, por lo que sería factible llegar a una temperatura menor.

- Para el manejo de las bolsas de hielo es recomendable tener preparadas con anterioridad bolsas de nylon para colocar el hielo adentro y amarrarlo a la viga. Además, es recomendable hacer el ensayo muy temprano para evitar el derretimiento anticipado del hielo.
- Un problema importante que se presentó durante los ensayos es que la viga presentó una deformación de manera permanente, atribuible a los cambios de temperatura, lo que produjo que los apoyos se desalinearan y la viga quedara tambaleante. Por esto se recomienda utilizar apoyos elastoméricos para evitar que se produzcan apoyos inestables por una posible deformación de la viga, ayudando además a aislar la viga del marco de reacción, para evitar que las frecuencias características del marco afecten el ensayo.
- Para estudiar los efectos de la temperatura sobre el hormigón, se recomienda estudiar probetas de hormigón sin refuerzo, para que el acero de refuerzo no afecte las propiedades mecánicas del hormigón.
- Finalmente, se recomienda realizar una mayor cantidad de ensayos para cada temperatura, para lograr obtener tendencias claras en relación a la variación del módulo de elasticidad.

CAPÍTULO 5: MODELO ANALÍTICO DE VARIACIÓN DE TEMPERATURA EN UN MARCO PLANO

Con el objetivo de determinar la manera en que varían las frecuencias características de una estructura frente a los efectos de la temperatura ambiente y la radiación solar, se realiza un modelo en el programa MATLAB de un edificio de corte plano, estructurado en base a vigas y columnas de hormigón. Además, se determinan diversos escenarios de daño sobre la estructura y se estudia el método PCA para la identificación de dicho daño.

5.1. Definición de la Estructura

El edificio consta de 8 niveles con una altura de 3.33 m cada uno. Cada nivel consta de 4 columnas y 3 vigas, las que tienen un largo de 10 m. Un esquema de la estructura con las dimensiones mencionadas se muestra en la Figura 5-1.

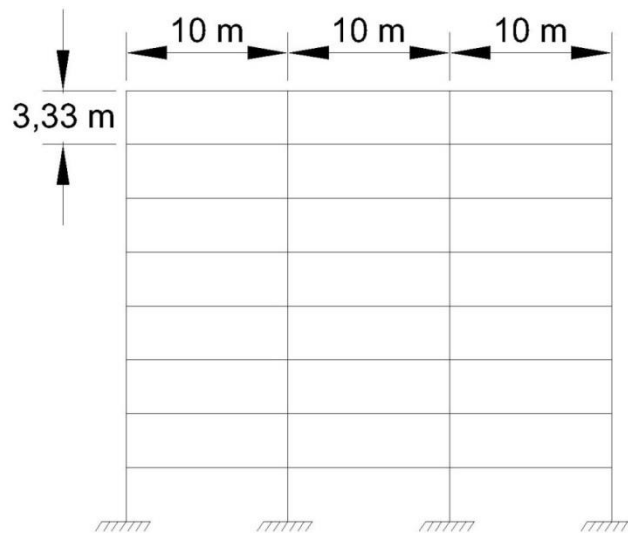


Figura 5-1: Edificio de corte plano

Las columnas tienen una sección de $24 \times 24 \text{ cm}^2$, mientras que las vigas tienen una sección de $48 \times 24 \text{ cm}^2$. El módulo de elasticidad de referencia $E = 23.500 \text{ tonf/cm}^2$ se define a una temperatura de 20°C y el peso específico del hormigón es $\gamma_h = 2.5 \text{ tonf/m}^3$. La frecuencia fundamental de la estructura es 0.68 Hz (periodo 1.47 s). El resto de las frecuencias (y periodos) se muestran en la Tabla 5-1 calculadas para el módulo de elasticidad de referencia a 20°C .

Tabla 5-1: Frecuencias modelo edificio a 20°C

Modo	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]
1	0.68	1.47
2	2.04	0.49
3	3.41	0.29
4	4.75	0.21
5	6.02	0.17
6	7.17	0.14
7	8.09	0.12
8	8.69	0.12

Los modelos se realizan utilizando el programa *rigidez2D* desarrollado en MATLAB por José Luis Caroca, el cual genera la matriz de rigidez elástica de una estructura de barras bidimensional, con la que se pueden obtener las propiedades dinámicas de la estructura en función del módulo de elasticidad, el cual se define en función de la temperatura. La frecuencia de muestreo se define igual a 1 hora.

5.2. Modelos de variación de temperatura en marco plano

A continuación se describen los distintos modelos generados para estudiar el efecto de la temperatura en una estructura de hormigón armado. La ley constitutiva térmica utilizada es la definida en la Figura 4-21 en la sección 4.4.

5.2.1. Modelo 1

En una primera instancia se desarrolla un modelo básico para tenerlo como referencia y a partir de él desarrollar otros modelos más complejos. Utilizando la estructura descrita anteriormente y la ley constitutiva térmica generada en el capítulo anterior, se utilizan los registros de temperatura ambiente obtenidos de la estación meteorológica del DGF para aplicar cambios de temperatura a todos los elementos por igual. Lo anterior genera registros de frecuencia que cambian cada hora y que siguen fielmente los cambios de la temperatura. La frecuencia fundamental se muestra en la Figura 5-2 en conjunto con la temperatura, mientras que las frecuencias 1 a la 8 se muestran en la Figura 5-3.

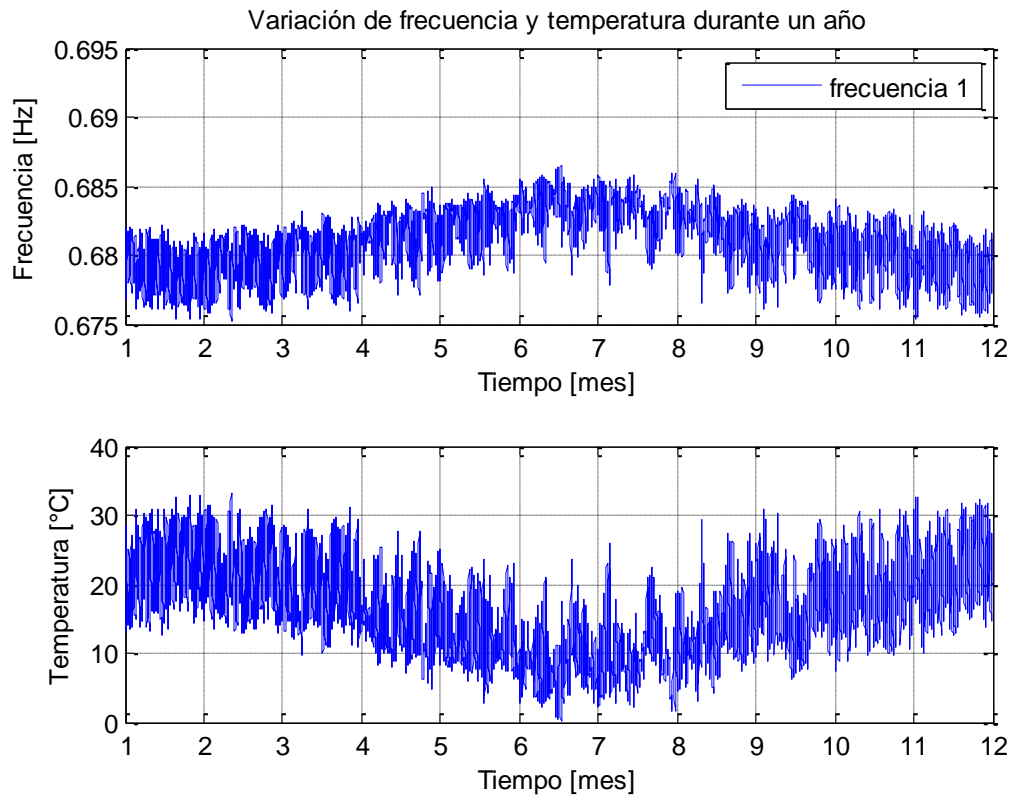


Figura 5-2: Frecuencia 1 y temperatura, modelo 1, año 2011

De la figura anterior se observa la dependencia de la variación de la frecuencia sobre la temperatura, siendo éstas variables inversamente proporcionales, con un factor de correlación $R = -1$, indicando una correlación inversa perfecta.

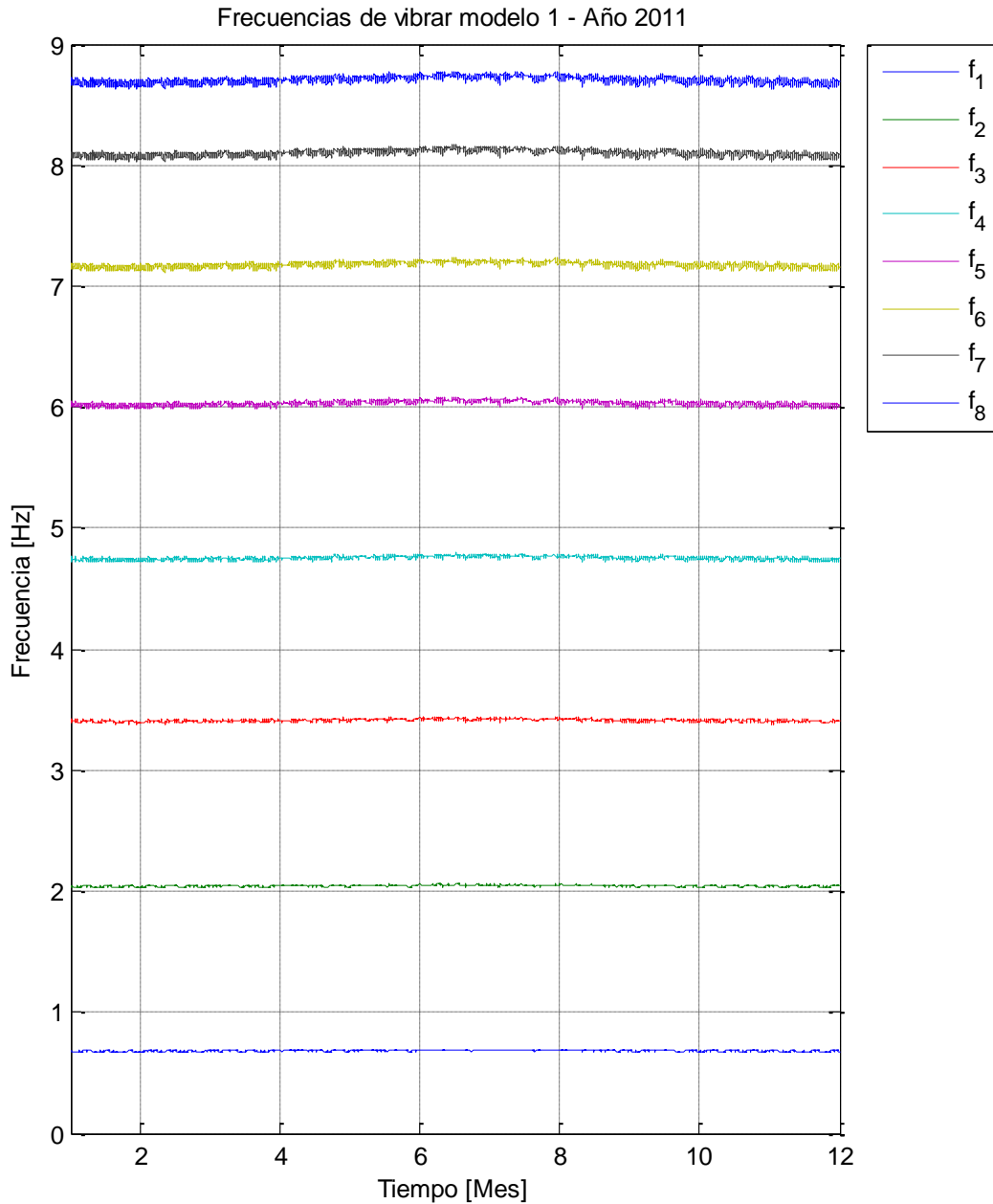


Figura 5-3: Frecuencias 1-8, modelo 1, año 2011

Se observa que a medida que aumenta el modo de vibrar, la amplitud de la variación de las frecuencias crece, siendo la variación porcentual de todas las frecuencias igual a 1.65%. La forma de la variación de todas las frecuencias es igual a la de la frecuencia 1, dado que todos los modos se ven afectados por igual ante el cambio de temperatura. Lo anterior no es del todo realista debido a que una estructura real se ve afectada por gradientes de temperatura producto de las diferencias de

temperatura en el interior y en el exterior, así como por la influencia de la radiación solar, la cual no es igual para toda la estructura en cada instante de tiempo. Sin embargo, este modelo es una primera aproximación que muestra consistencia en relación al orden de magnitud de las variaciones de las frecuencias en relación a una estructura real.

5.2.2. Modelo 2

El segundo modelo desarrollado toma en consideración dos efectos que están presentes en el proceso de variación de temperatura en un edificio: 1) el efecto de la radiación solar sobre la estructura, el cual produce un aumento de temperatura mayor a la temperatura ambiente en ciertos sectores de la estructura en diferentes momentos del día, y 2) el efecto de los gradientes de temperatura que se generan al interior de la estructura producto de las diferencias de temperatura entre los distintas caras de la estructura durante el día.

En primer lugar, en la Figura 5-4 se muestra la manera en que se idealiza la influencia de la radiación solar sobre la estructura a lo largo del día, en donde el semicírculo representa la trayectoria del sol desde la mañana (7 h) hasta la tarde (19 h). Las líneas de colores delimitan zonas de influencia del sol sobre la estructura (A, B, C, D y E). Es así como entre las 7 h y las 9 h, la zona A está delimitada por las líneas amarillas, lo cual indica que el sol tiene una influencia directa sobre el lado izquierdo de la estructura. Las otras zonas son las delimitadas por líneas rojas (B), líneas verdes (C), líneas azules (D) y líneas celestes (E).

Para simular el aumento de temperatura debido a la radiación solar de manera simplificada, se considera que cuando el sol afecta a cada uno de los tramos descritos, los elementos exteriores que se ven influenciados por el sol tienen un aumento de temperatura de 10°C en relación a la temperatura ambiente. Dicho aumento es arbitrario y solo sirve para observar el efecto que tiene la radiación solar. En modelos posteriores se mostrará un efecto más realista en relación a la radiación solar sobre la estructura, y se demostrará que el aumento arbitrario de 10°C no es tan lejano a la realidad.

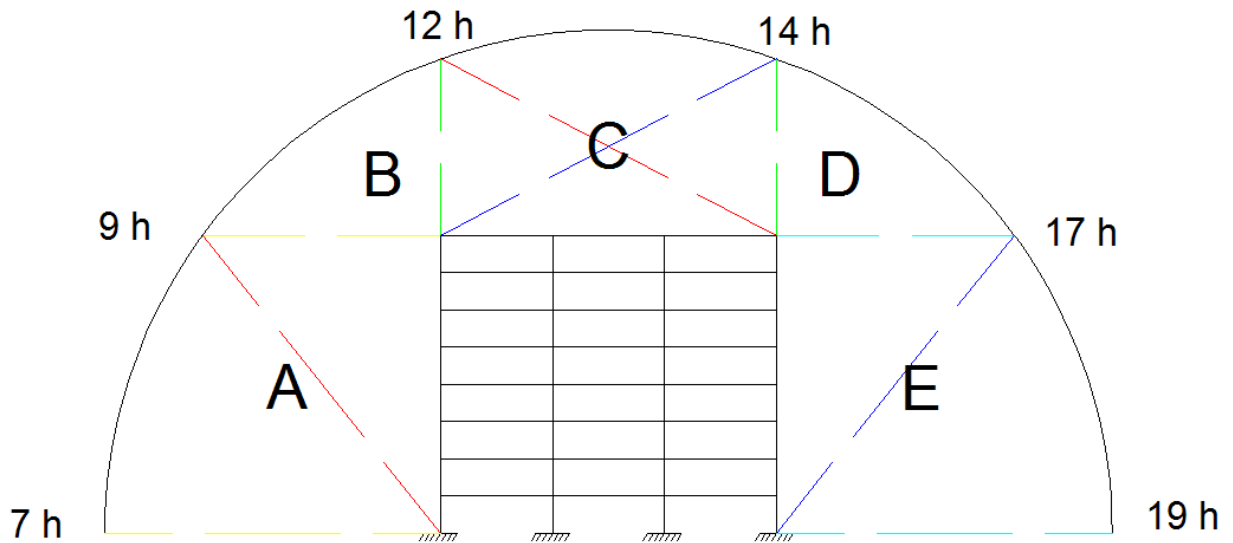


Figura 5-4: Efecto de la radiación solar a lo largo del día

Por otra parte, dado que este modelo considera gradientes de temperatura hacia el interior de la estructura producto de las diferencias de temperatura entre los distintos lados de ésta, se realizó un procedimiento que permite obtener la temperatura en los nodos de la estructura, tal como se muestra en la Figura 5-5, en donde al lado izquierdo y arriba hay una temperatura de 30°C producto del efecto del sol directo, mientras que al lado derecho de la estructura hay una temperatura ambiente de 20°C. Las temperaturas de los nodos internos se obtienen mediante una ponderación de la temperatura de los nodos vecinos, siendo los nodos más cercanos (arriba y abajo) aquellos que tienen más influencia. Por ejemplo, la temperatura de un nodo dentro de la estructura se calcula como $T_{nodo} = T_{nodo}^{sup} \cdot 3/8 + T_{nodo}^{inf} \cdot 3/8 + T_{nodo}^{izq} \cdot 1/8 + T_{nodo}^{der} \cdot 1/8$, realizando unas cuantas iteraciones para que la temperatura de cada uno de los nodos converja.

Temperaturas nodos marco 2D

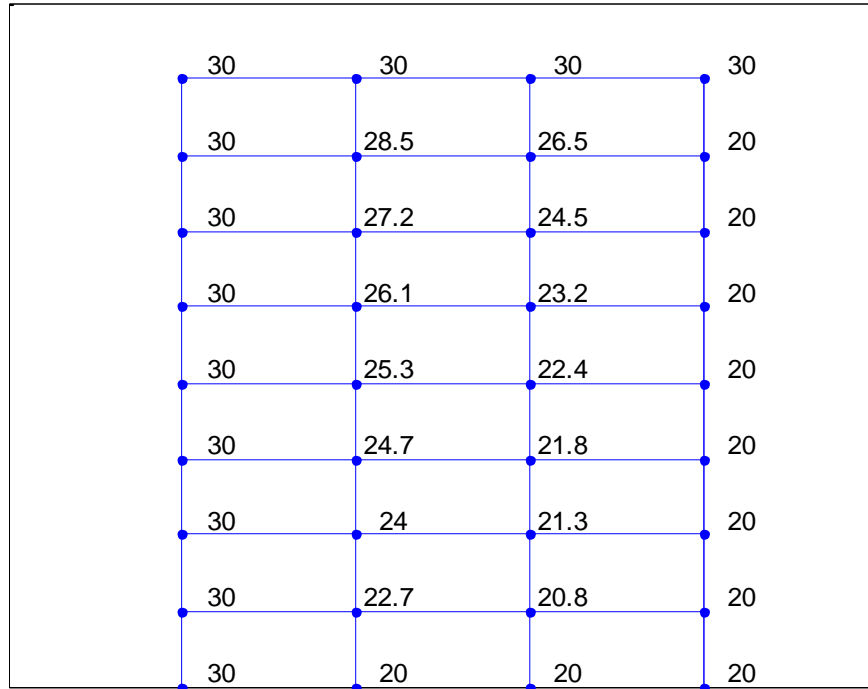


Figura 5-5: Temperaturas nodos en marco 2D con gradiente térmico

Las frecuencias obtenidas con este modelo tienen valores similares a los obtenidos con el modelo 1, pero difieren en las variaciones porcentuales de cada uno de los modos, siendo mayores para el modelo 2. Dichas variaciones se muestran en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Variaciones porcentuales frecuencias características Modelo 2

Modo	Variación Porcentual [%]
1	1.82
2	1.87
3	1.88
4	1.89
5	1.89
6	1.89
7	1.88
8	1.87

Una comparación entre las frecuencias 1 del modelo 1 y del modelo 2 se muestra en la Figura 5-6, en donde se observa el efecto que tiene la radiación solar, al disminuir considerablemente las frecuencias mínimas en comparación con el modelo 1, mientras

que las frecuencias máximas se mantienen iguales para ambos modelos, pues éstas se obtienen para las temperaturas mínimas, lo que ocurre cuando el sol no afecta a la estructura y el efecto de la radiación solar desaparece.

Por otra parte, no se observa un comportamiento anormal en las frecuencias que pueda ser atribuido al gradiente térmico generado al interior de la estructura, por lo que se asume que dicho efecto no afecta a las variaciones de frecuencia, sino que posiblemente afecte a las formas modales de la estructura, lo cual no ha sido estudiado en este modelo.

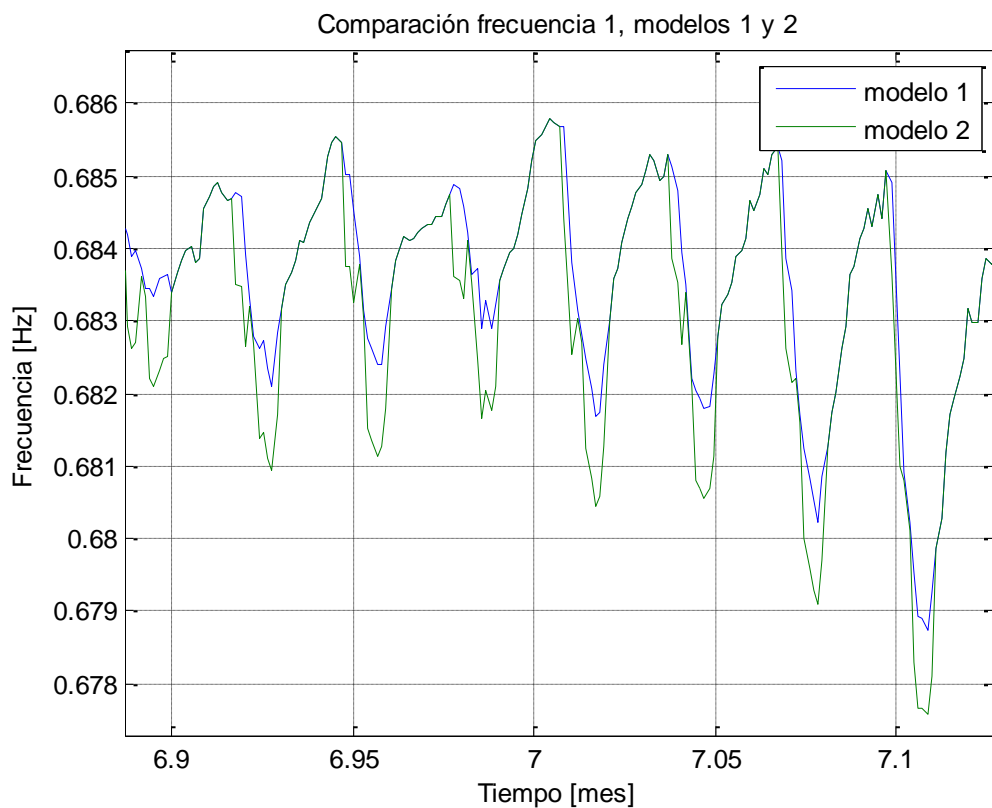


Figura 5-6: Comparación modelos 1 y 2

5.2.3. Modelo 3

El tercer modelo generado pretende ser más realista en cuanto modifica solamente la temperatura de los elementos exteriores, dejando la temperatura de los elementos interiores fija (temperatura ambiente de 20°C). La manera de modificar la temperatura de los elementos exteriores es la misma que para el modelo 2, es decir, considera los efectos de la radiación solar sobre la estructura. Una comparación entre las frecuencias 1 del modelo 1 y del modelo 3 se muestra en la Figura 5-7, en donde se observa que la variación de la frecuencia del modelo 3 es menor, lo cual es debido a que sólo los elementos exteriores de la estructura se ven afectados por la temperatura.

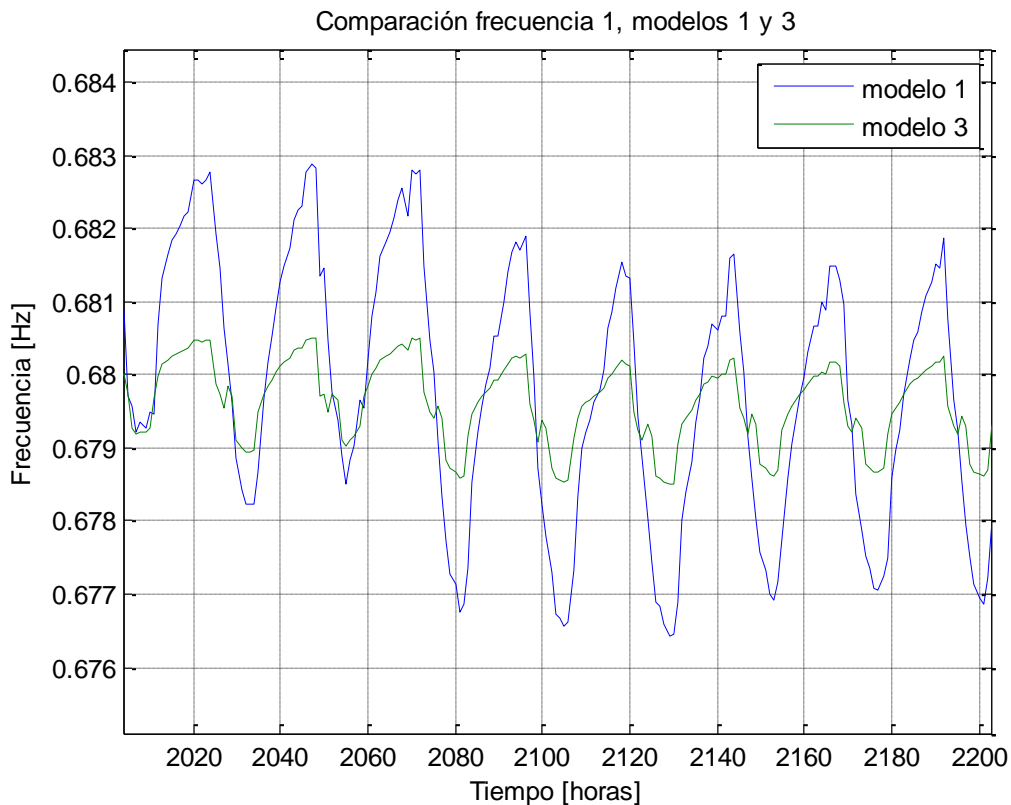


Figura 5-7: Comparación modelos 1 y 3

En la Tabla 5-3 se observa que las variaciones porcentuales de las frecuencias son muy pequeñas en relación a los modelos anteriores. La definición del modelo no permite generar grandes variaciones de frecuencia solo afectando los elementos externos de la estructura, a pesar de ser “el caso más realista”, en donde sólo los elementos exteriores de la estructura son afectados por los cambios de temperatura.

Tabla 5-3: Variaciones porcentuales frecuencias características. Modelo 3

Modo	Variación Porcentual [%]
1	0.46
2	0.50
3	0.57
4	0.66
5	0.75
6	0.83
7	0.89
8	0.92

A partir de los modelos anteriores surge una interrogante con respecto a cómo afecta la radiación solar a una estructura de hormigón armado, puesto que intuitivamente sabemos que un material expuesto al sol alcanza una temperatura mayor a la del ambiente. Por otra parte, puede ser relevante explicar el desfase que existe entre la variación de la temperatura en el ambiente y los cambios de frecuencia de una estructura, lo cual se observa de los registros de la torre central (Figura 5-8), en donde se aprecia que los máximos de temperatura están desfasados en relación a los mínimos de frecuencia. Estas interrogantes se intentan resolver en la sección siguiente, en donde se estudia un modelo de transferencia de calor para modelar los cambios de temperatura al interior del hormigón.

5.3. Modelo de Transferencia de Calor

A partir de las observaciones de las frecuencias características de la Torre Central obtenidas a partir del sistema de monitoreo de salud estructural, es posible determinar que existe un desfase entre la variación de las frecuencias y la temperatura, lo cual se refleja en que los máximos y mínimos valores de frecuencia difieren con los respectivos valores de temperatura. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 5-8, la cual muestra la primera frecuencia de vibrar de la Torre central en la parte superior y la temperatura en la parte inferior. Las líneas rojas están situadas en los valores máximos de temperatura, durante un lapso de 3 días. Se aprecia que los máximos de temperatura no coinciden con los mínimos valores de frecuencia, existiendo un desfase de aproximadamente 3 horas.

Frecuencias Modales

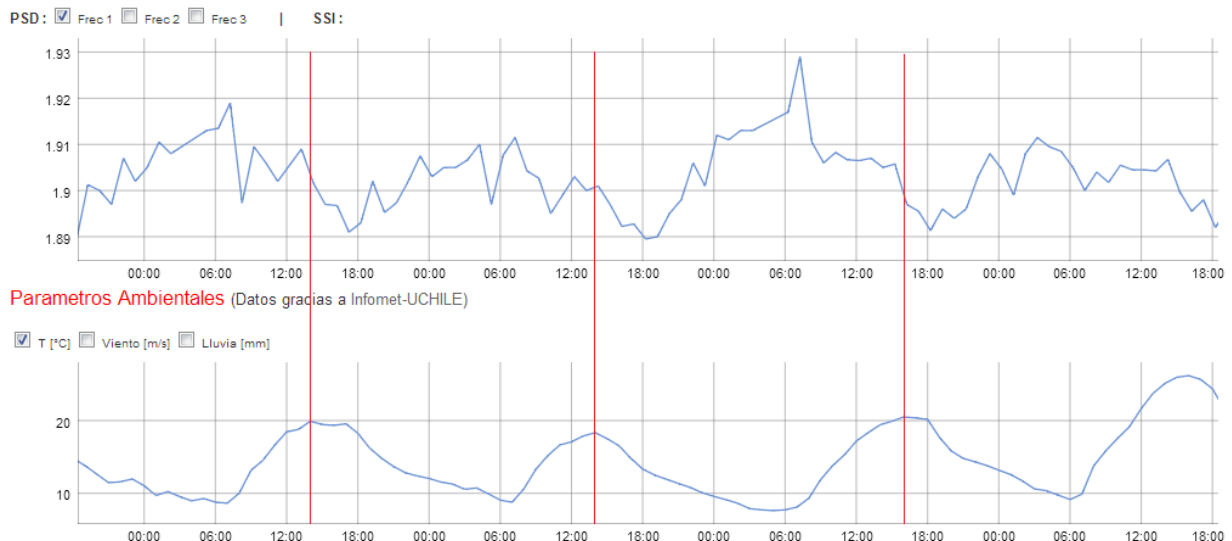


Figura 5-8: Retraso en valores peak de frecuencia con respecto a la temperatura

Lo descrito anteriormente se debe a que el cambio de la temperatura de un material que se encuentra influenciado por la temperatura del medio en que se encuentra no sucede de manera instantánea cuando el medio lo hace, sino que el cambio se produce en función del tiempo y de la profundidad del material. Por esta razón, se decidió realizar un modelo de variación de temperatura utilizando un modelo de conducción térmica determinado por la ley de Fourier.

5.3.1. Ley de Fourier

La conducción térmica está determinada por la Ley de Fourier. Esta ley establece que la tasa de transferencia de calor a través de un material es proporcional al gradiente negativo de la temperatura.

En una dimensión, el flujo de calor puede ser modelado por [Charpin et al, 2004]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5.1)$$

En donde:

κ : Conductividad

ρ : Densidad

c : Calor específico

Dicha ecuación es aplicable a un material que tiene dos dimensiones de longitud considerable, y una tercera dimensión más pequeña, como puede ser un muro de hormigón armado, el cual tiene una de sus caras expuesta al exterior, afectada por los distintos fenómenos de transferencia de calor, mientras que la otra de sus caras se encuentra en un ambiente a una temperatura ambiente constante (20°C).

Las condiciones de borde para resolver la ecuación diferencial anterior están dadas por:

$$\frac{\partial T}{\partial x}(x = 0, t) = \frac{Q}{\kappa} \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(x = \infty, t) = 0 \quad (5.3)$$

La primera condición indica que el cambio de temperatura en el extremo expuesto al ambiente es proporcional a la cantidad de calor que es transferida hacia el muro e inversamente proporcional a la conductividad térmica del muro, mientras que la

segunda establece que a cierta distancia de la cara externa del muro (hacia el interior) la temperatura es constante.

Por otra parte, se establece una condición inicial arbitraria en donde todo el muro tiene una temperatura inicial de 20°C:

$$T(x, t = 0) = 20 \quad (5.4)$$

Finalmente, se definen los efectos que influyen en el proceso de transferencia de calor:

- Radiación: Flujo de calor producto del efecto de la radiación solar sobre el material, el cual depende de un coeficiente de absorción característico del material.

$$Q_{sol} = \gamma_{abs} Q_{inc} \quad (5.5)$$

- Irradiación: Flujo de calor producto de la diferencia de temperaturas entre el material y el ambiente.

$$Q_r = \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \quad (5.6)$$

- Convección: Flujo de calor producido por medio del aire, producto de diferencias de temperatura entre la superficie del material y el ambiente.

$$Q_h = H(T - T_a) \quad (5.7)$$

En donde:

γ_{abs} : Coeficiente de absorción

Q_{inc} : Calor por radiación solar

ϵ : Coeficiente de emisión

σ : Constante de Stefan-Boltzmann

- H : Coeficiente de transferencia de calor por convección
- T : Temperatura material
- T_a : Temperatura ambiente

Con todo lo anterior, se tiene definido un modelo de transferencia de calor, en el cual se han descrito diversos coeficientes que caracterizan las propiedades térmicas del hormigón. Dichos coeficientes se muestran a continuación, los cuales han sido obtenidos de [Charpin et al, 2004] y de [Bentz, 2000]:

$$\gamma_{abs} = 0.65$$

$$\epsilon = 0.9$$

$$\sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C^4} \right]$$

$$H = 5.6 + 4.0 \cdot v_{viento}, v_{viento} \leq 5 \frac{m}{s}$$

$$H = 7.2 + v_{viento}^{0.78}, v_{viento} > 5 \frac{m}{s}$$

$$\rho = 2400 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$c = 980 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$$

$$k = 1.54 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c}$$

Para conocer la radiación en el tiempo, se han utilizado los registros de radiación de la estación meteorológica del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

5.3.2. Resultados modelo transferencia de calor

La ecuación diferencial planteada en la sección anterior se resuelve mediante el software MATLAB, para un muro de hormigón armado de 24 cm de espesor.

En una primera instancia, se resuelve el modelo para el caso sin considerar el efecto de la radiación solar, resultado que se muestra en la Figura 5-9 y Figura 5-10. En primer lugar, se observa que la temperatura del hormigón siempre se encuentra limitada por la temperatura ambiente, y además, existe un retraso en el cambio de la temperatura del hormigón, lo cual se acentúa en la cara interna del hormigón. Este efecto se observa con más claridad en la Figura 5-11, en donde se grafica el perfil completo de temperaturas del hormigón y se observa que hacia el interior del muro el efecto del cambio de temperatura ambiente se reproduce con un retraso. Por otra parte, también se observa que el cambio de temperatura hacia el interior del muro es de menor magnitud, siendo relativamente pequeño al interior del muro.

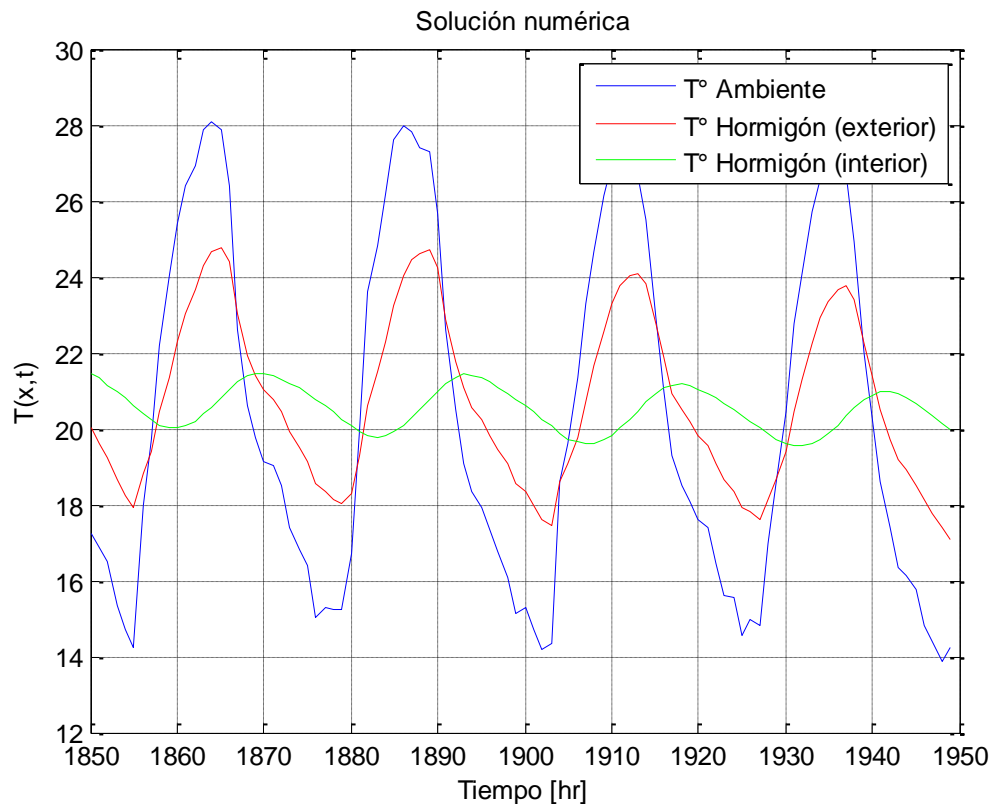


Figura 5-9: Temperatura interior y exterior de muro de hormigón, sin radiación solar.

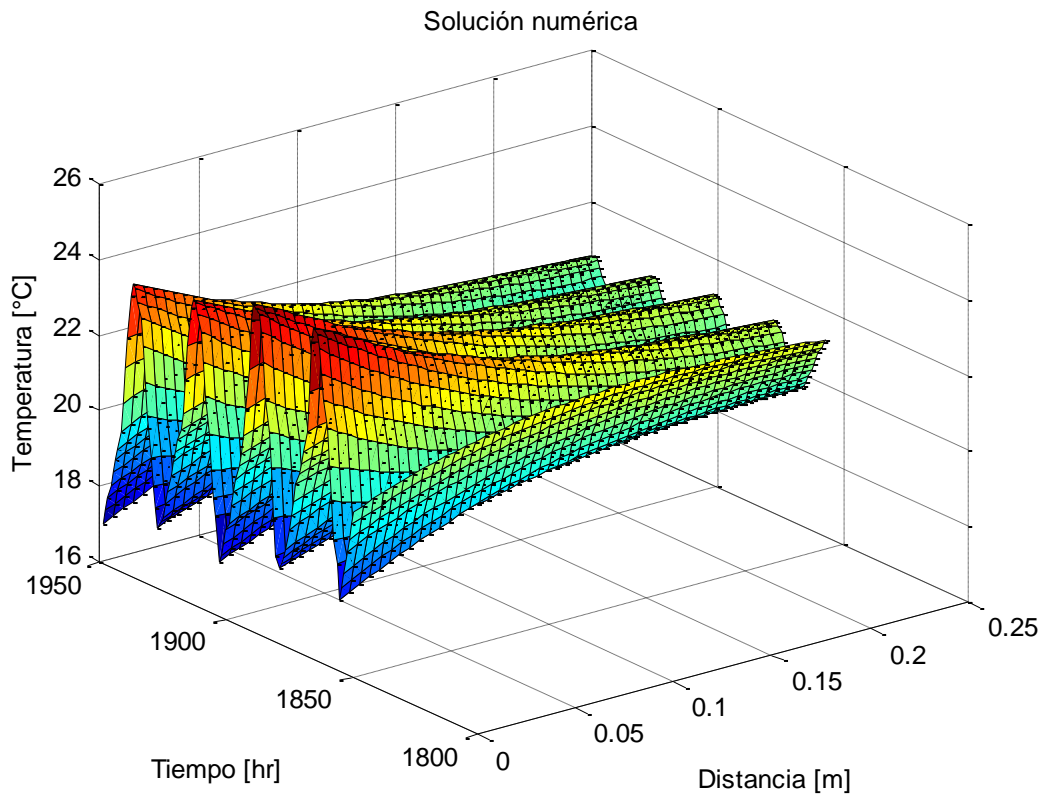


Figura 5-10: Perfil de temperatura en el tiempo y en el interior del hormigón, sin radiación solar

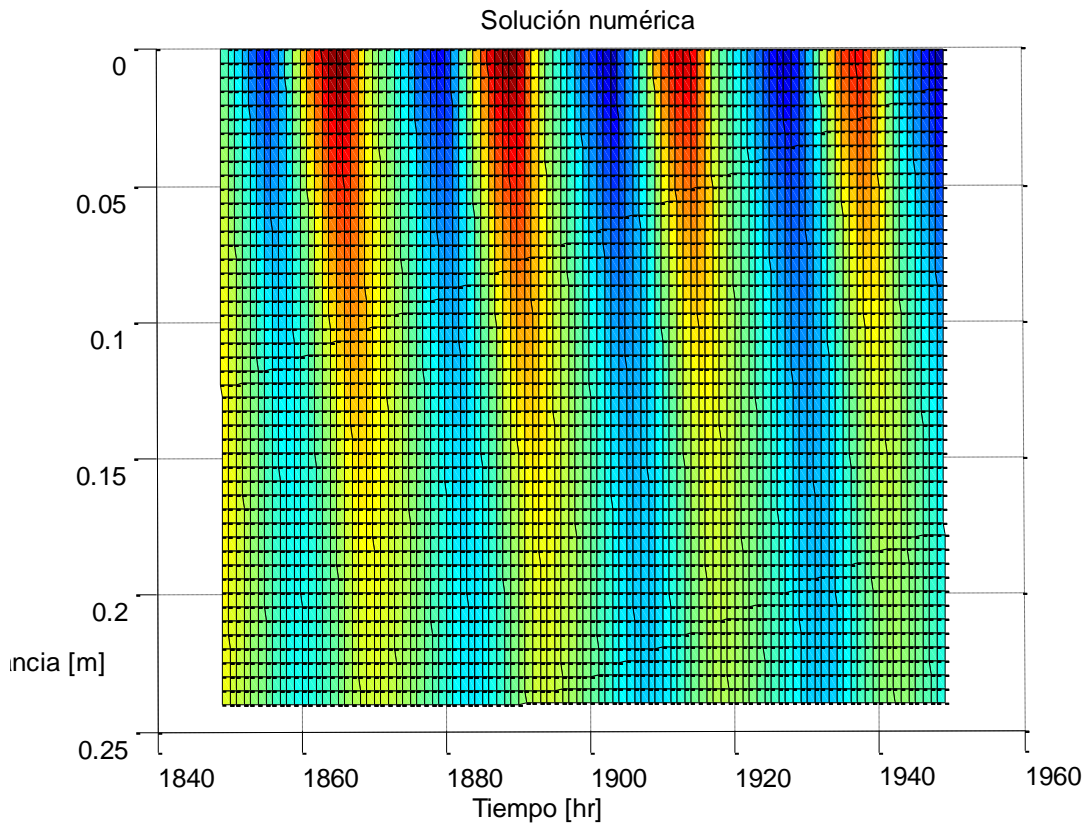


Figura 5-11: Retraso en el cambio de temperatura hacia el interior del hormigón, sin radiación solar

Por otra parte, se resuelve el modelo de transferencia de calor considerando el efecto de la radiación solar sobre el muro, resultado que se muestra en la Figura 5-12 y Figura 5-13. Se observa que la temperatura exterior del hormigón sobrepasa holgadamente la temperatura ambiente, por aproximadamente 10°C , mientras que cuando cae la temperatura ambiente, la temperatura del hormigón sigue siendo superior por aproximadamente 5°C . Salvo esta diferencia en relación al efecto de la radiación solar, se aprecia de igual manera el efecto del retraso en el cambio de la temperatura del hormigón en relación al cambio de la temperatura en el ambiente, existiendo un desfase de entre 1 y 4 horas para la temperatura exterior e interior respectivamente, en relación a la temperatura ambiente.

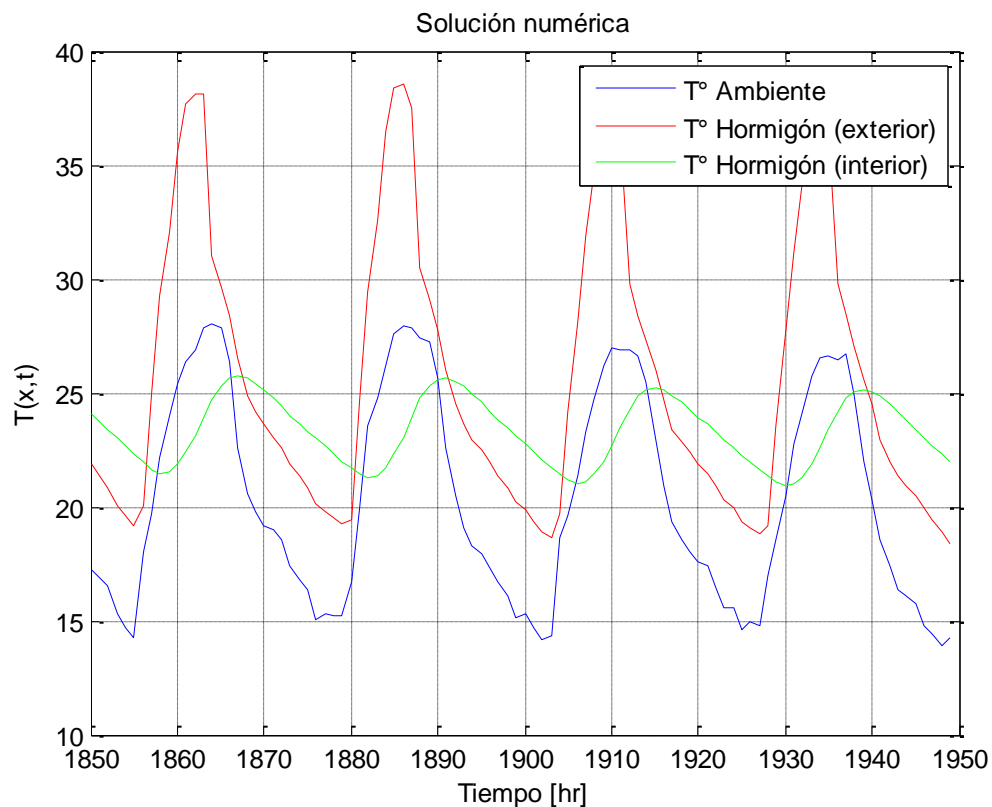


Figura 5-12: Temperatura interior y exterior de muro de hormigón, con radiación solar

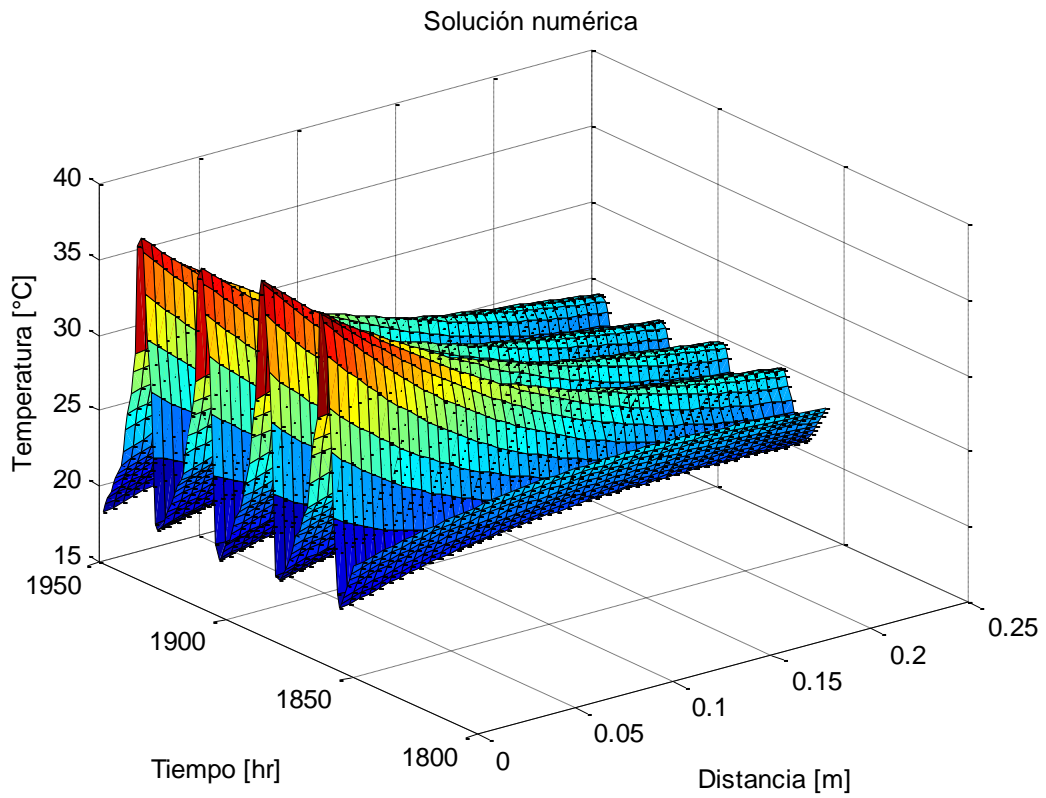


Figura 5-13: Perfil de temperatura en el tiempo y en el interior del hormigón, con radiación solar

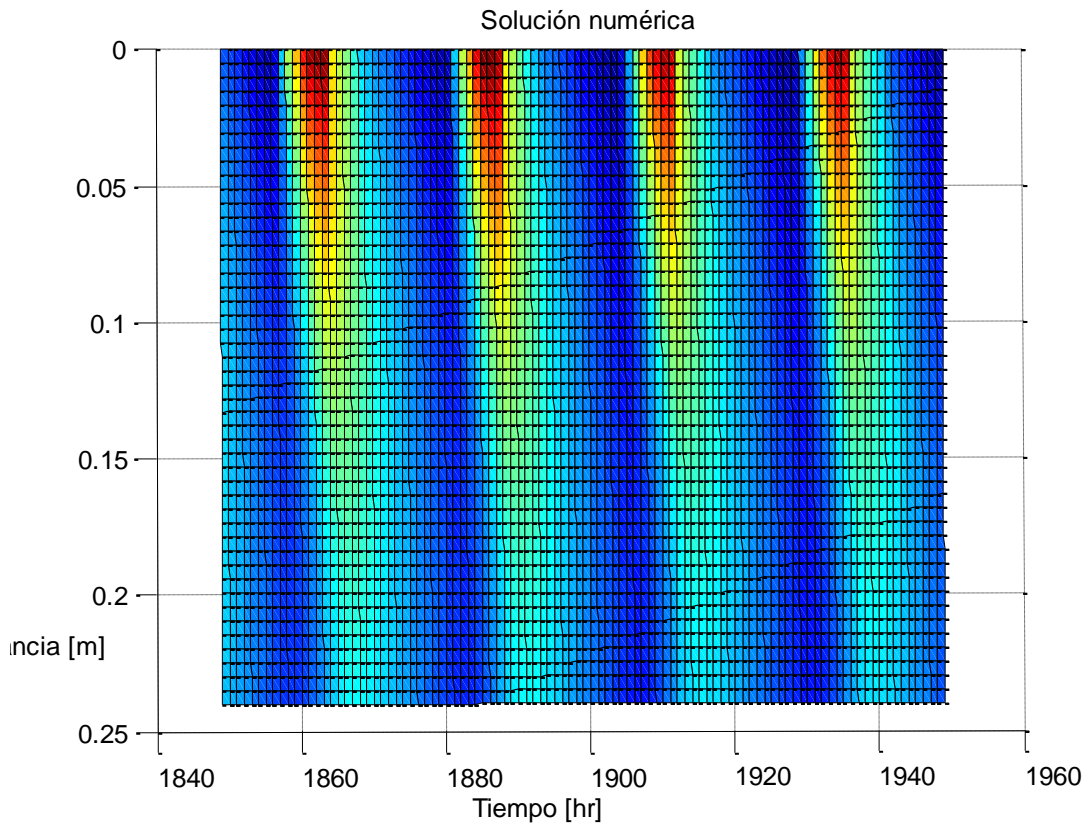


Figura 5-14: Retraso en el cambio de temperatura hacia el interior del hormigón, con radiación solar

5.3.3. Modelo 4

Utilizando las temperaturas obtenidos por el modelo de transferencia de calor descrito en 5.3.1, se genera un modelo que modifica la temperatura de los elementos exteriores de la estructura, utilizando la temperatura promedio de cada elemento exterior, diferenciando los elementos entre aquellos del lado izquierdo, derecho o sobre la estructura debido a que la radiación solar recibida por cada uno de ellos es distinta.

La frecuencia 1 se muestra en la Figura 5-15, en conjunto con la frecuencia 1 del primer modelo desarrollado, en donde todos los elementos toman la temperatura del ambiente de manera instantánea. Es evidente que la magnitud de la variación de la variación de la frecuencia es muy inferior en relación al modelo 1, lo cual se explica en que sólo se modifica la temperatura de los elementos exteriores, tal como sucede con el modelo 3, los cuales tienen una incidencia menor en el cálculo de las frecuencias de la estructura, en comparación a la totalidad de los elementos de ésta. Se observa por otra parte que la variación estacional es muy leve en comparación al modelo 1.

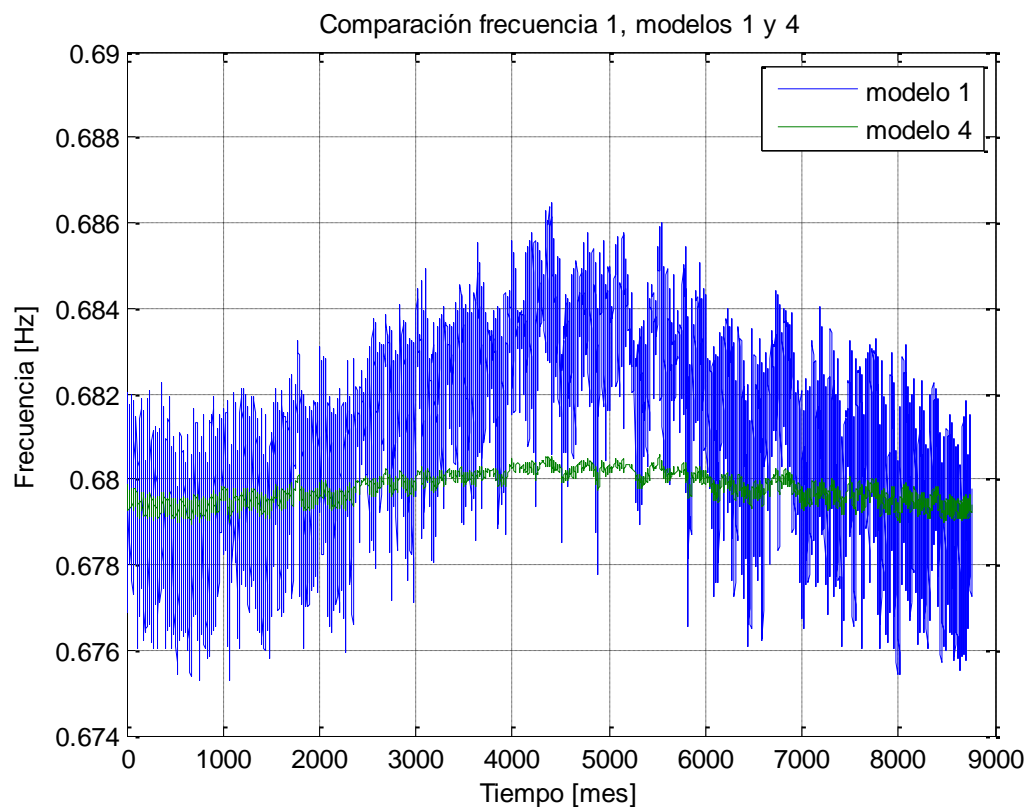


Figura 5-15: Comparación frecuencia 1, modelo 1 y 4

En la Figura 5-16 se grafica la frecuencia 1 versus la temperatura, con lo que es posible observar que se genera un retraso entre el cambio de las frecuencias y el respectivo cambio de la temperatura, lo cual se observa en los registros de la torre central.

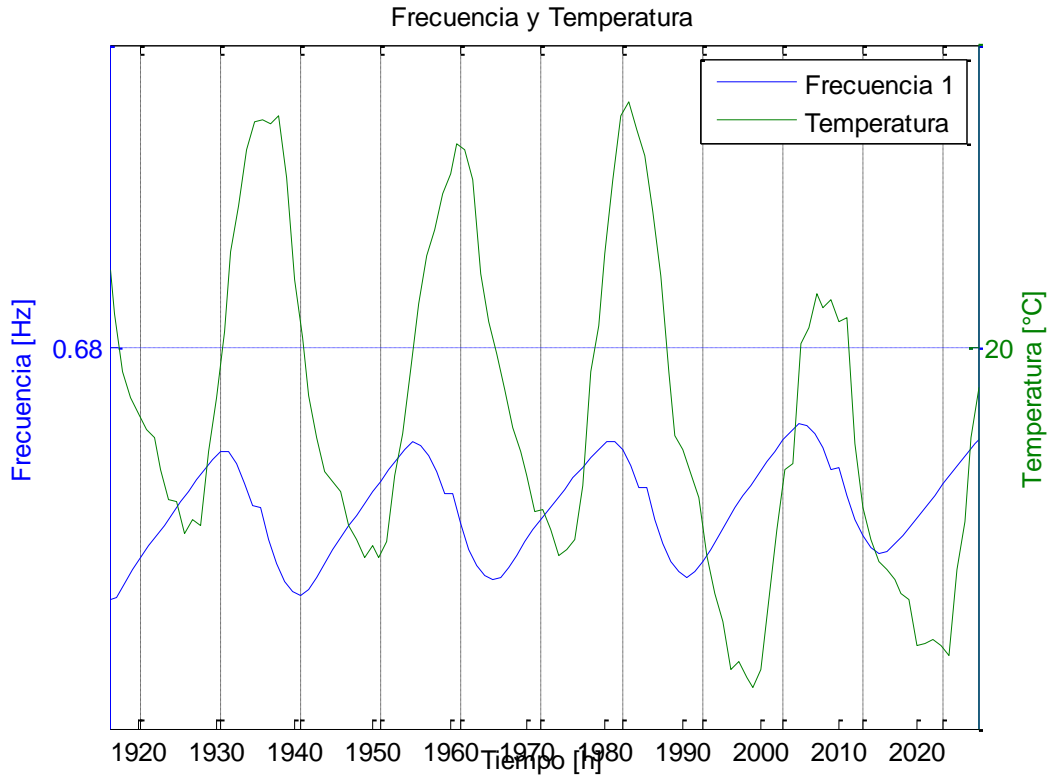


Figura 5-16: Frecuencia 1 versus temperatura

Tabla 5-4: Niveles de variación frecuencias modelo 4

Modo	Variación Porcentual [%]
1	0.24
2	0.26
3	0.29
4	0.34
5	0.38
6	0.42
7	0.45
8	0.47

5.4. Definición de escenarios de daño y aplicación PCA

Una de las finalidades del desarrollo de un modelo de una estructura que varíe sus frecuencias en función de la temperatura, es la evaluación y detección de distintos escenarios de daño a través de una de las metodologías que se estudian en este trabajo (PCA).

Para la definición de los escenarios de daño, las vigas y columnas de la estructura bidimensional se caracterizan por letras y números, tal como se muestra en la Figura 5-17.

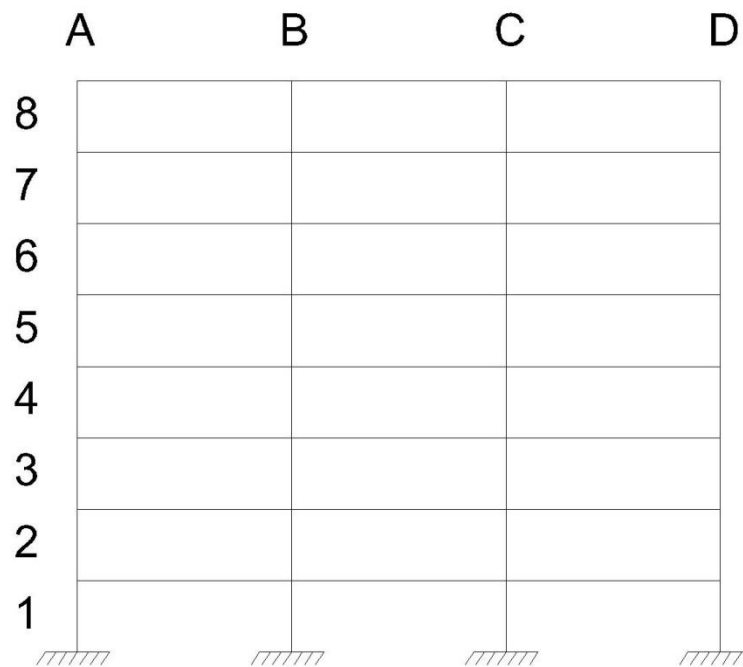


Figura 5-17: Caracterización de estructura para determinación de escenarios de daño

Los escenarios de daño a estudiar se describen a continuación:

- E1: rótulas en la base de las columnas A y B.
- E2: pérdida rigidez axial columna D1.
- E3.1: disminución 10% rigidez flexural columnas de la base.
- E3.2: disminución 20% rigidez flexural columnas de la base.
- E3.3: disminución 50% rigidez flexural columnas de la base.

- E4.1: disminución 50% rigidez flexural columna B4.
- E4.2: disminución 100% rigidez flexural columna B4.

El modelo utilizado para simular las frecuencias es el número 1, debido principalmente a que el nivel de variación que presentan las frecuencias es el más realista de todos los modelos realizados. Las variaciones porcentuales producto de los distintos escenarios de daño para las 8 primeras frecuencias características de la estructura se muestran en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5: Variación porcentual cambio de frecuencias en cada escenario de daño

Modo	Escenario de Daño						
	E1	E2	E3.1	E3.2	E3.3	E4.1	E4.2
1	-5.4	-13.1	-0.9	-2.0	-7.2	-1.1	-3.1
2	-5.1	-12.3	-0.9	-1.9	-6.7	-0.2	-0.5
3	-4.3	-35.9	-0.8	-1.8	-5.8	-1.7	-4.6
4	-3.4	-28.1	-0.8	-1.6	-4.6	-0.1	-0.4
5	-2.5	-21.1	-0.6	-1.3	-3.4	-1.3	-3.4
6	-1.6	-15.9	-0.5	-0.9	-2.2	-0.9	-2.2
7	-0.8	-11.4	-0.3	-0.5	-1.1	-0.4	-1.0
8	-0.2	-6.9	-0.1	-0.1	-0.3	-1.4	-2.6

Se observa que existen casos de daño en que las variaciones de las frecuencias son importantes, como son el caso E1, E2 y E3.3, otros casos presentan variaciones de frecuencias más moderadas como son los casos E3.2 y E4.2, mientras que existen escenarios en que la variación de las frecuencias es muy pequeña, cercana al 1% o incluso menor, como son los casos E3.1 y E4.1. El objetivo del método de detección de daño es detectar daño en cada uno de los casos anteriormente descritos, independiente del nivel de variación de las frecuencias, considerando que las series de frecuencias tienen una variación diaria producto de la temperatura del orden del 2%.

A continuación, desde la Figura 5-18 a la Figura 5-24 se muestran las frecuencias de la estructura con los distintos escenarios de daño aplicados a la mitad de cada registro. Se observa que existen escenarios de daño que producen caídas de frecuencias evidentes, mientras que hay otros escenarios en donde los cambios de frecuencia son más sutiles.

Frecuencias marco plano con daño
E1

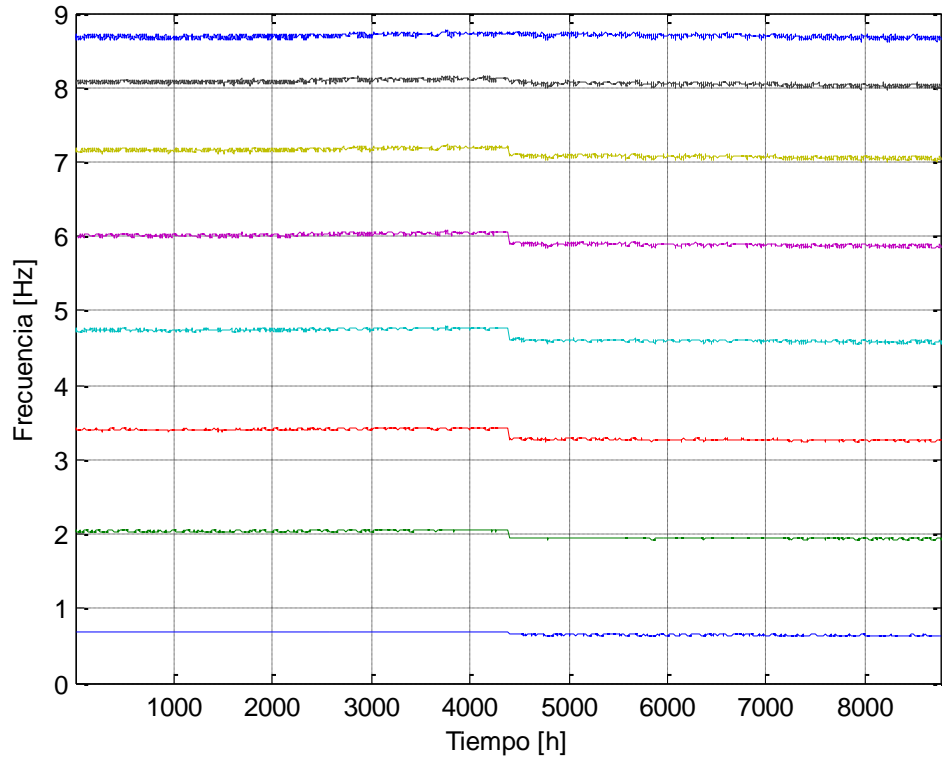


Figura 5-18: Frecuencias daño E1

Frecuencias marco plano con daño
E2

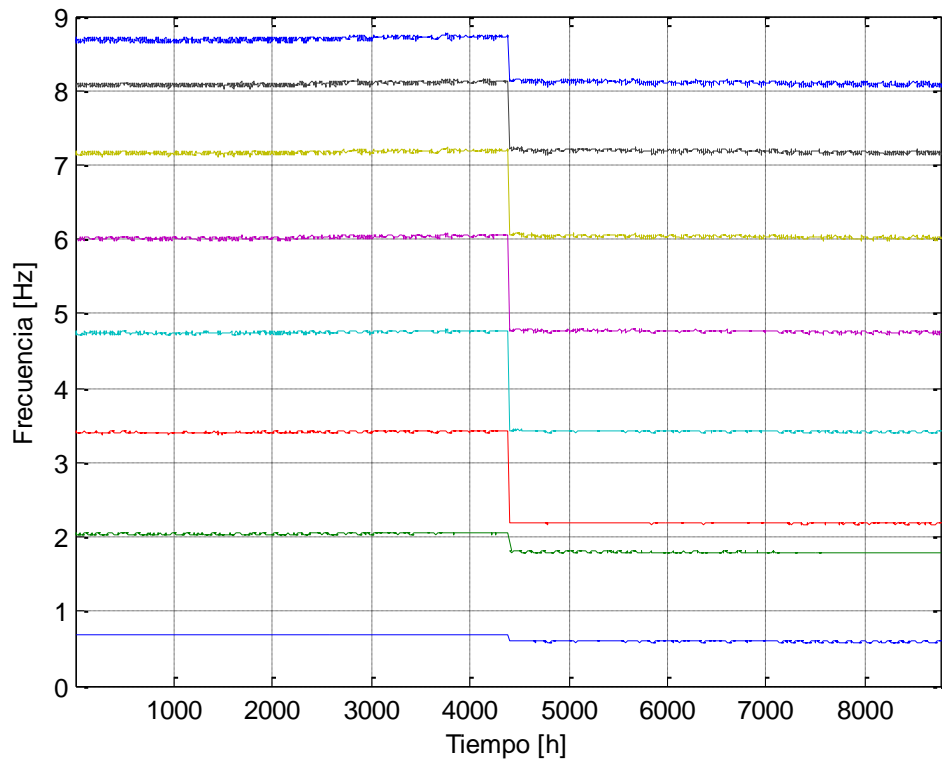


Figura 5-19: Frecuencias daño E2

Frecuencias marco plano con daño
E3.1

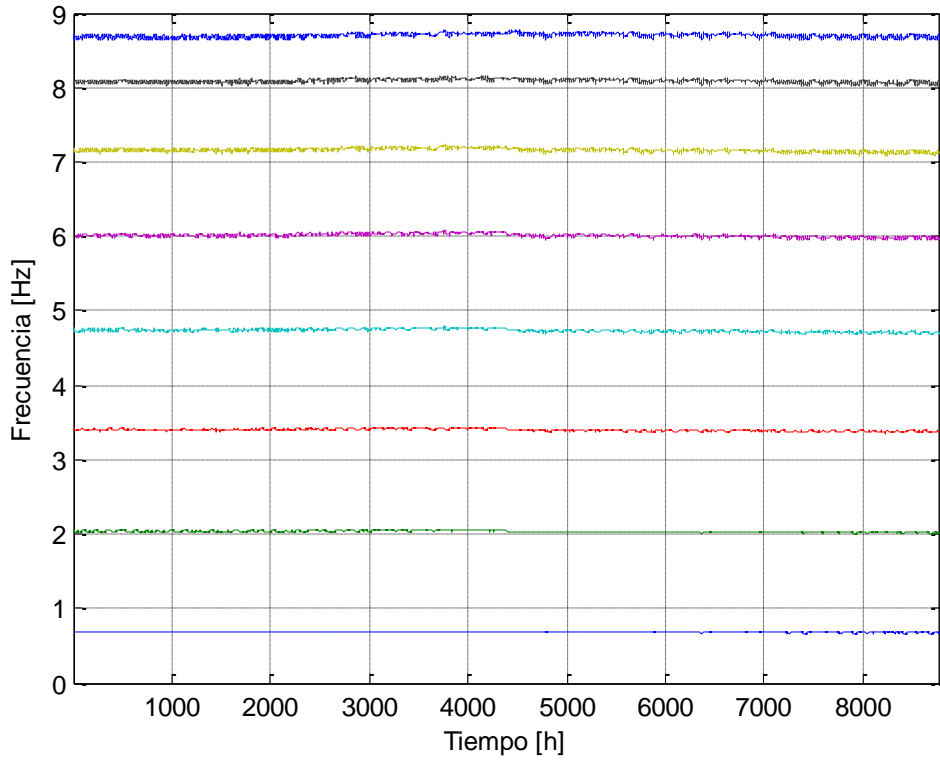


Figura 5-20: Frecuencias daño E3.1

Frecuencias marco plano con daño
E3.2

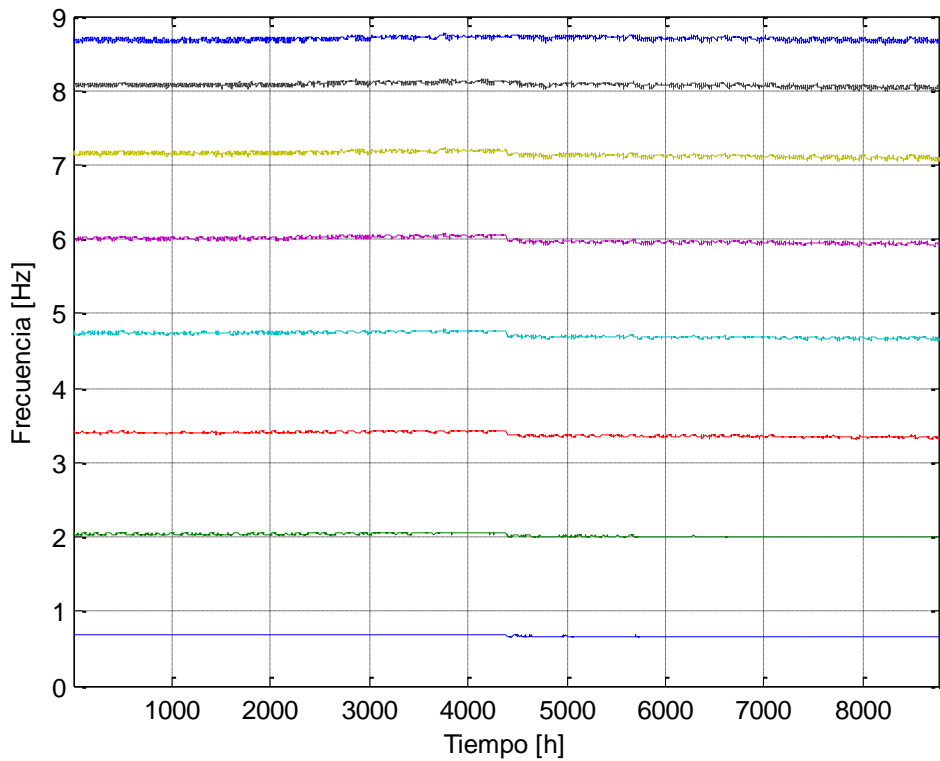


Figura 5-21: Frecuencias daño E3.2

Frecuencias marco plano con daño
E3.3

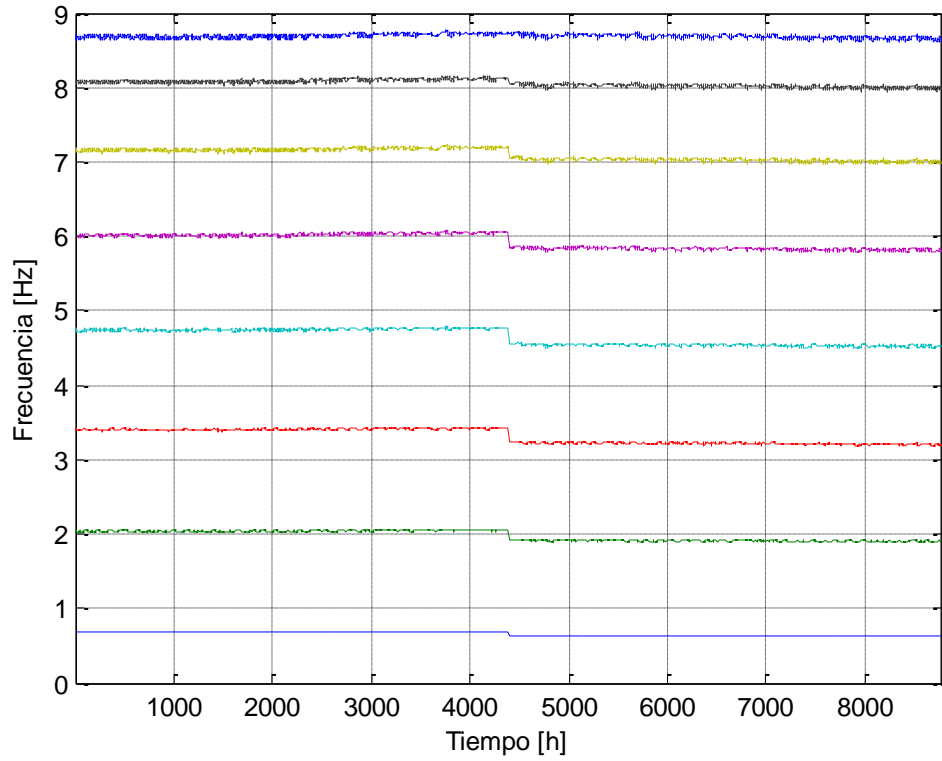


Figura 5-22: Frecuencias daño E3.3

Frecuencias marco plano con daño
E4.1

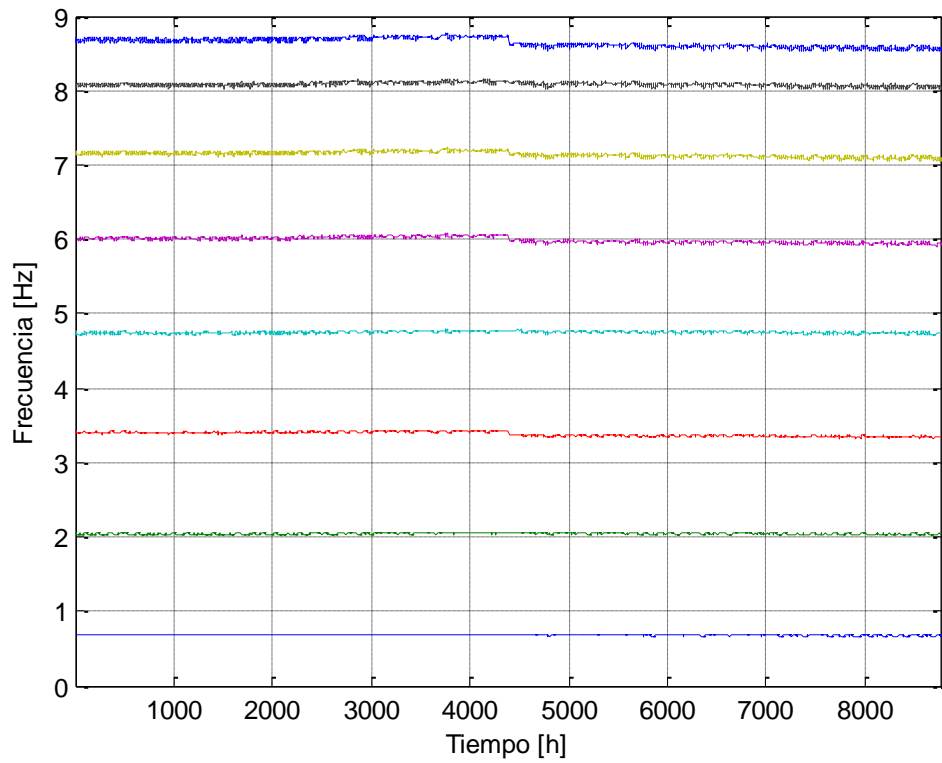


Figura 5-23: Frecuencias daño E4.1

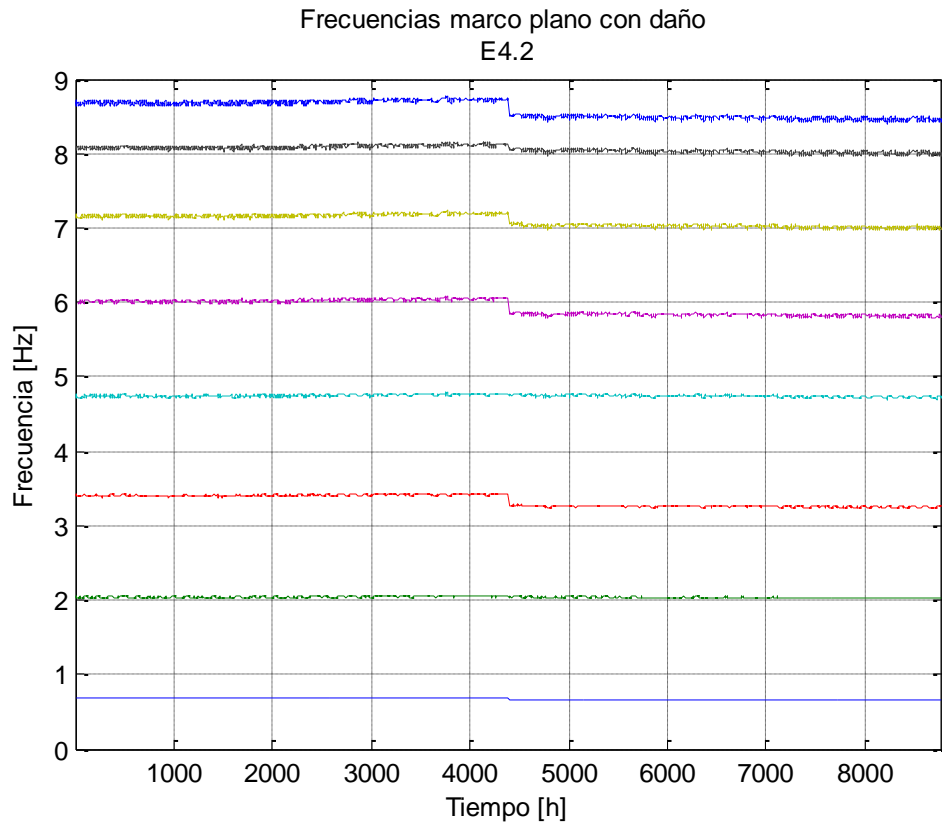


Figura 5-24: Frecuencias daño E4.2

Una vez generados los registros de frecuencia para cada uno de los escenarios de daño, se realiza un análisis de detección de daño con el método PCA, aplicando distintos niveles de ruido a los registros de frecuencia (1%, 5%, 10%, 20%, 30% y 50%). Para cada escenario de daño se grafican los gráficos de control con los respectivos límites, los cuales sirven para determinar si ha habido algún daño en la estructura. Estos gráficos se muestran de la Figura 5-25 a la Figura 5-31.

Se observa de los resultados que el método PCA identifica todos los escenarios de daño independiente del nivel de ruido del registro.

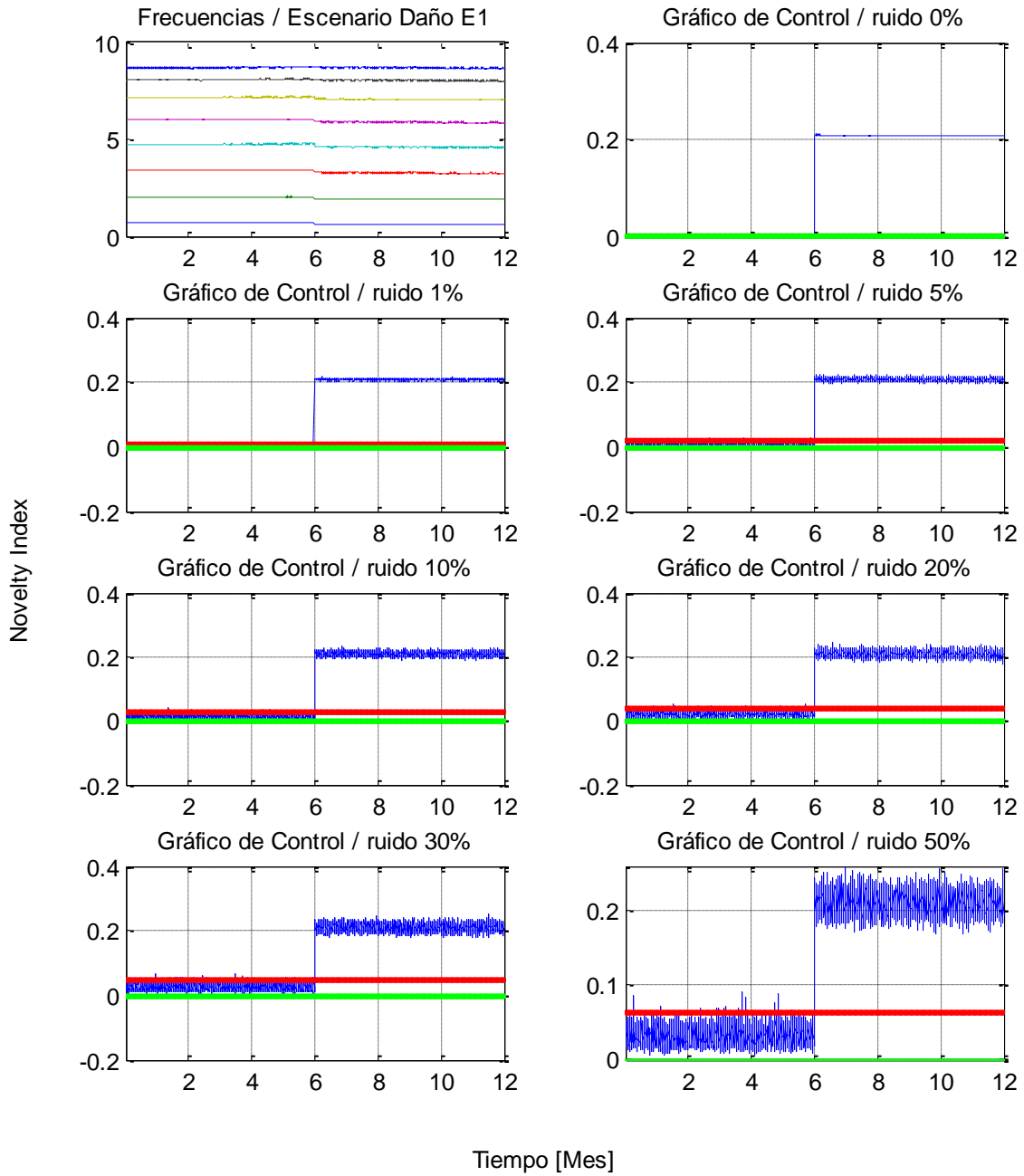


Figura 5-25: Análisis PCA escenario daño E1

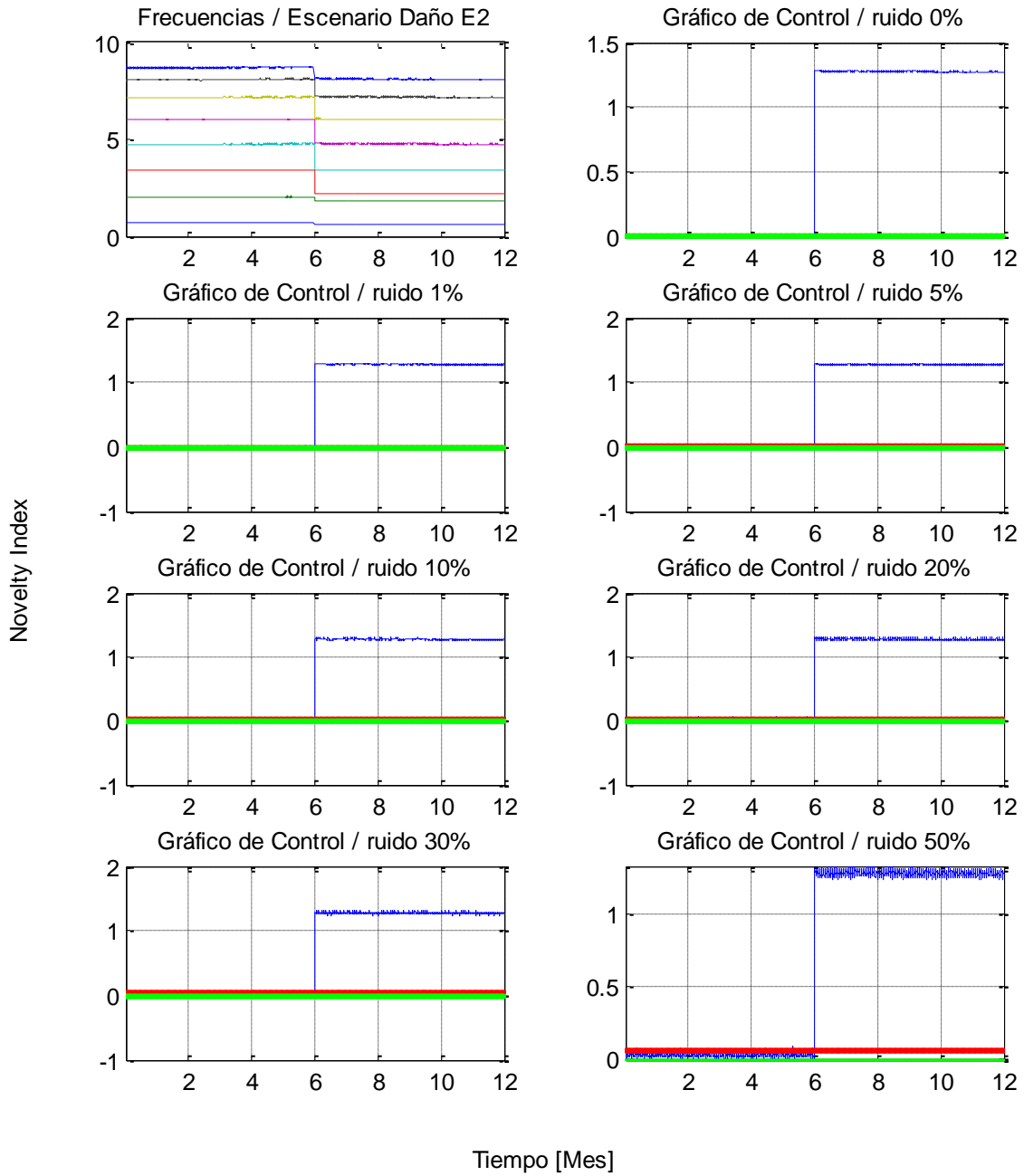


Figura 5-26: Análisis PCA escenario daño E2

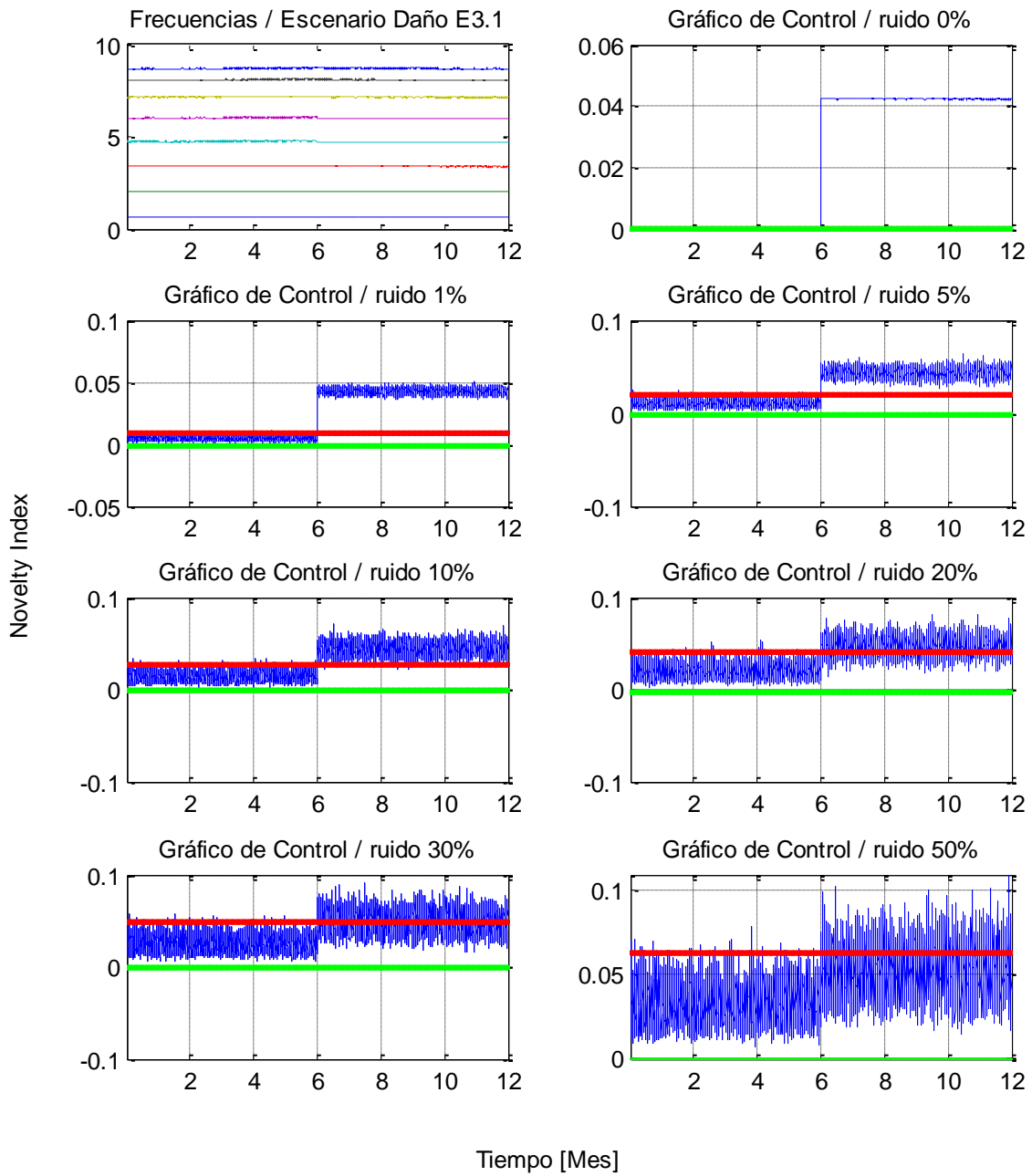


Figura 5-27: Análisis PCA escenario daño E3.1

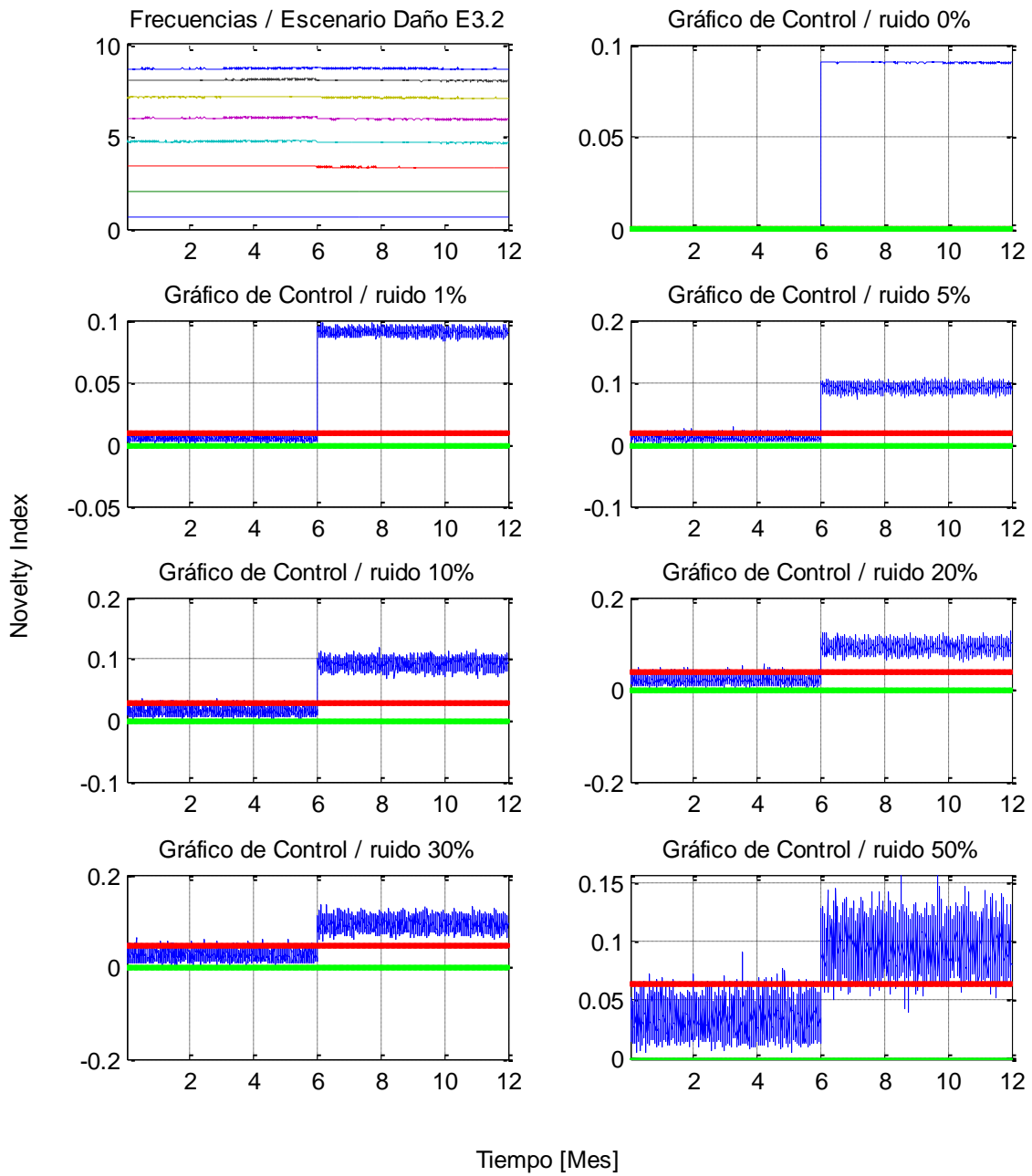


Figura 5-28: Análisis PCA escenario daño E3.2

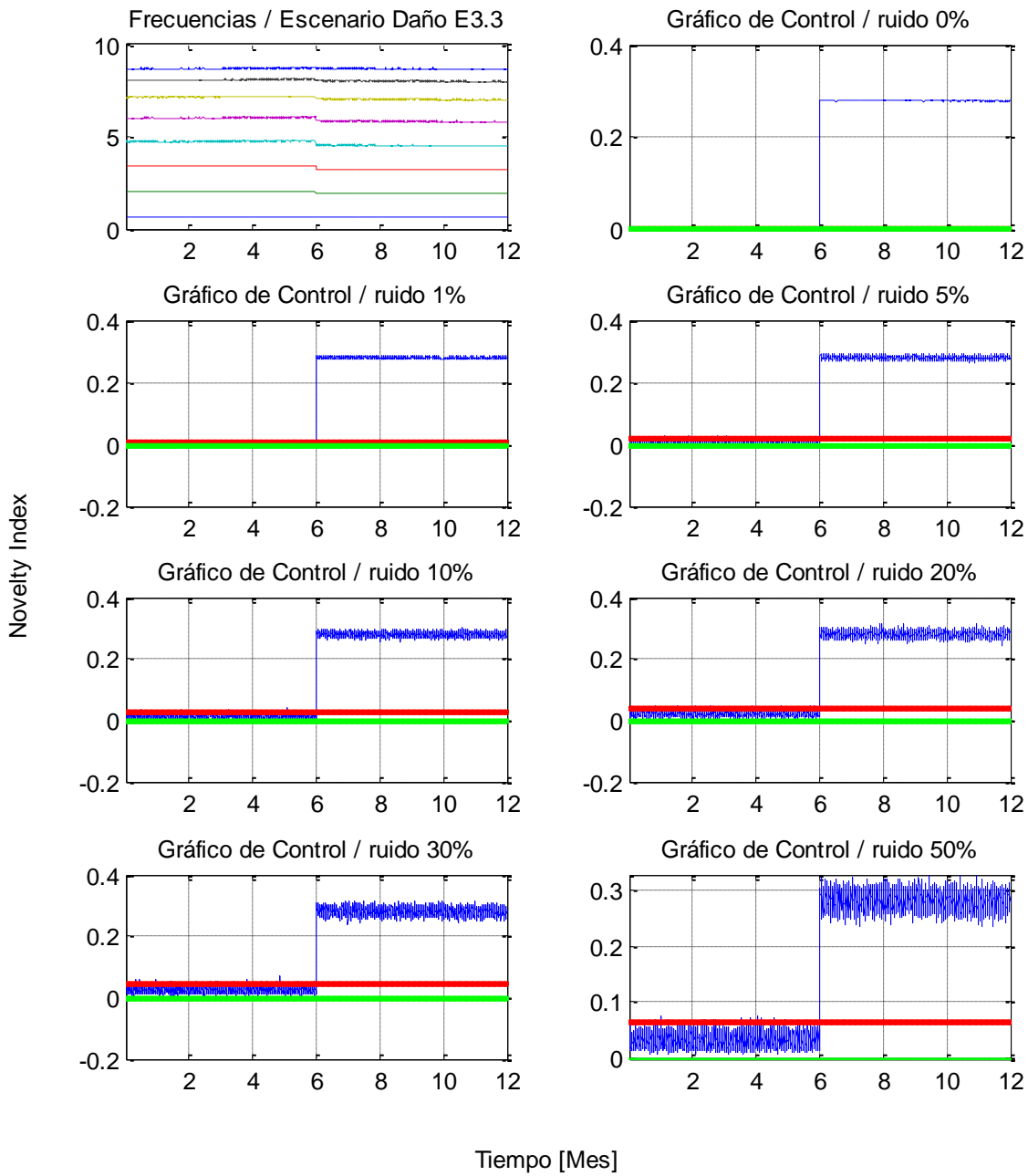


Figura 5-29: Análisis PCA escenario daño E3.3

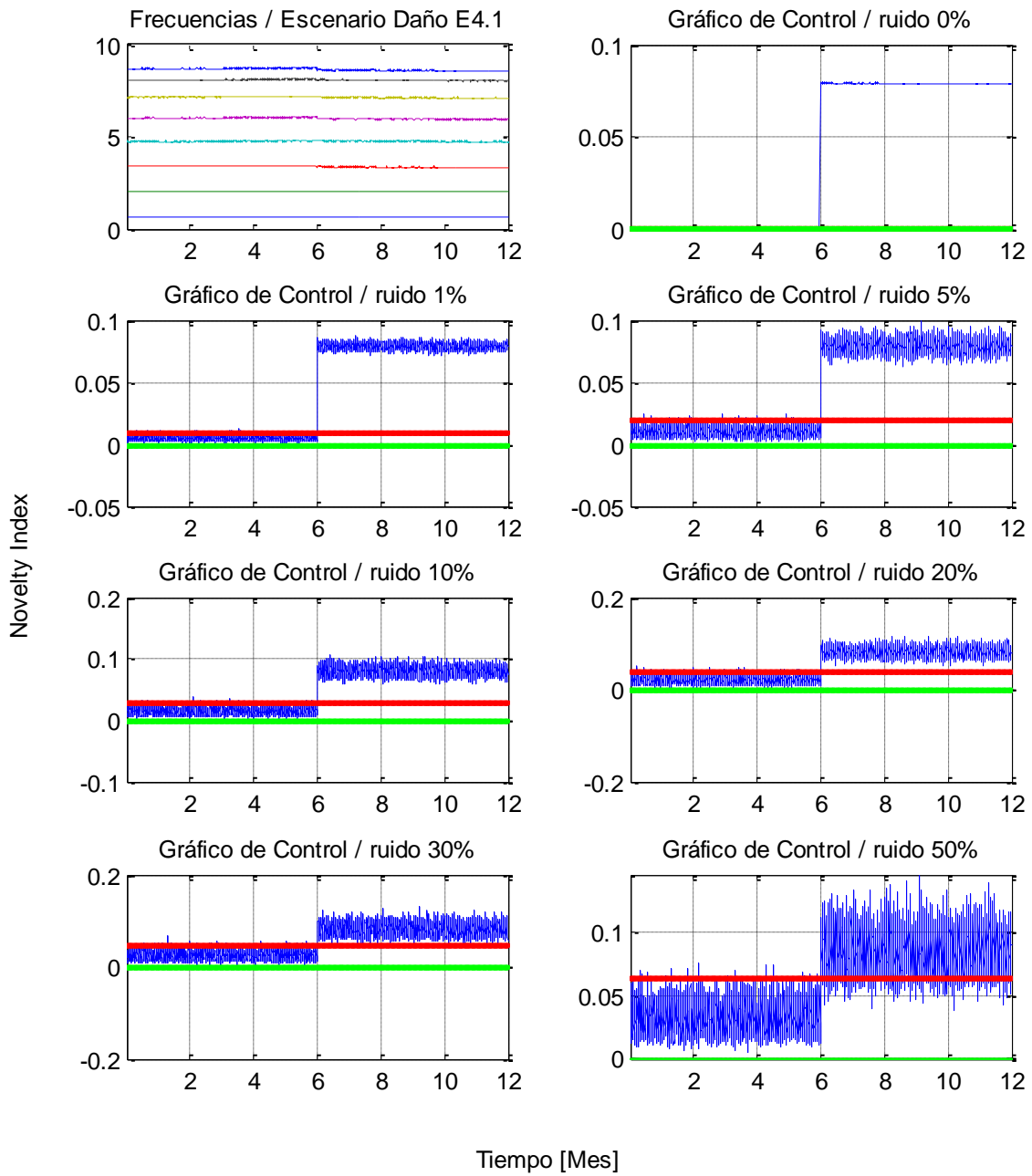


Figura 5-30: Análisis PCA escenario daño E4.1

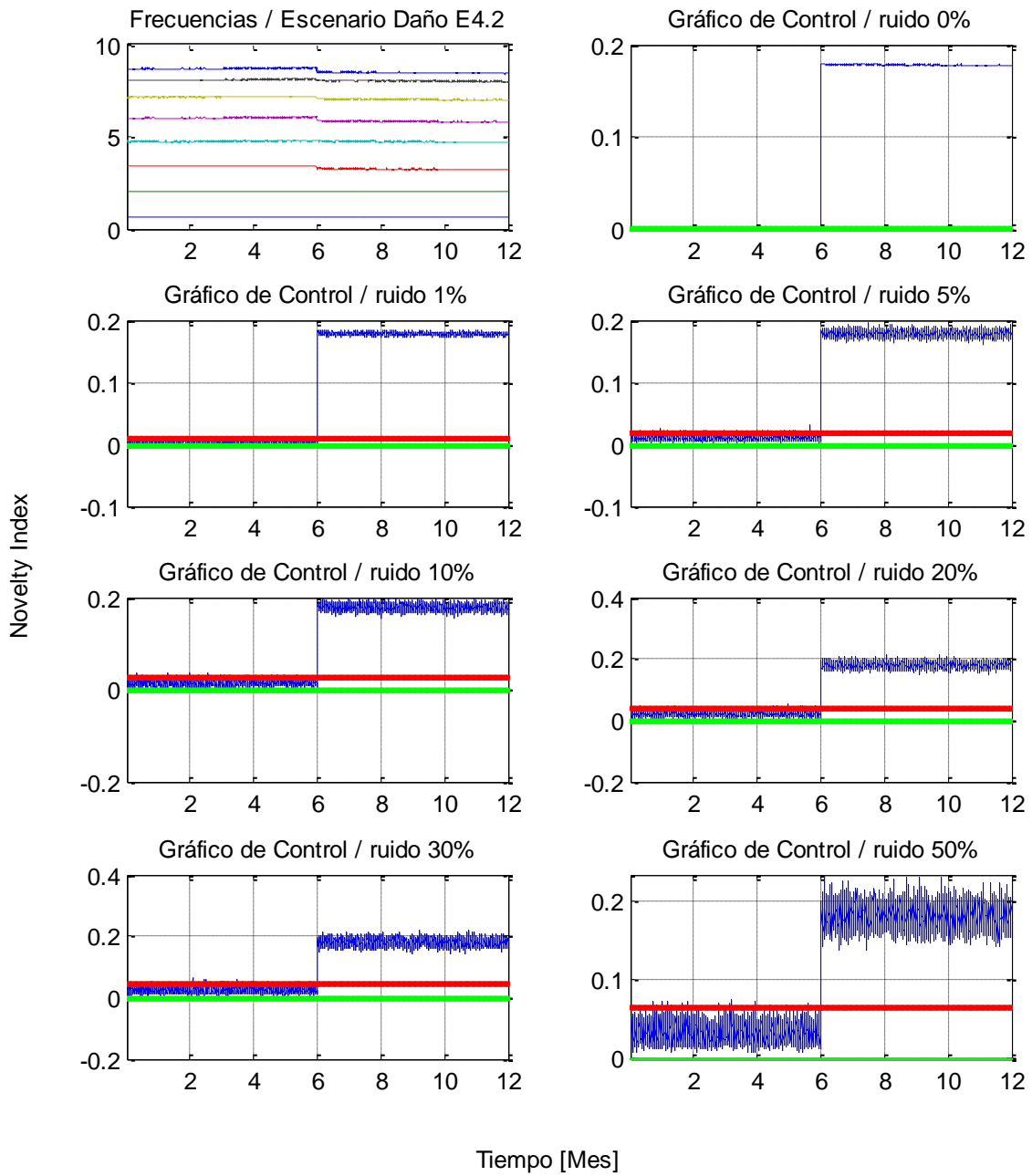


Figura 5-31: Análisis PCA escenario daño E4.2

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS

En el presente capítulo se analizan los registros de variables ambientales, y cómo éstos afectan a las frecuencias características de la Torre Central de la FCFM de la Universidad de Chile. Además, se realizan los estudios referentes a las metodologías descritas en el marco teórico, para la extracción de los efectos ambientales y la detección de daño estructural.

6.1. Evaluación del efecto de las variables ambientales en el edificio Torre Central

Los registros de frecuencia utilizados para el análisis de las metodologías estudiadas fueron obtenidos del SHM del edificio Torre Central, de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Los registros de frecuencia fueron generados mediante la aplicación del método de identificación SSI a los registros de aceleración de la estructura, y cuyo análisis se reporta en [Basoalto, 2013]. Los registros utilizados abarcan un periodo de 2 años y 6 meses, entre el 24 de Junio de 2009 y el 31 de Diciembre de 2011. La identificación se realiza en ventanas de tiempo de 15 minutos mediante el método SSI_COV. El valor de la frecuencia registrado en cada instante de tiempo corresponde al análisis de los datos registrados los 15 minutos posteriores al instante de tiempo de registro. Las frecuencias identificadas se muestran en la Figura 6-1.

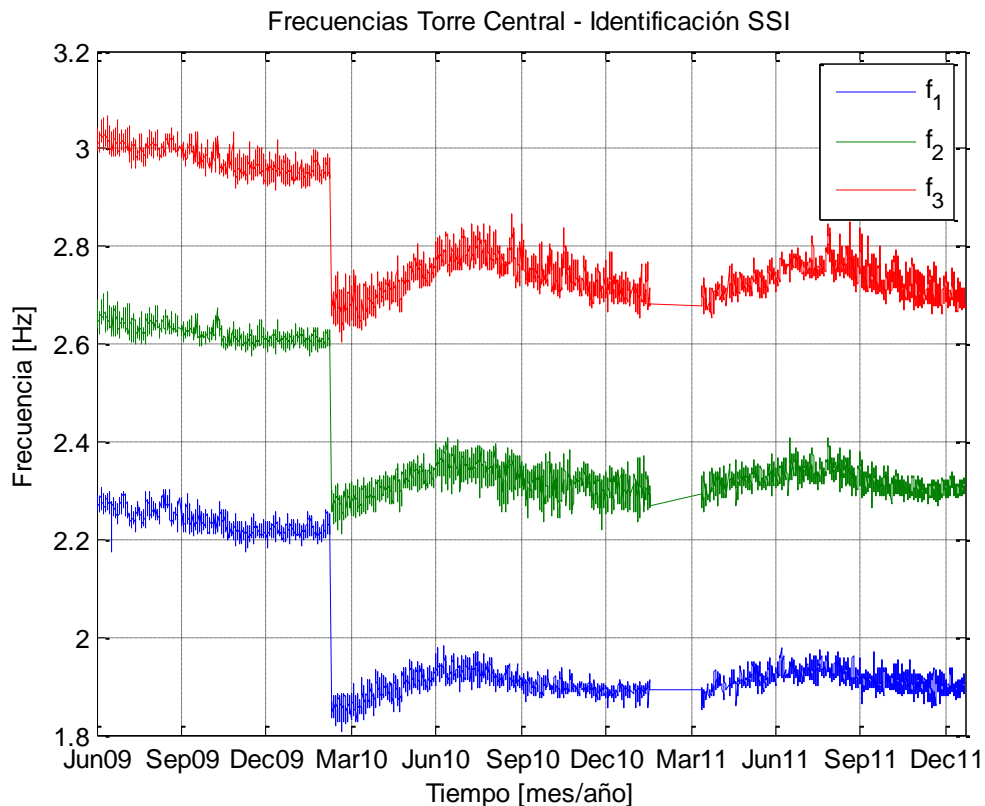


Figura 6-1: Frecuencias Torre Central - Identificación SSI

Como se puede observar de los registros de frecuencias, existen dos eventos relevantes que mencionar. En primer lugar, la caída abrupta de las frecuencias corresponde al efecto que tuvo el terremoto del 27 de febrero de 2010 sobre la estructura, el que produjo una flexibilización de ésta producto de la ocurrencia de daño estructural. En segundo lugar, existe un periodo sin registro entre los días 31 de Enero y 22 de Marzo de 2011 producto de que el sistema de medición y adquisición de datos se mantuvo inactivo.

Por otra parte, la variación diaria y estacional que se observa en los registros corresponde principalmente a factores ambientales.

En la Figura 6-2 se observa la variación de las frecuencias en conjunto con la temperatura en un periodo de 6 días, en donde no hubo eventos de precipitación 7 días antes. La tendencia de variación debido a los efectos de la temperatura es clara, y se registra una variación del 2.6% para las 3 frecuencias en estudio.

En la Figura 6-3 se grafican las frecuencias en el rango de 1 año, en conjunto con la temperatura, en donde se observa claramente que la tendencia de variación

estacional de las frecuencias está relacionada con la variación de temperatura. En este periodo se registran variaciones del 6.8% para la frecuencia 1, 8.2% para la frecuencia 2 y 7.7% para la frecuencia 3.

Finalmente, en la Figura 6-4 se grafican las frecuencias en un rango de 1 mes acompañadas de los registros de saturación del suelo a 10 m. Se observa que en este periodo existieron dos eventos claros de aumentos de saturación del suelo debido a precipitación, y se observa también que las frecuencias tuvieron perturbaciones importantes atribuibles a este efecto. Las variaciones de las frecuencias debido a efectos de precipitación son 5.0% para la frecuencia 1, 4.9% para la frecuencia 2 y 4.0% para la frecuencia 3.

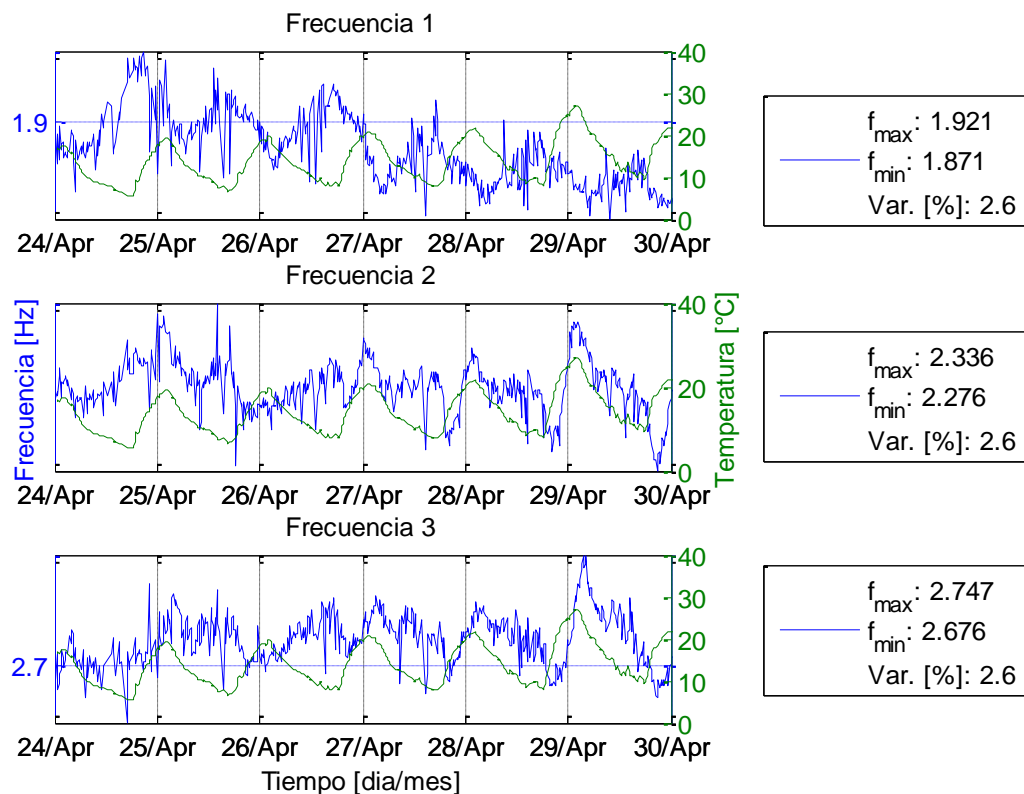


Figura 6-2: Variación diaria de frecuencias debido a temperatura

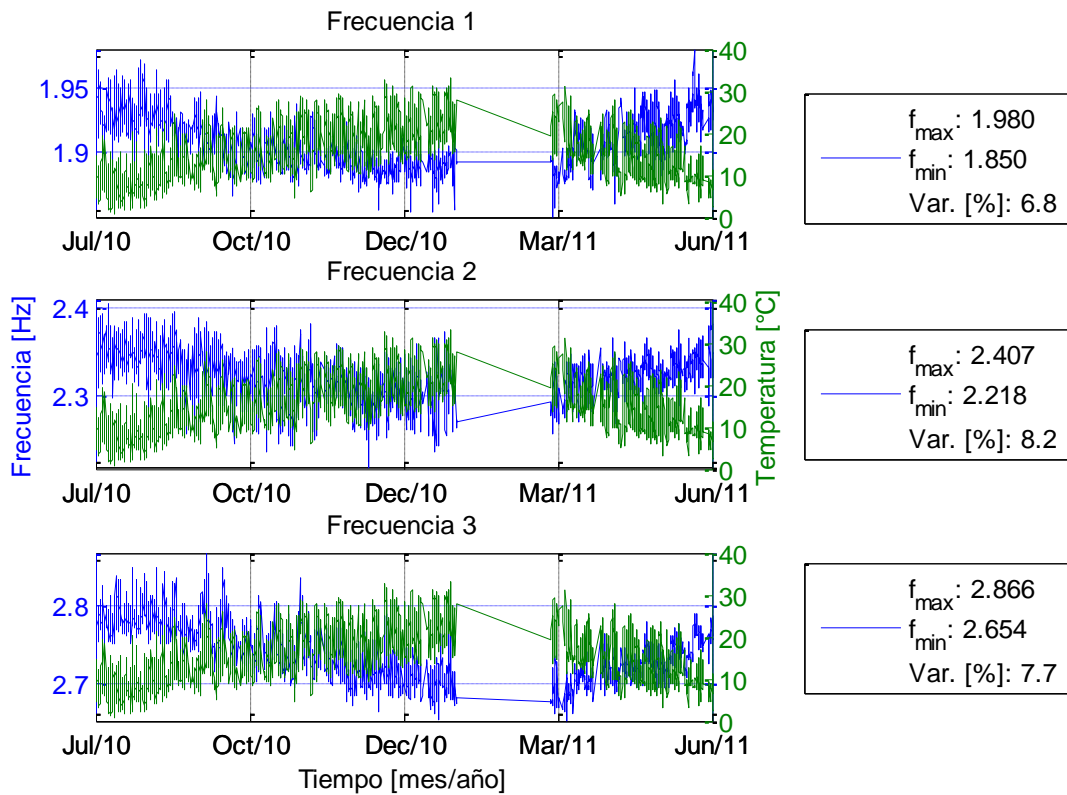


Figura 6-3: Variación estacional de frecuencias debido a temperatura

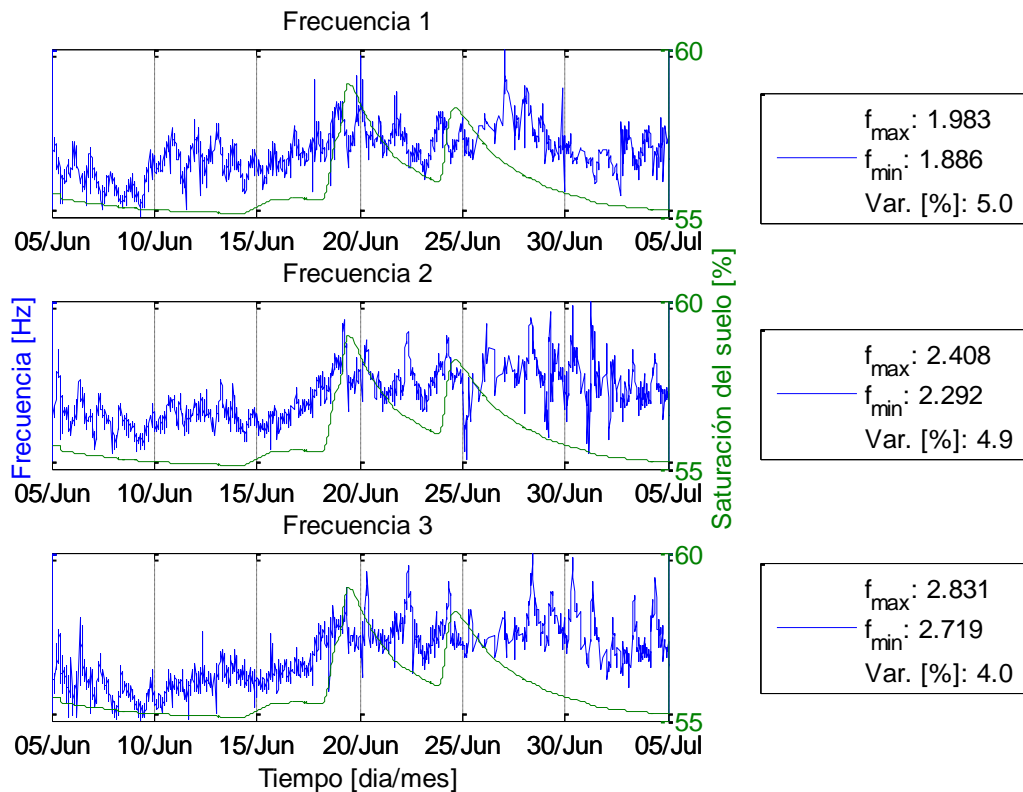


Figura 6-4: Variación de frecuencias debido a precipitación

En la Figura 6-5 se muestran histogramas de las frecuencias características de la Torre Central para todo el periodo. Se observa una disminución en el valor de las frecuencias después del terremoto producto del daño en la estructura. Dicha disminución es de 15.9%, 12.3% y 8.6% en promedio para las frecuencias 1, 2 y 3 respectivamente.

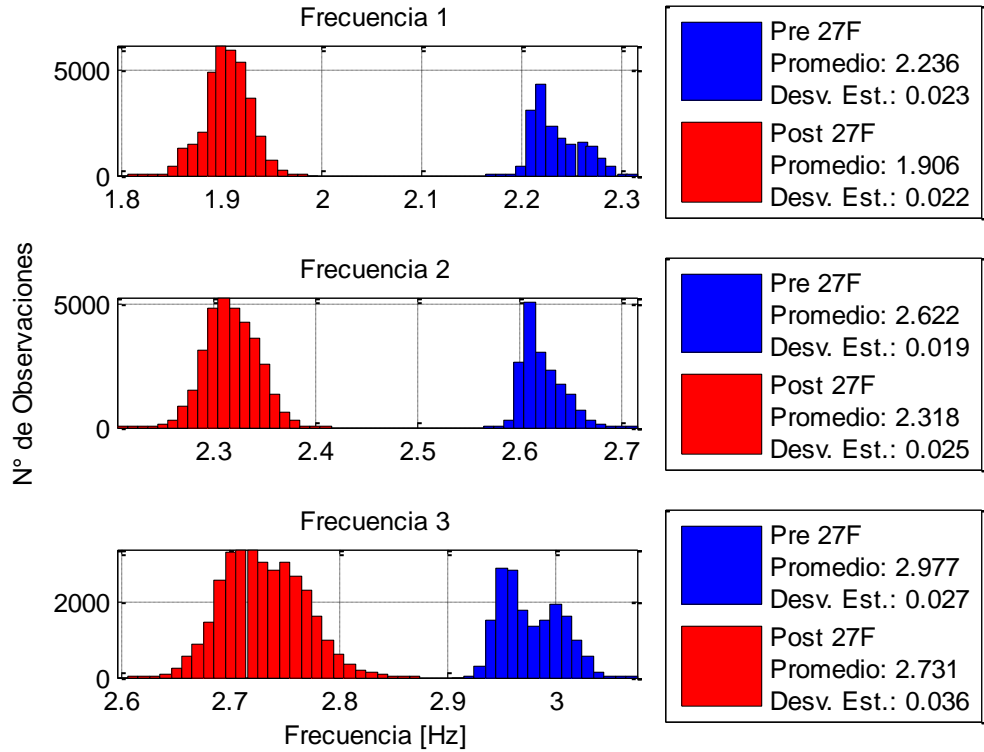


Figura 6-5: Histogramas de las frecuencias características del edificio Torre Central, para antes y después del 27F.

En la Figura 6-6 se muestran histogramas normalizados (realizados con curvas de ajuste) para los datos obtenidos con posterioridad al 27F, en donde se presentan los datos en bruto y los datos filtrados. El filtro realizado corresponde a seleccionar los datos que no están influenciados por sismos, lluvia y temperatura. Así, se eliminaron las frecuencias calculadas en un periodo de tiempo en el que ocurrió un sismo de cualquier intensidad, se eliminaron las frecuencias en las fechas en que ocurrió un evento de lluvia y 7 días después de ese evento, y por último, se seleccionaron las frecuencias presentes en el rango de temperatura 20.5°C - 21.5°C, determinando dicho rango en función de definir la temperatura de referencia a 21°C.

Con lo anterior, se logra determinar la influencia de éstos factores ambientales, obteniendo una considerable disminución en la dispersión de los datos. La frecuencia promedio disminuyó 0,7%, 0,6% y 0,7%, mientras que la desviación estándar disminuyó 23%, 12% y 17% para las frecuencias 1, 2 y 3 respectivamente.

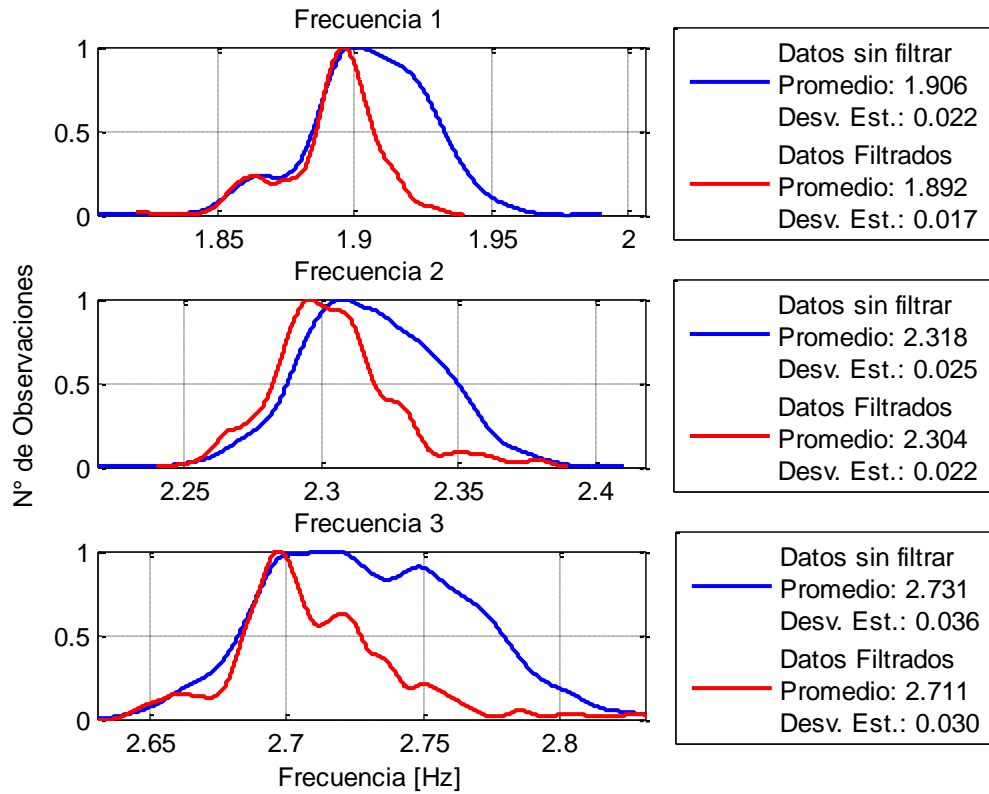


Figura 6-6: Histogramas de frecuencias normalizados para el periodo post 27F. Los datos filtrados corresponden a las frecuencias sin la influencia de sismos, lluvia y seleccionadas en un rango de temperatura 20.5°C a 21.5°C.

6.1.1. Determinación de frecuencias con media móvil

Para la realización de los análisis que prosiguen, se realiza un ajuste a las frecuencias identificadas mediante SSI_COV. Para obtener un registro más estable, se crea un registro utilizando una media móvil para cada valor, es decir, el valor del registro i -ésimo es el promedio de los cinco valores entre $i-2$ e $i+2$. Este resultado se muestra en la Figura 6-7, en donde se grafican superpuestas la frecuencia 1 original y la frecuencia recalculada con una media móvil. Se observa que la frecuencia calculada con media móvil es más suave y tiene una tendencia más estable.

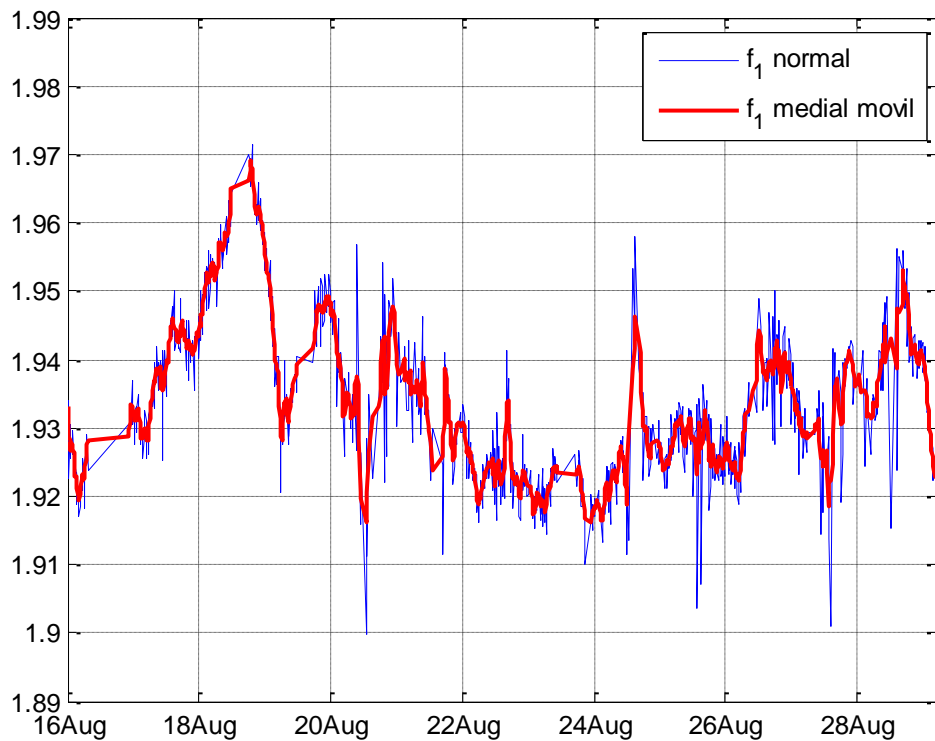


Figura 6-7: Frecuencia 1 original y calculada con media móvil, en un rango de 13 días.

6.2. Estudio de la correlación de variables ambientales y frecuencias

A continuación se presentan distintos análisis de correlaciones entre las series de tiempo de frecuencias y de factores ambientales, con el objetivo de determinar qué variables son adecuadas para modelar las frecuencias de la Torre Central, y de esta manera, generar una metodología que permita identificar daño estructural.

6.2.1. Correlación entre las distintas variables ambientales

Para la elección de las variables ambientales a utilizar en el modelo de regresión, se estudian las correlaciones entre dichas variables. Los factores de correlación R y R², definidos en 2.1.1, se muestran en la Tabla 6-1 y Tabla 6-2 respectivamente. Los datos de saturación del suelo a 5 m de profundidad no son considerados debido a que el sensor de saturación presentó problemas.

Tabla 6-1: Coeficientes R variables ambientales

	Temp. Aire	Sat. 5 m	Sat. 10 m	Sat. 20 m	Hum Relativa	Rad. Solar	Pres. Atm.	Preci.	Vel. Viento	Dir. Viento
Temp. Aire	1	0.17	-0.09	0.17	-0.83	0.65	-0.59	-0.10	0.49	0.16
Sat. 5 m	0.17	1	0.01	1.00	-0.07	0.06	-0.16	-0.02	0.04	0.02
Sat. 10 m	-0.09	0.01	1	0.01	0.03	0.02	0.13	0.02	0.05	0.00
Sat. 20 m	0.17	1.00	0.01	1	-0.07	0.06	-0.16	-0.02	0.04	0.02
Hum. Rel.	-0.83	-0.07	0.03	-0.07	1	-0.58	0.41	0.14	-0.40	-0.11
Rad. Solar	0.65	0.06	0.02	0.06	-0.58	1	-0.17	-0.05	0.43	0.13
Pres. Atm.	-0.59	-0.16	0.13	-0.16	0.41	-0.17	1	0.05	-0.22	-0.09
Preci.	-0.10	-0.02	0.02	-0.02	0.14	-0.05	0.05	1	0.06	-0.03
Vel. Viento	0.49	0.04	0.05	0.04	-0.40	0.43	-0.22	0.06	1	0.12
Dir. Viento	0.16	0.02	0.00	0.02	-0.11	0.13	-0.09	-0.03	0.12	1

Tabla 6-2: Coeficientes R² variables ambientales

	Temp. Aire	Sat. 5 m	Sat. 10 m	Sat. 20 m	Hum Relativa	Rad. Solar	Pres. Atm.	Preci.	Vel. Viento	Dir. Viento
Temp. Aire	1.00	0.03	0.01	0.03	0.69	0.42	0.35	0.01	0.24	0.03
Sat. 5 m	0.03	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
Sat. 10 m	0.01	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Sat. 20 m	0.03	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
Hum. Rel.	0.69	0.00	0.00	0.00	1.00	0.34	0.17	0.02	0.16	0.01
Rad. Solar	0.42	0.00	0.00	0.00	0.34	1.00	0.03	0.00	0.18	0.02
Pres. Atm.	0.35	0.03	0.02	0.03	0.17	0.03	1.00	0.00	0.05	0.01
Preci.	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
Vel. Viento	0.24	0.00	0.00	0.00	0.16	0.18	0.05	0.00	1.00	0.01
Dir. Viento	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	1.00

Se observa en la Tabla 6-2 que la temperatura presenta una correlación significativa con diversas variables, tales como humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica. Por otra parte, se observa una correlación significativa entre la humedad relativa y la radiación solar. El resto de las variables ambientales presentan una baja correlación entre sí. A continuación se explican brevemente las relaciones entre las variables mencionadas.

Relación entre Temperatura y Humedad Relativa

La humedad relativa es la variable que presenta una mayor correlación con la temperatura ($R^2=0.69$), lo cual se explica en que ambas variables ambientales se encuentran relacionadas físicamente, ya que la humedad relativa se define como la razón entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y la cantidad de vapor de agua máxima que puede contener, y sabiendo que a mayor temperatura el aire puede contener más vapor de agua, se infiere que a mayor temperatura la humedad relativa disminuye [Cengel y Boles, 2011]. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 6-8, en donde se grafica la temperatura y la humedad relativa en un periodo de 7 días, observándose que a medida que aumenta la temperatura ambiente, la humedad relativa disminuye y viceversa. Por otra parte, la humedad y la temperatura presentan una relación en su variación estacional, tal como se puede apreciar en los gráficos de la sección 3.3, en donde la humedad aumenta en invierno y disminuye en verano, inversamente a lo que sucede con la temperatura.

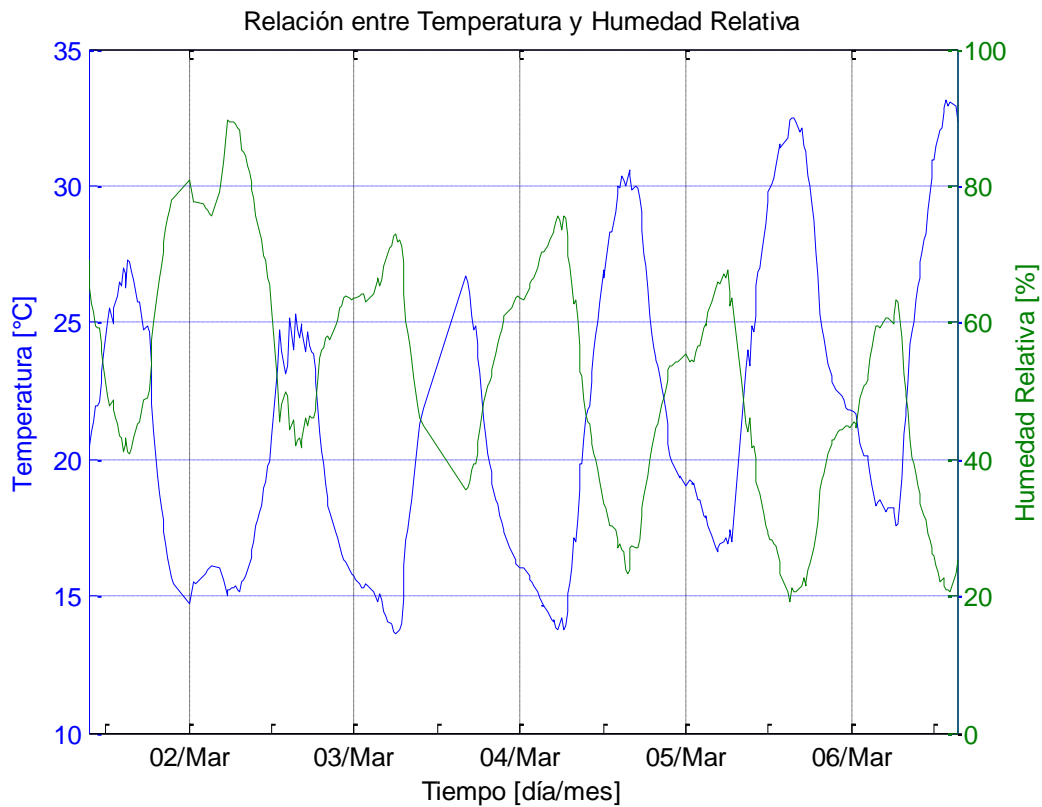


Figura 6-8: Relación entre Temperatura y Humedad Relativa

Relación entre Temperatura y Radiación Solar

La segunda variable que tiene mayor correlación con la temperatura es la radiación solar ($R^2=0.42$), cuya relación es lógica debido a la influencia del sol tanto en la temperatura como en el nivel de radiación solar. Sin embargo, en un principio la radiación solar no es un buen predictor puesto que sólo existe cuando el sol está presente, por lo que podría haber problemas de predicción cuando la radiación es cero durante la noche. Además, considerando que entrega una información muy similar a la entregada por la temperatura, tal como se ve en la Figura 6-9, se prefiere omitir como predictor.

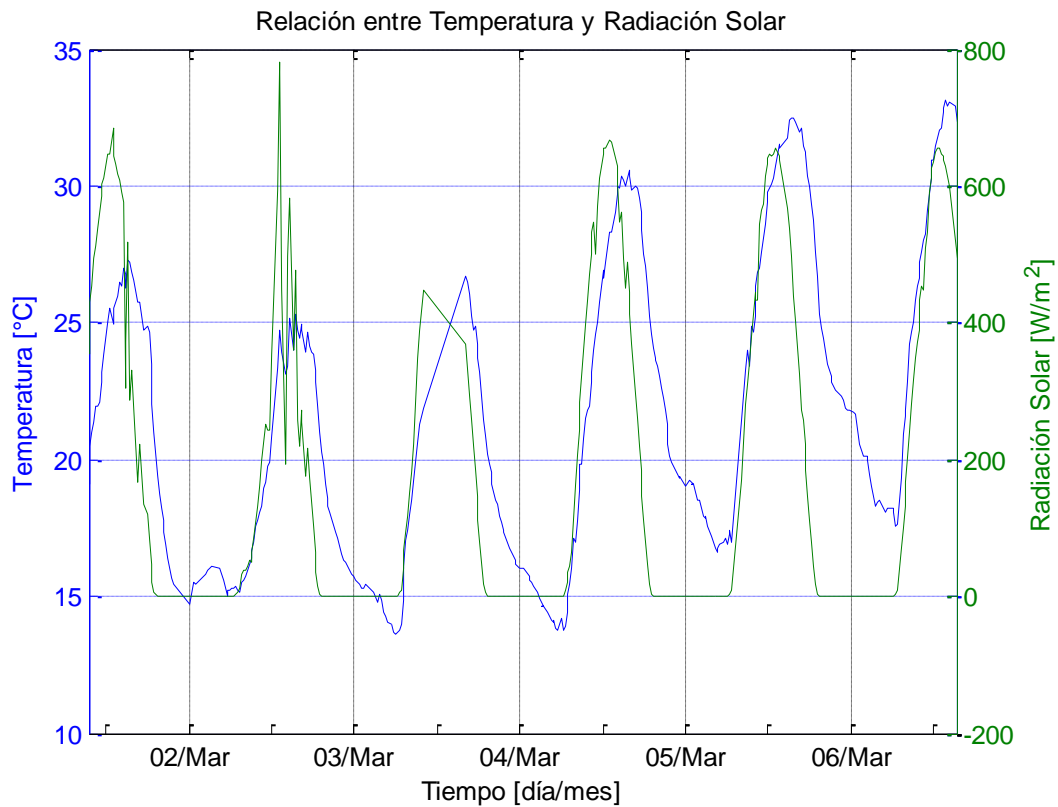


Figura 6-9: Relación entre Temperatura y Radiación Solar

Relación entre Temperatura y Presión Atmosférica

La presión atmosférica es una variable que presenta cierta correlación con la temperatura ($R^2=0.35$), puesto que su variación se ve influenciada en parte por los cambios de ésta. Cuando la superficie en donde se mide la presión se comienza a calentar, el aire que la rodea también se calienta y comienza a subir, generando una baja de presión, y viceversa cuando la temperatura de la superficie desciende. Sin embargo, las variaciones de presión se ven influenciadas por más factores atmosféricos que sólo la temperatura, por lo que su ciclo de variación no se puede explicar sólo por ésta. Lo anterior se aprecia en la Figura 6-10, en donde cada vez que exista un aumento o disminución de temperatura, la presión presenta una caída o un aumento respectivamente, pero también se observan ciclos que no tienen relación con la temperatura.

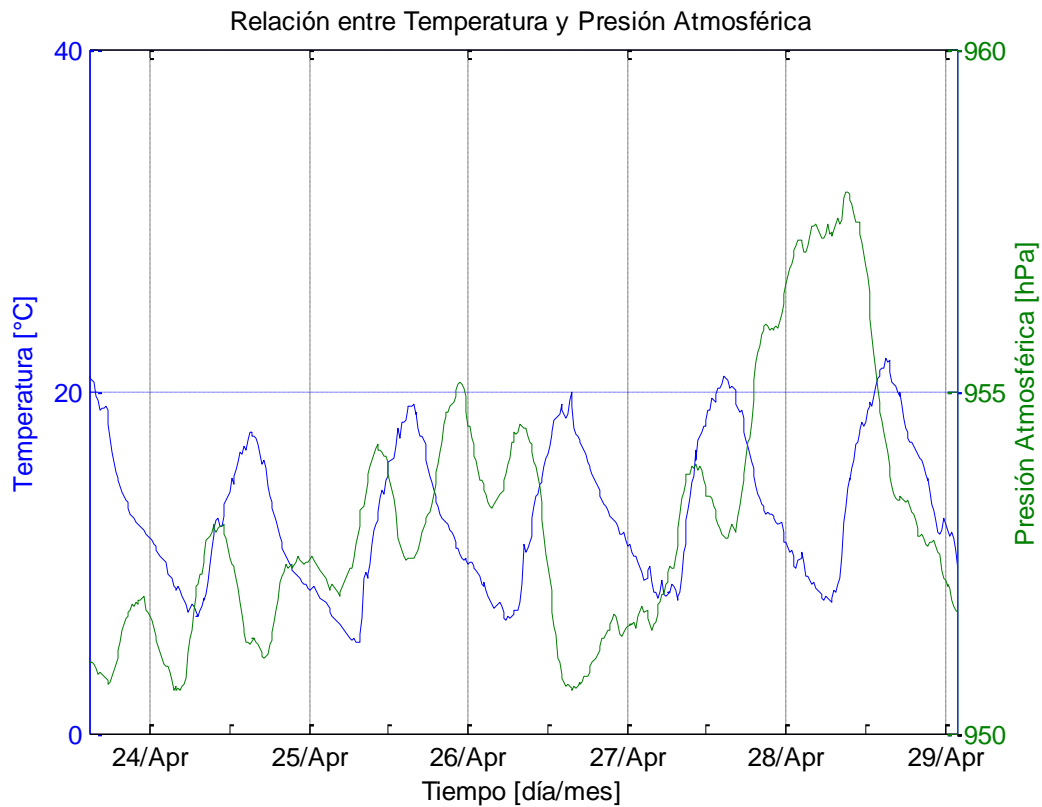


Figura 6-10: Relación entre Temperatura y Presión Atmosférica

Por otra parte, la presión y la temperatura presentan una relación en su variación estacional, tal como se puede apreciar en los gráficos de la sección 3.3, en donde la presión aumenta en invierno y disminuye en verano, inversamente a lo que sucede con la temperatura.

Relación entre Humedad Relativa y Radiación Solar

La correlación entre la humedad relativa y la radiación solar ($R^2=0.34$) se explica debido a la relación directa que existe entre la radiación y la temperatura, y la influencia que tiene la temperatura en la humedad relativa. Esto se puede observar en la Figura 6-11 en donde para un aumento de radiación solar existe una disminución de la humedad relativa, y viceversa.

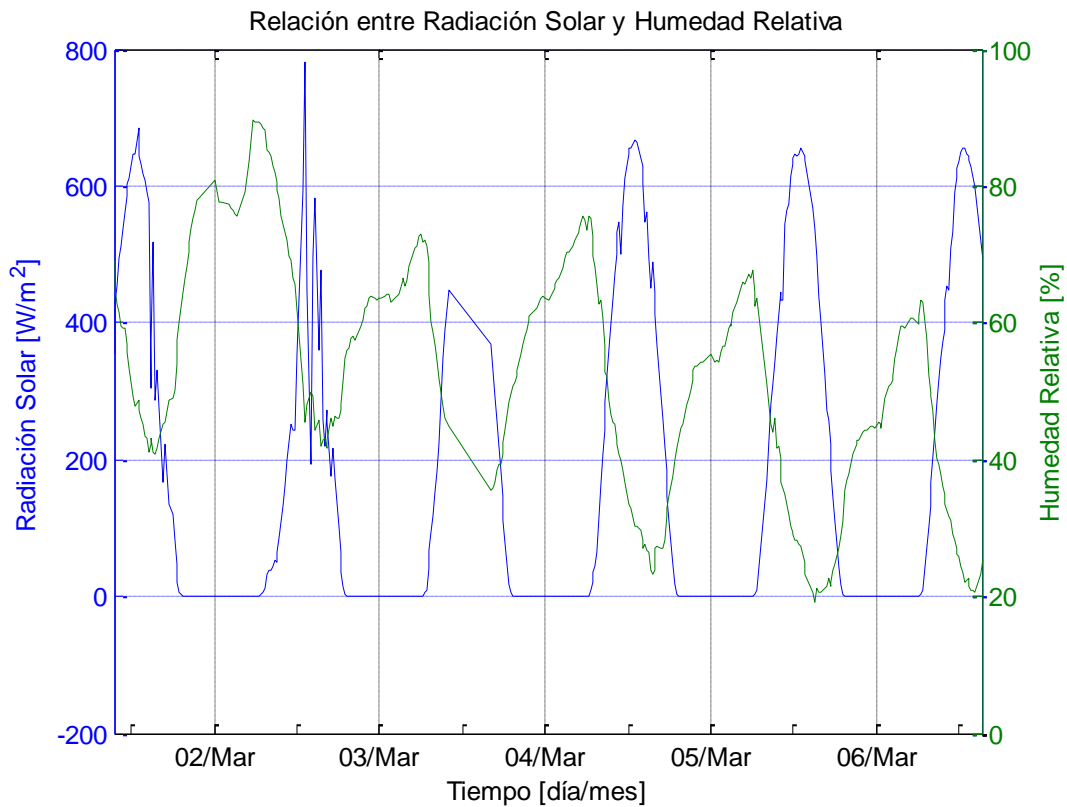


Figura 6-11: Relación entre Radiación Solar y Humedad Relativa.

Relación entre Precipitación y Saturación del Suelo

A pesar de que la correlación entre la precipitación y la saturación del suelo a 10 m es muy bajo ($R^2=0.02$), si se analizan visualmente los datos, se encuentra que hay una relación entre la existencia de precipitaciones y el posterior aumento de la saturación del suelo, lo cual se puede apreciar en la Figura 6-12 para algunos eventos de precipitación, debido a la acumulación de agua en el suelo de fundación de la estructura. El retraso entre un evento de lluvia y la máxima saturación del suelo a 10 m es aproximadamente 1 día.

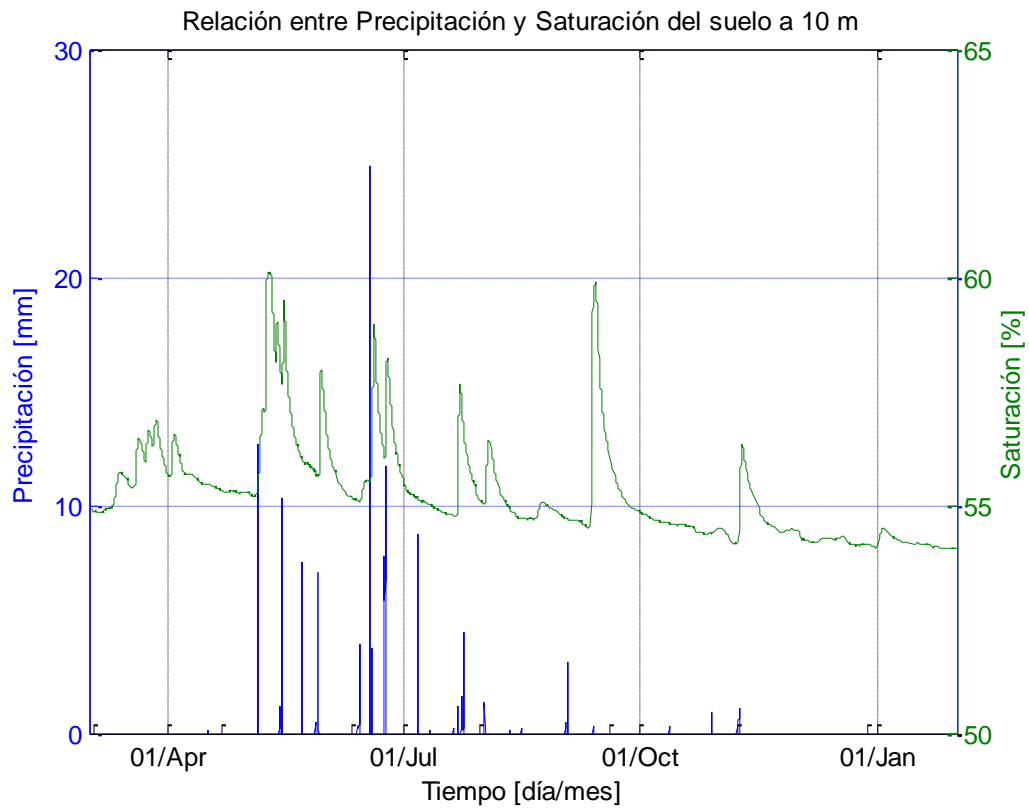


Figura 6-12: Relación entre Precipitación y Saturación del suelo a 10 m

Si se realiza el mismo análisis para la saturación del suelo a 20 m (Figura 6-13), se observa que no existe la misma relación anterior, ya que la saturación se mantiene relativamente constante durante todo el periodo, salvo aumentos puntuales de saturación que se deben probablemente a errores instrumentales.

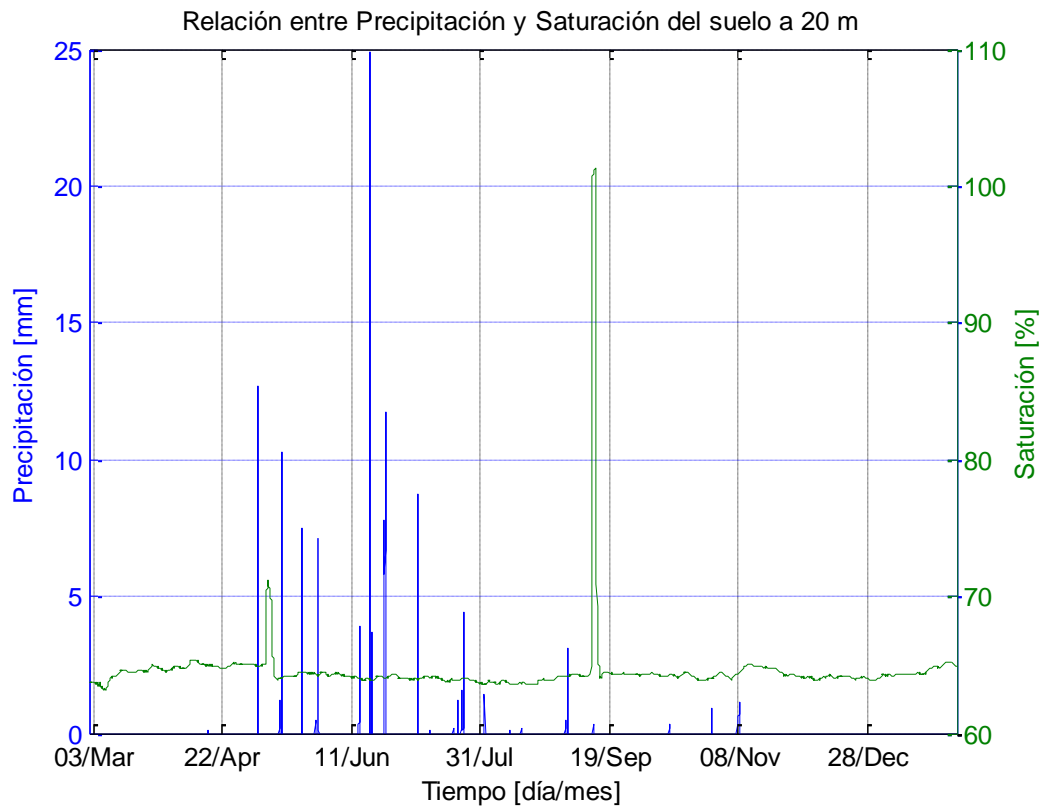


Figura 6-13: Relación entre Precipitación y Saturación del suelo a 20 m

En la Figura 6-14 se adjunta un gráfico de trellis entre las distintas variables ambientales, para poder visualizar la relación que existe entre éstas de manera más gráfica. Se observan claramente las relaciones entre la temperatura y la humedad relativa, la presión atmosférica o la radiación solar, así como entre la humedad relativa y la radiación solar. Por otro lado, se puede apreciar la baja relación que tiene la velocidad y dirección del viento con el resto de las variables ambientales.

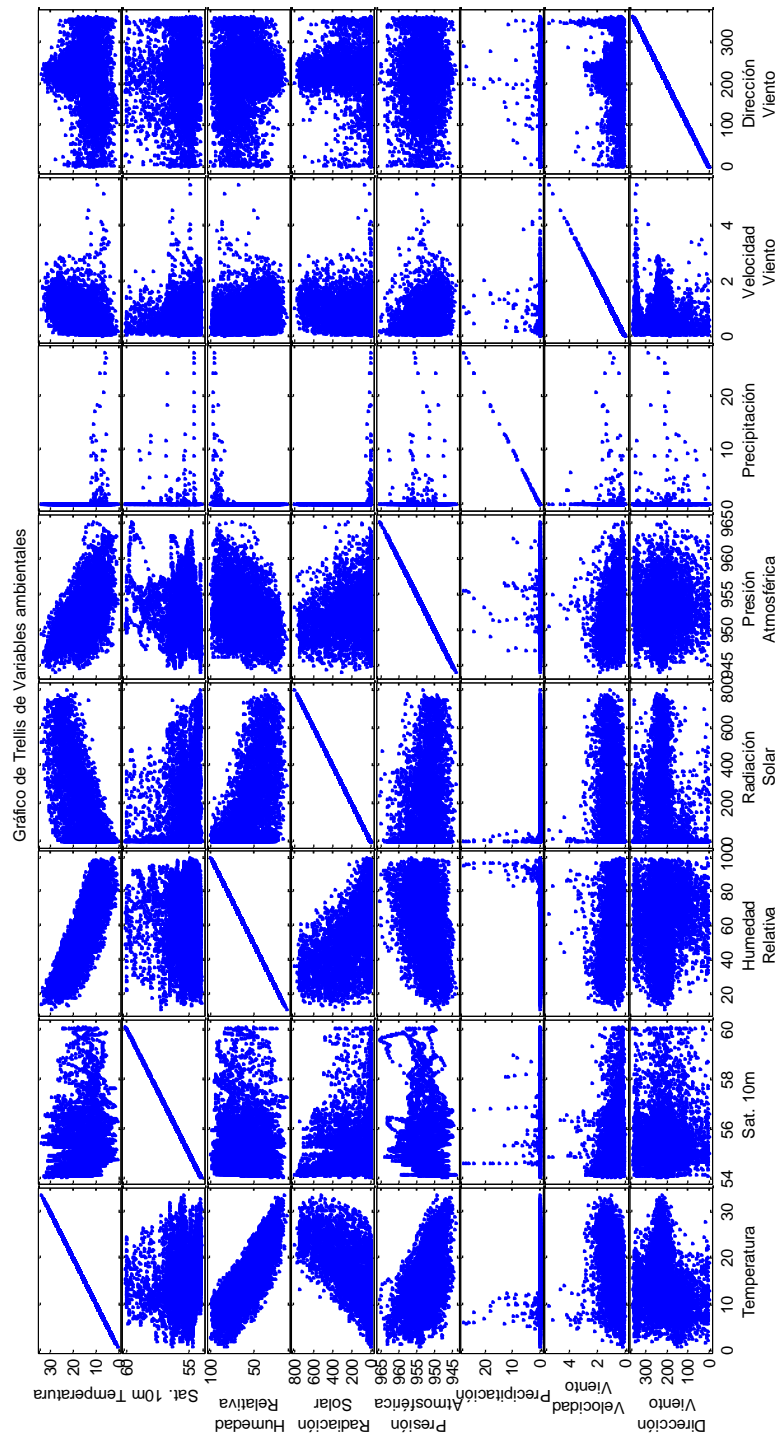


Figura 6-14: Gráfico de Trelis - Variables ambientales

6.2.2. Correlación entre variables ambientales y frecuencias

Se estudian las correlaciones entre variables ambientales y frecuencias características de la Torre Central para antes y después del 27F. Este análisis se realiza mediante el cálculo del coeficiente de correlación y de determinación definidos en 2.1.1. Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 6-3 y Tabla 6-4.

Tabla 6-3: Factores de correlación. Datos pre 27F

	f ₁		f ₂		f ₃	
	R	R ²	R	R ²	R	R ²
Temperatura	-0.76	0.57	-0.49	0.24	-0.62	0.38
Saturación a 5 m	0.83	0.69	0.76	0.57	0.84	0.70
Saturación a 10 m	0.54	0.30	0.47	0.22	0.54	0.29
Saturación a 20 m	0.41	0.17	0.34	0.12	0.42	0.17
Humedad relativa	0.68	0.46	0.42	0.18	0.50	0.25
Radiación Solar	-0.34	0.12	-0.35	0.12	-0.47	0.22
Presión atmosférica	0.64	0.41	0.43	0.18	0.50	0.25
Precipitación	0.16	0.02	0.12	0.01	0.11	0.01
Velocidad Viento	-0.38	0.15	-0.25	0.06	-0.31	0.09
Dirección Viento	-0.16	0.03	-0.15	0.02	-0.17	0.03

Tabla 6-4: Factores de correlación. Datos pos 27F

	f ₁		f ₂		f ₃	
	R	R ²	R	R ²	R	R ²
Temperatura	-0.59	0.35	-0.44	0.19	-0.41	0.17
Saturación a 5 m	0.38	0.14	0.40	0.16	0.34	0.12
Saturación a 10 m	-0.09	0.01	-0.25	0.06	-0.25	0.06
Saturación a 20 m	-0.05	0.00	-0.19	0.04	-0.18	0.03
Humedad relativa	0.38	0.14	0.22	0.05	0.17	0.03
Radiación Solar	-0.20	0.04	-0.28	0.08	-0.32	0.10
Presión atmosférica	0.54	0.29	0.44	0.19	0.45	0.20
Precipitación	0.08	0.01	0.07	0.01	0.06	0.00
Velocidad Viento	-0.22	0.05	-0.17	0.03	-0.10	0.01
Dirección Viento	-0.08	0.01	-0.10	0.01	-0.10	0.01

En primer lugar, se observa que en general los factores de correlación del caso pre 27F son mayores a los del caso pos 27F, lo que se puede explicar en que hay menos datos antes del terremoto lo que permite generar un mejor ajuste entre las

variables ambientales y las frecuencias, dada la menor existencia de errores de identificación y la menor variación estacional de las frecuencias.

Por otra parte, se observa que los mayores factores de correlación están relacionados a la temperatura (a excepción del caso pos 27F para la frecuencia 3, en donde el mayor factor de correlación está relacionado a la presión atmosférica), lo cual se explica debido a que la mayor variación de las frecuencias es debido a la variación de la temperatura, y por ende estas variables están altamente correlacionadas.

Después de la temperatura, la presión atmosférica es la variable ambiental que presenta la mayor correlación con las frecuencias características de la estructura. Esto se puede explicar debido a la relación física que existe entre las variaciones de temperatura y las variaciones de presión atmosférica, tal como se explicó en 6.2.1, lo que produce que la variación de estas variables se produzca de manera conjunta. No se tiene registro de investigaciones que planteen que las variaciones de presión atmosférica modifiquen a la estructura de tal manera que ésta cambie sus propiedades dinámicas, por lo que la correlación de la presión atmosférica y las frecuencias se sustentan en su nexos con la temperatura.

Finalmente, se observa que hay dos variables ambientales que presentan una correlación menor, pero comparativamente considerable en relación al resto de variables ambientales, y son la humedad relativa y la radiación solar. En el caso de la humedad relativa, ésta variable presenta una correlación considerable con la frecuencia 1, mientras que su correlación es menor con las frecuencias 2 y 3. En tanto que la radiación solar presenta una correlación significativa con las frecuencias 2 y 3.

A continuación se grafican las relaciones entre las frecuencias y las variables ambientales relevantes para explicar y/o modelar los cambios en las frecuencias. Las variables ambientales seleccionadas son: Temperatura, Presión Atmosférica, Humedad Relativa y Radiación Solar. Se ha seleccionado un espacio temporal de 7 días, del 24 al 31 de mayo del 2011, en un periodo en que no se registró lluvias durante todo el mes.

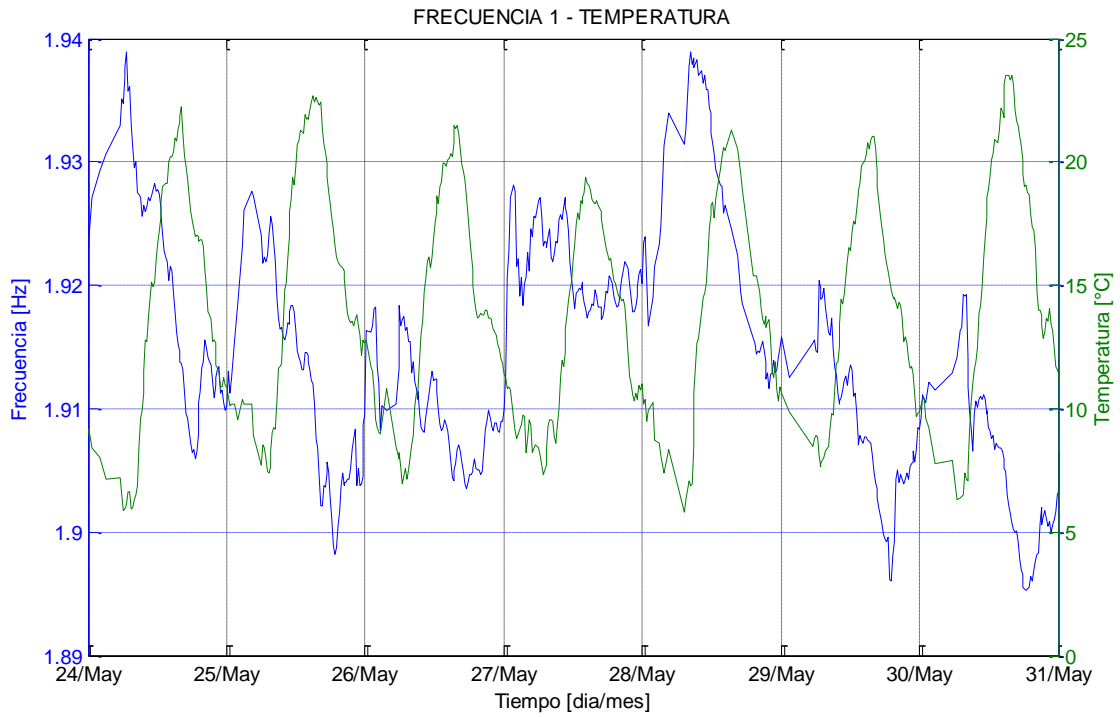


Figura 6-15: Relación entre Frecuencia 1 y Temperatura

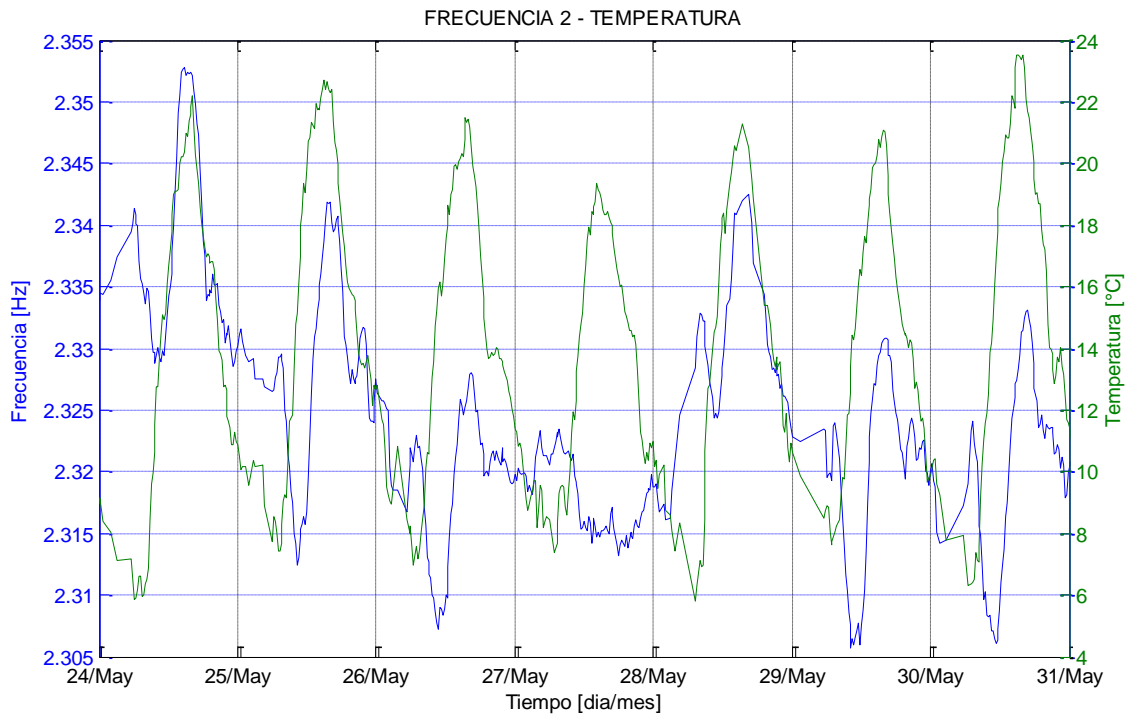


Figura 6-16: Relación entre Frecuencia 2 y Temperatura

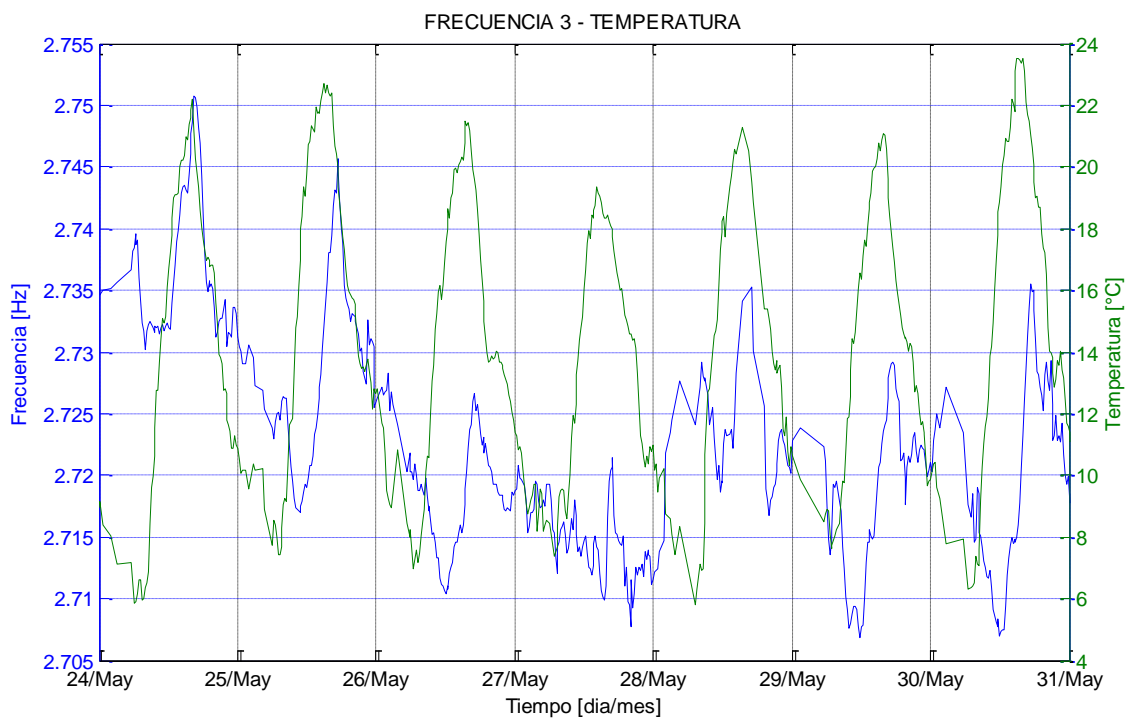


Figura 6-17: Relación entre Frecuencia 3 y Temperatura

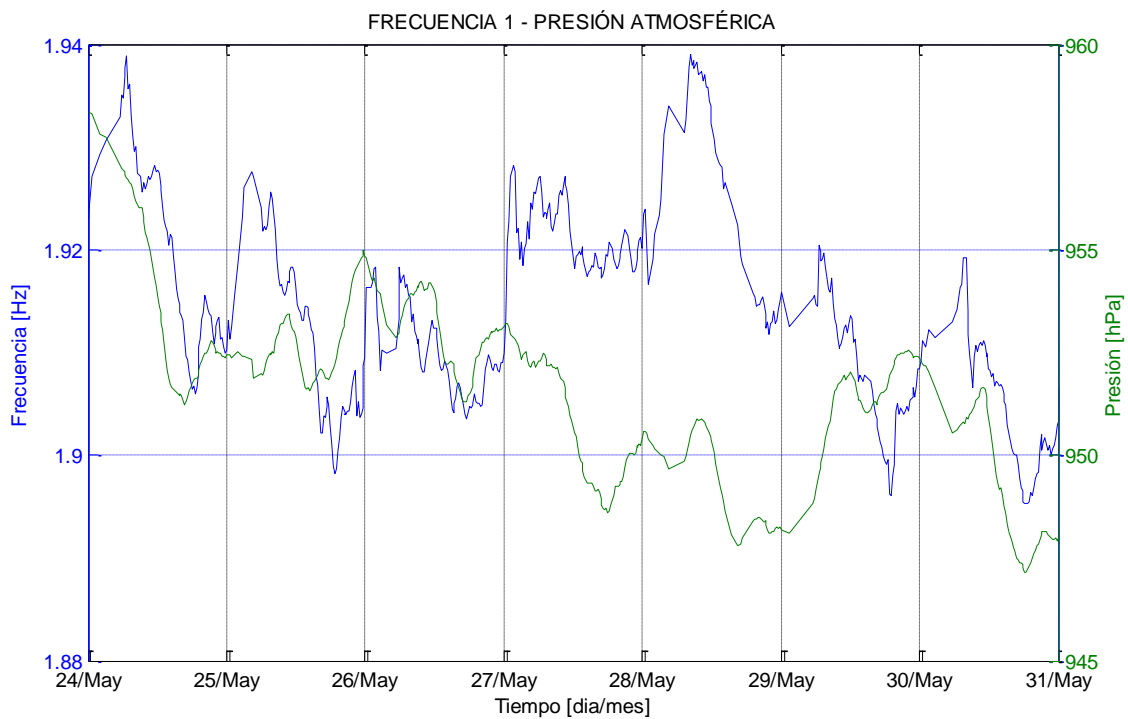


Figura 6-18: Relación entre Frecuencia 1 y Presión Atmosférica

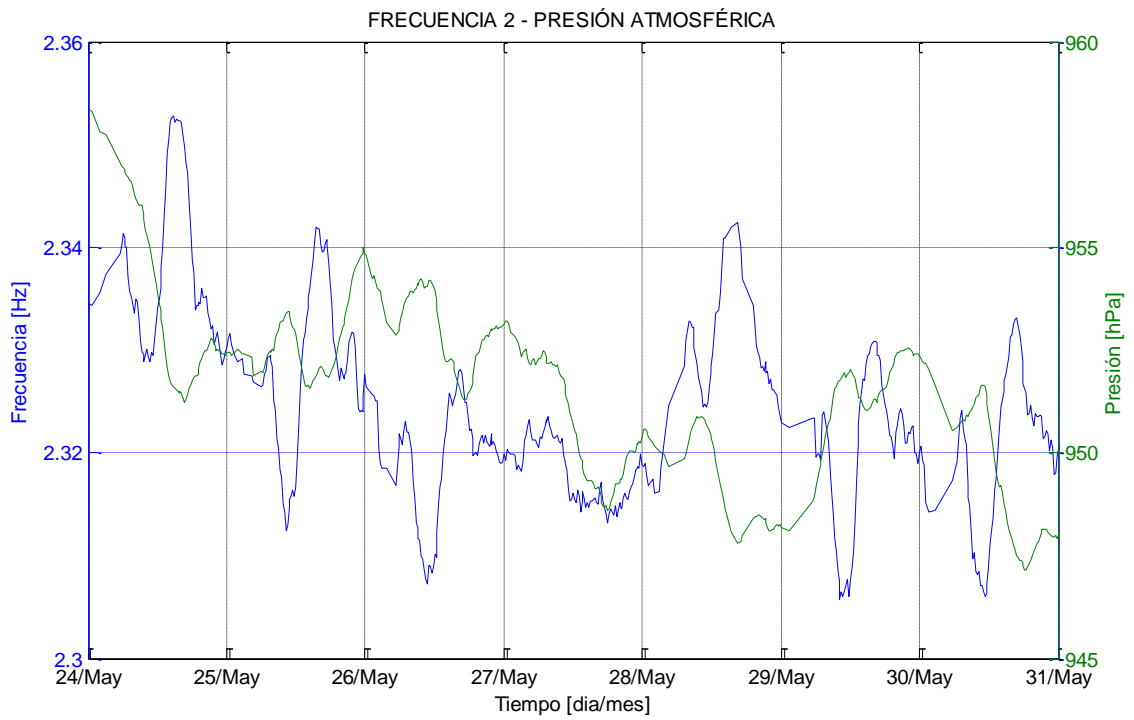


Figura 6-19: Relación entre Frecuencia 2 y Presión Atmosférica

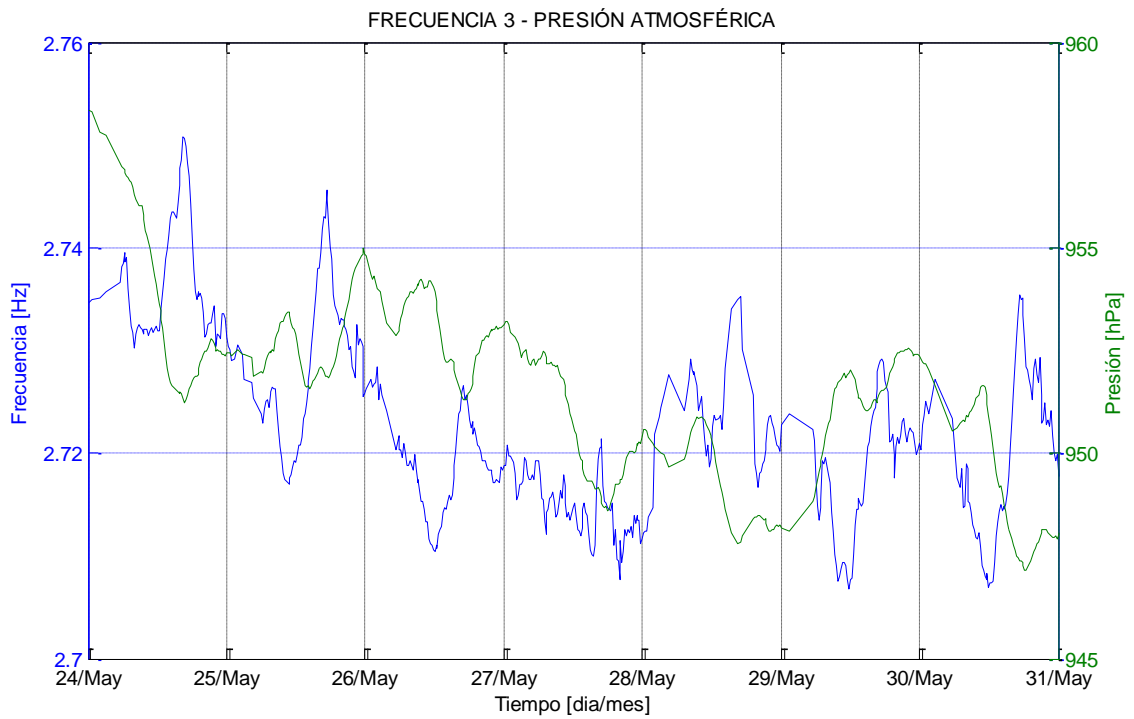


Figura 6-20: Relación entre Frecuencia 3 y Presión Atmosférica

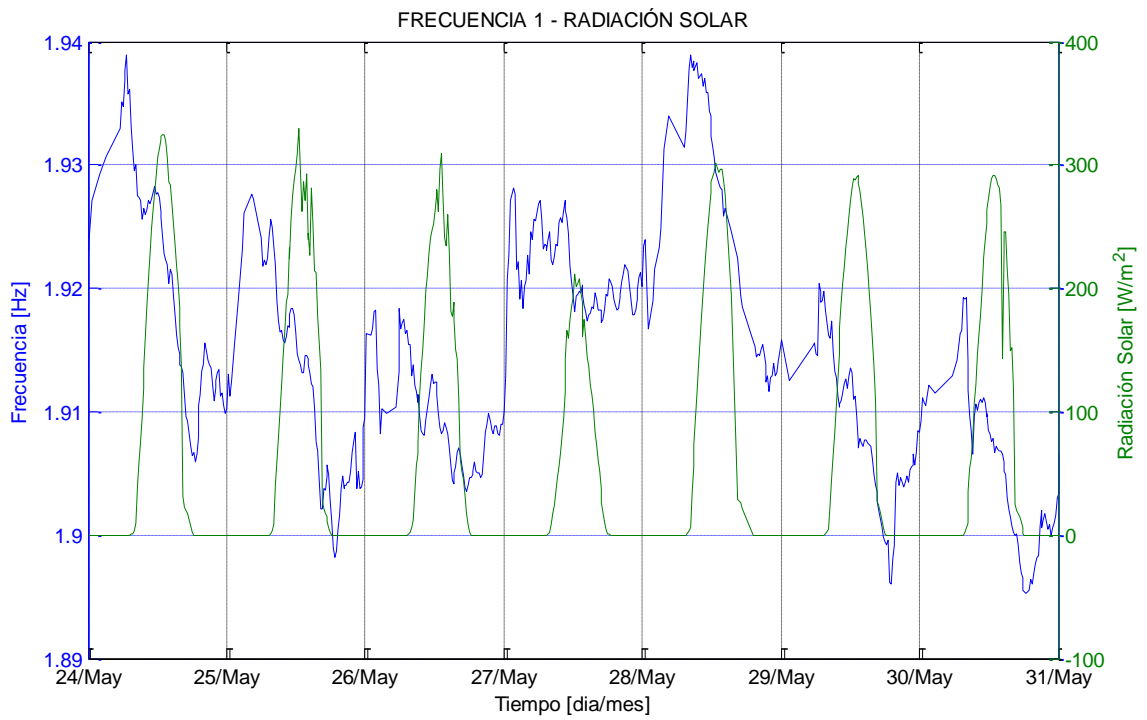


Figura 6-21: Relación entre Frecuencia 1 y Radiación Solar

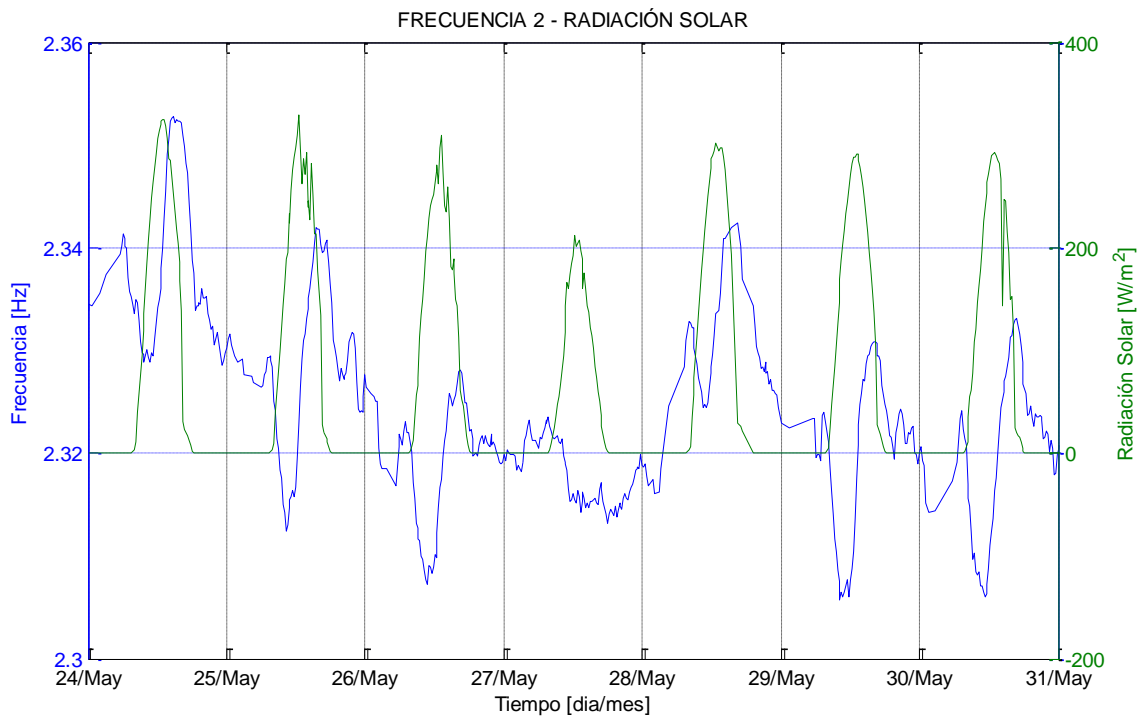


Figura 6-22: Relación entre Frecuencia 2 y Radiación Solar

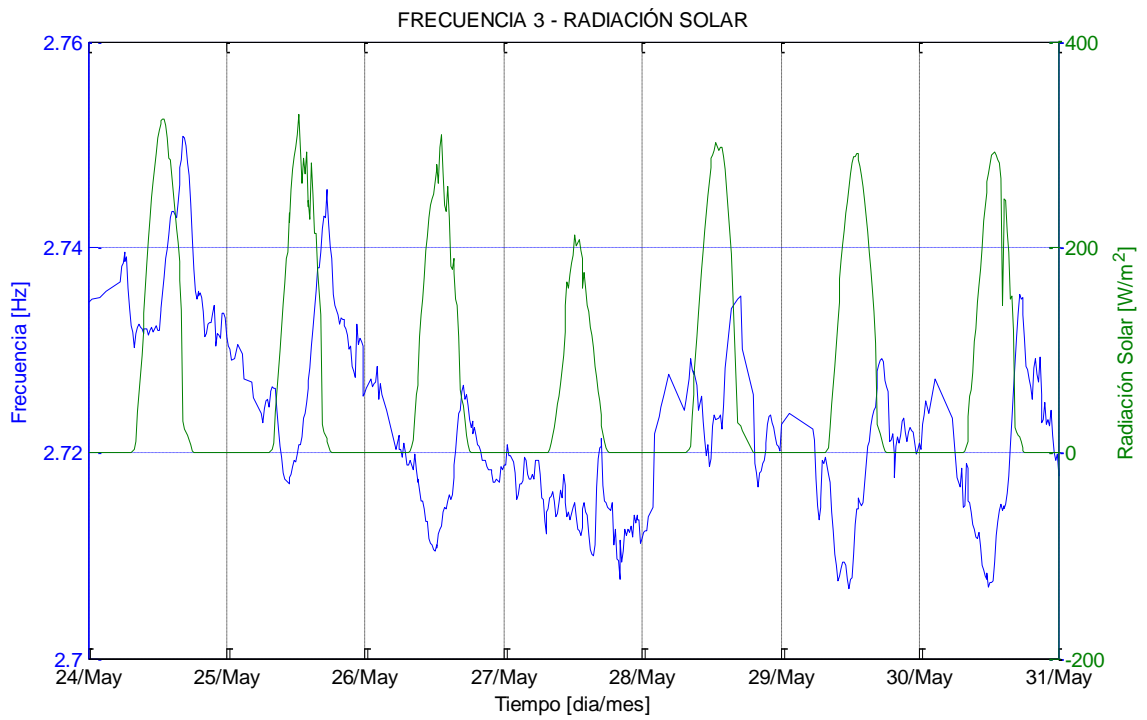


Figura 6-23: Relación entre Frecuencia 3 y Radiación Solar

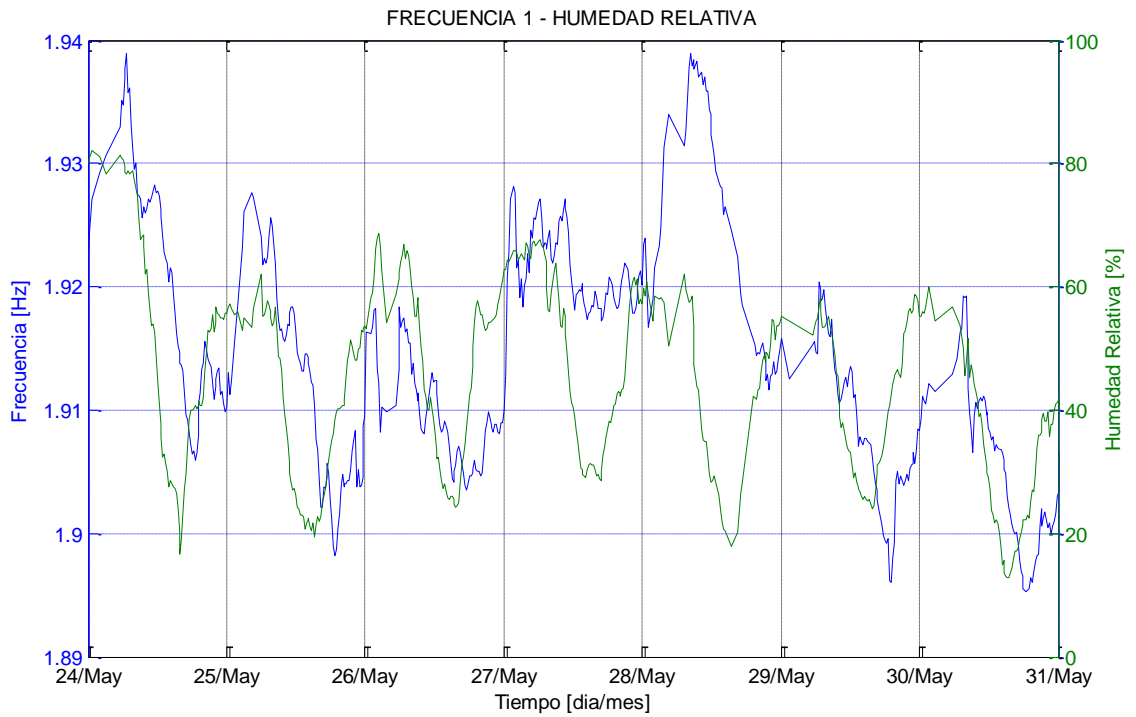


Figura 6-24: Relación entre Frecuencia 1 y Humedad Relativa

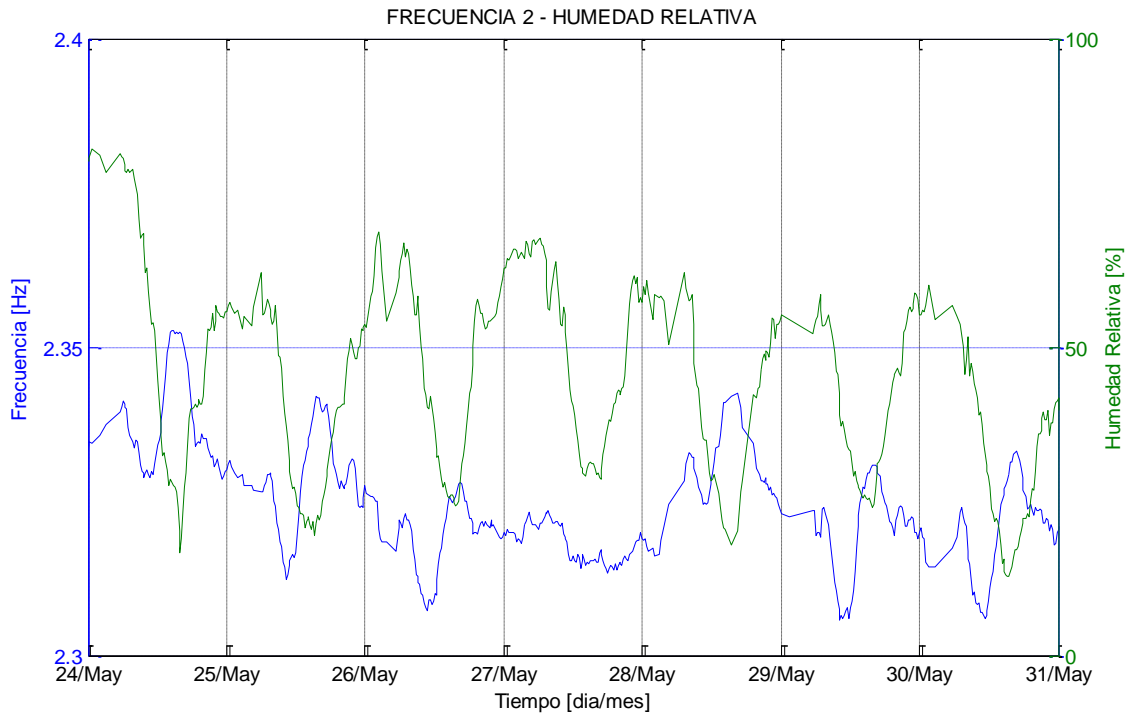


Figura 6-25: Relación entre Frecuencia 2 y Humedad Relativa

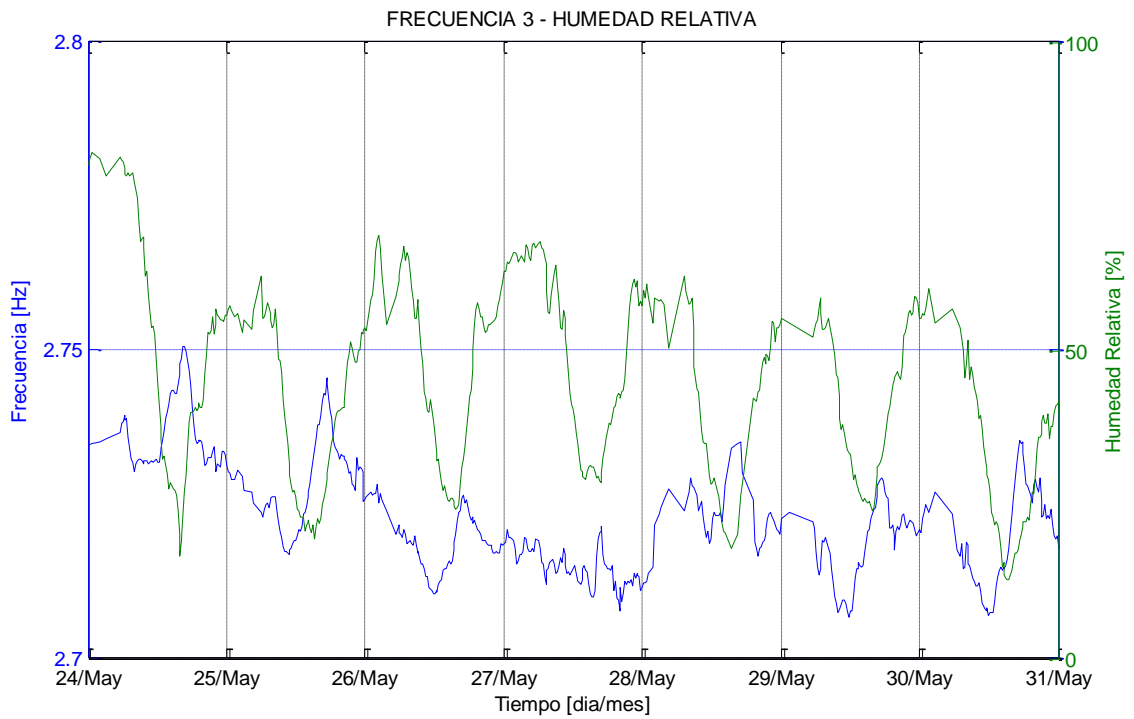


Figura 6-26: Relación entre Frecuencia 3 y Humedad Relativa

Por otra parte, se estudia el comportamiento que tienen las frecuencias características ante la existencia de precipitaciones, efecto reflejado en la saturación del suelo. A continuación se grafican las frecuencias en conjunto con la saturación a 10 m de profundidad, para un periodo de 6 meses, desde marzo a agosto de 2010. En estos gráficos se puede observar que existen variaciones importantes en las frecuencias atribuibles a los cambios en la saturación del suelo. Por ejemplo, en la Figura 6-27, se encierran en círculos las variaciones posiblemente atribuibles a variaciones de la saturación del suelo. En el círculo 1 las frecuencias tienden a bajar, mientras que en los círculos 2 y 3 las frecuencias tienden a subir.

En [Verdugo, 2009] se determina experimentalmente que al aumentar la saturación del suelo de fundación de una estructura, éste se rigidiza debido al efecto de capilaridad, y que si la saturación sigue aumentando, las frecuencias disminuyen debido a la disminución de dicho efecto. Lo anterior es consistente con lo que se observa en los gráficos de frecuencia y saturación, ya que para el caso encerrado en el círculo 1, las frecuencias bajan en respuesta a una saturación del suelo superior a los casos 2 y 3, en donde la saturación del suelo es menor, por lo que las frecuencias características aumentan.

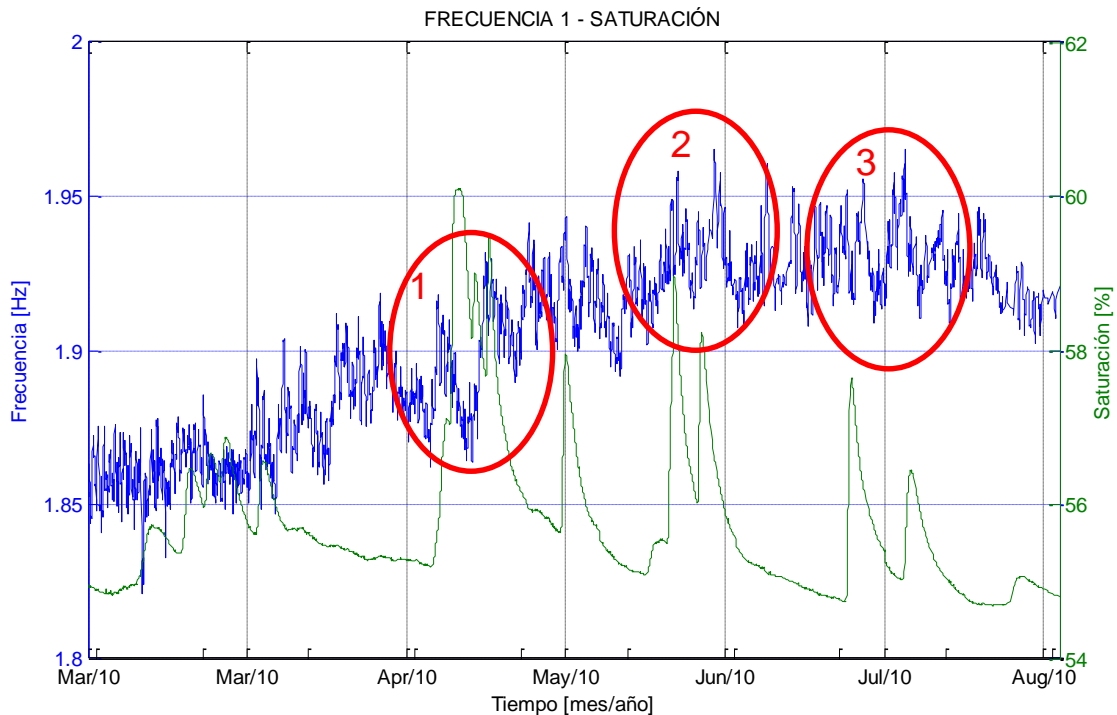


Figura 6-27: Relación entre Frecuencia 1 y Saturación del suelo a 10 m

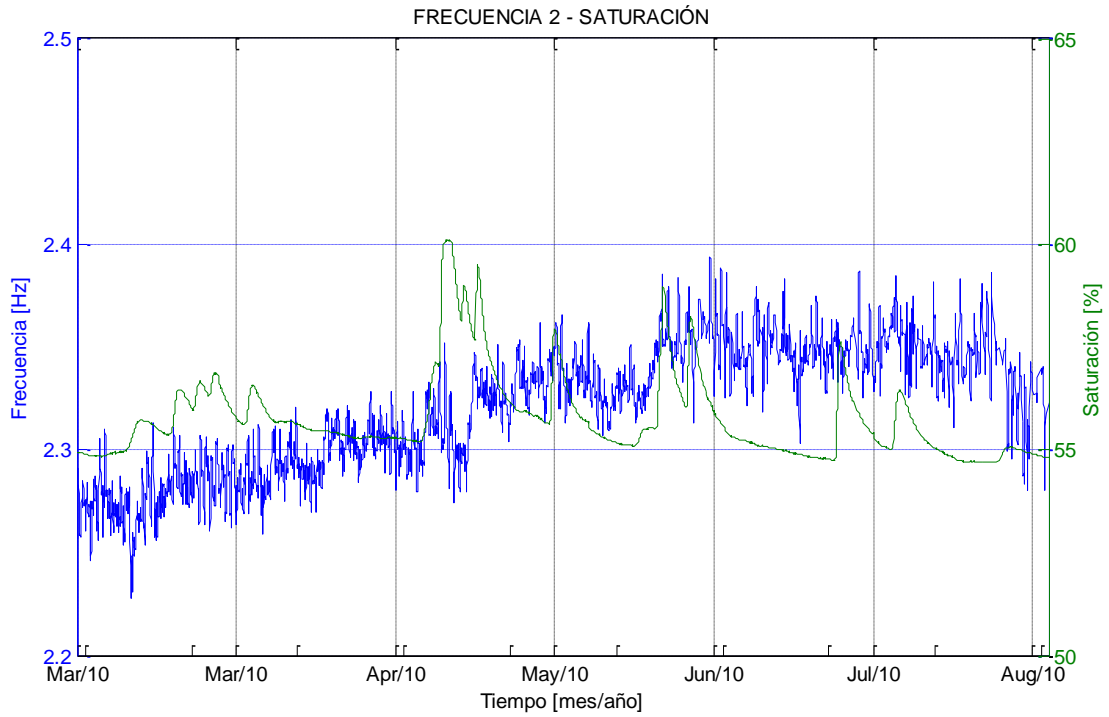


Figura 6-28: Relación entre Frecuencia 2 y Saturación del suelo a 10 m

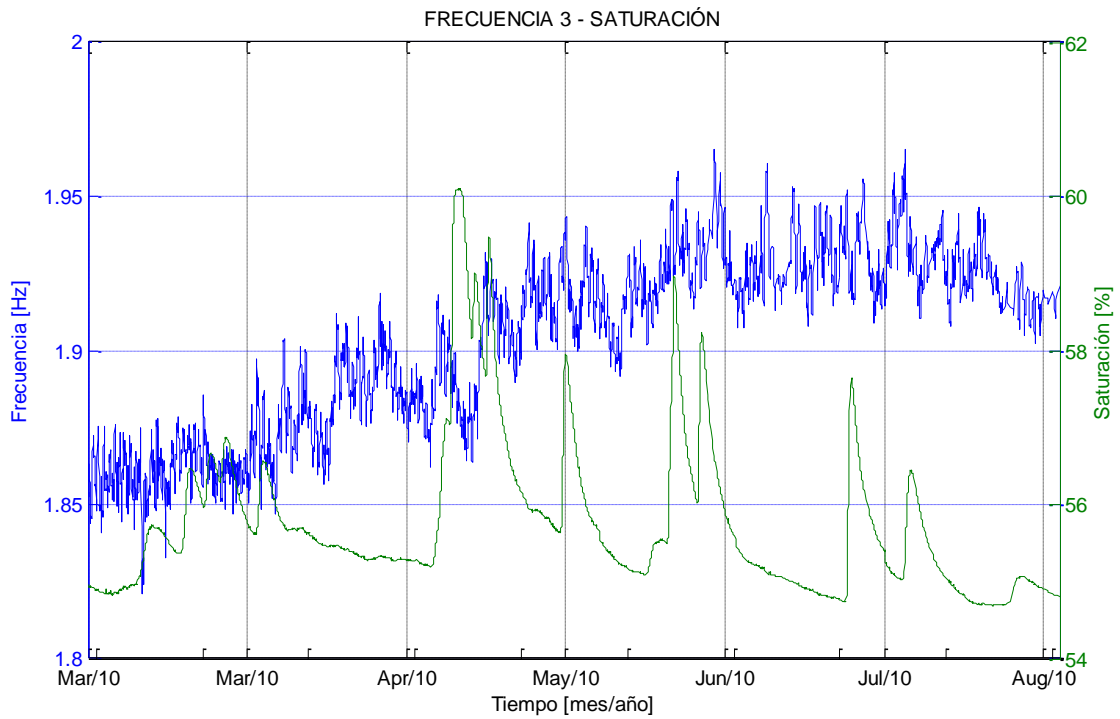


Figura 6-29: Relación entre Frecuencia 3 y Saturación del suelo a 10 m

Además, se estudia cómo varían las frecuencias en función de las variables ambientales mes a mes, tal como se muestra a continuación. Para este análisis se utilizaron todos los datos disponibles entre Marzo de 2010 y Enero de 2011.

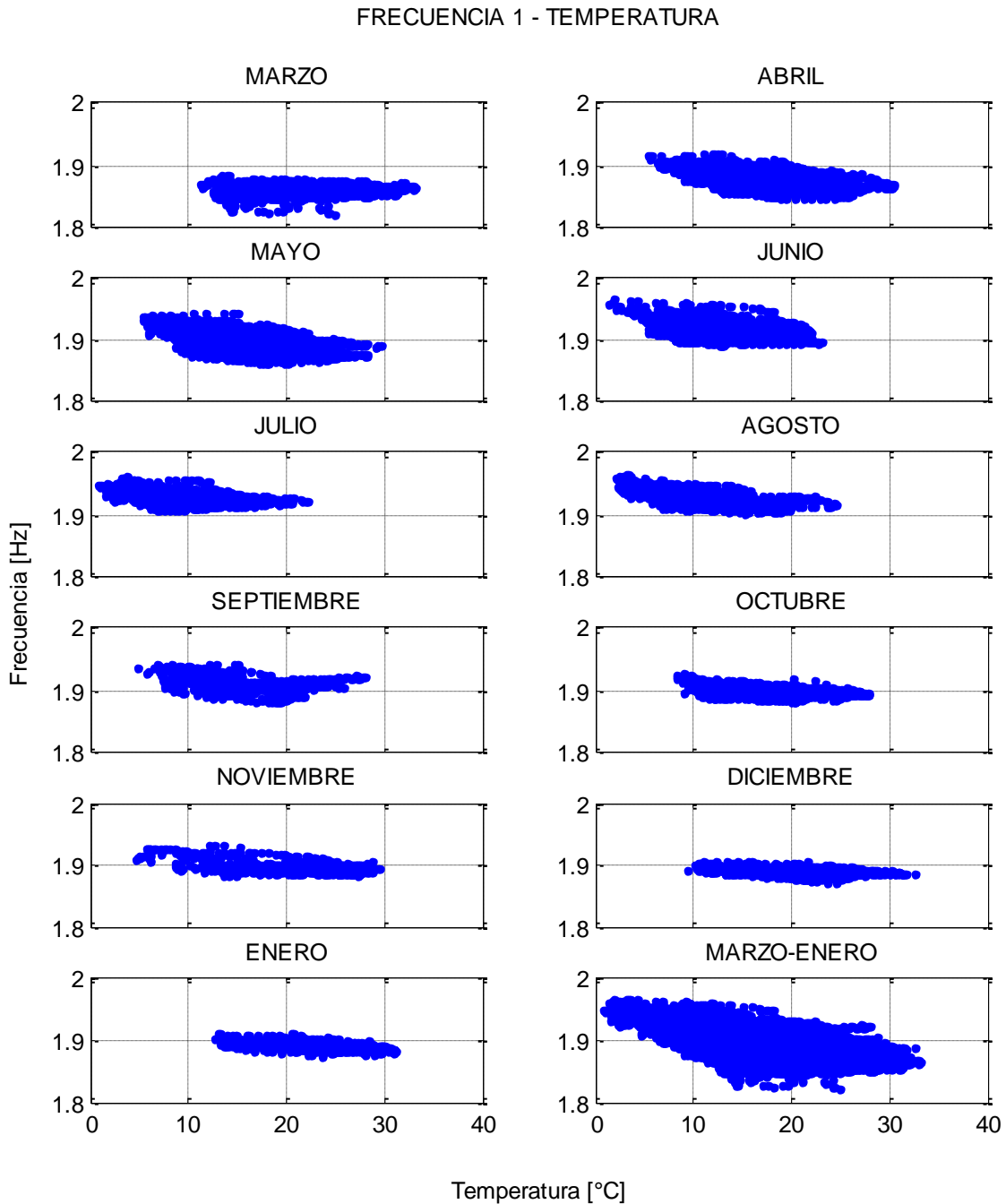


Figura 6-30: Relación entre Frecuencia 1 y Temperatura. Análisis mensual.

FRECUENCIA 2 - TEMPERATURA

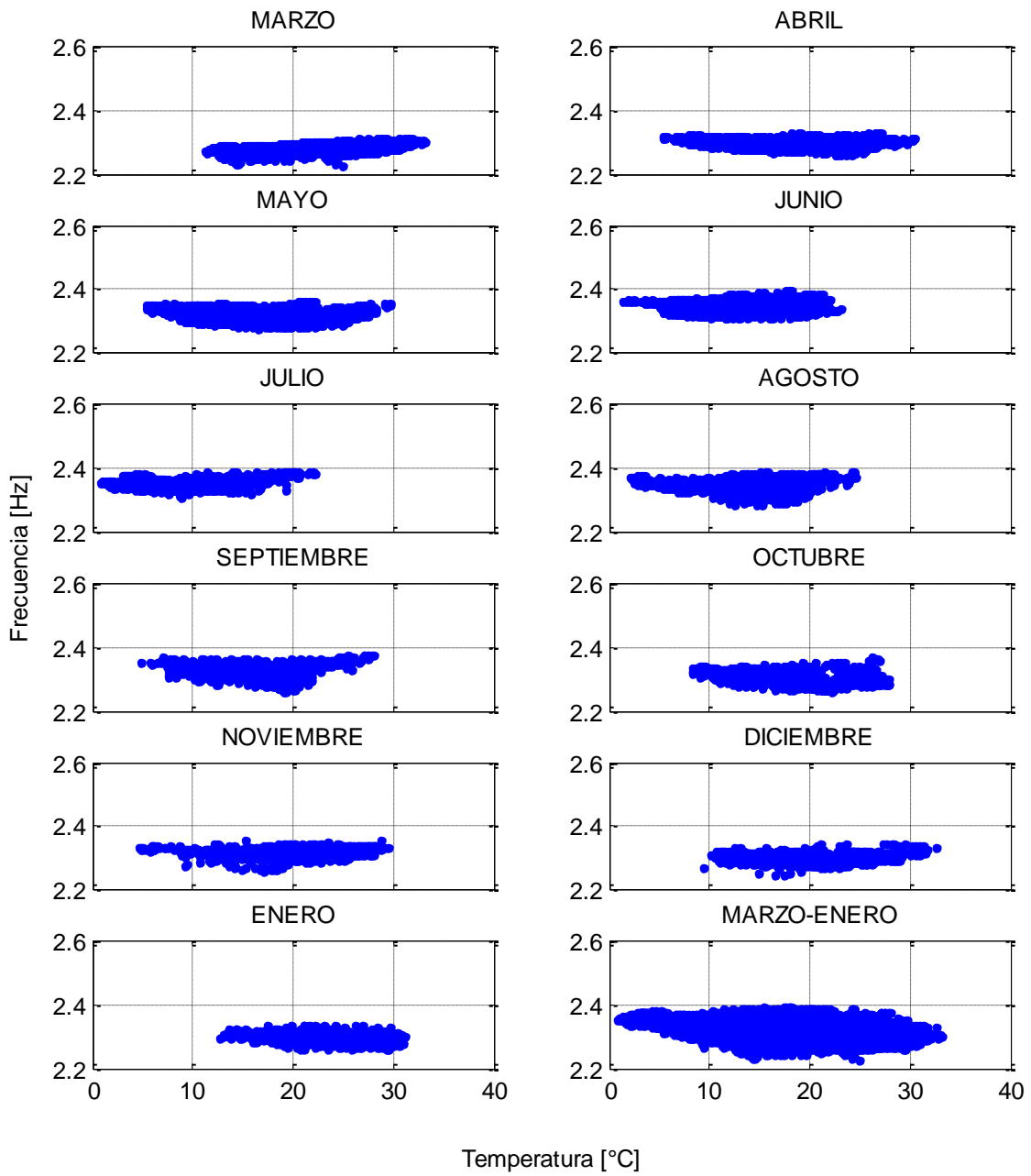


Figura 6-31: Relación entre Frecuencia 2 y Temperatura. Análisis mensual.

FRECUENCIA 3 - TEMPERATURA

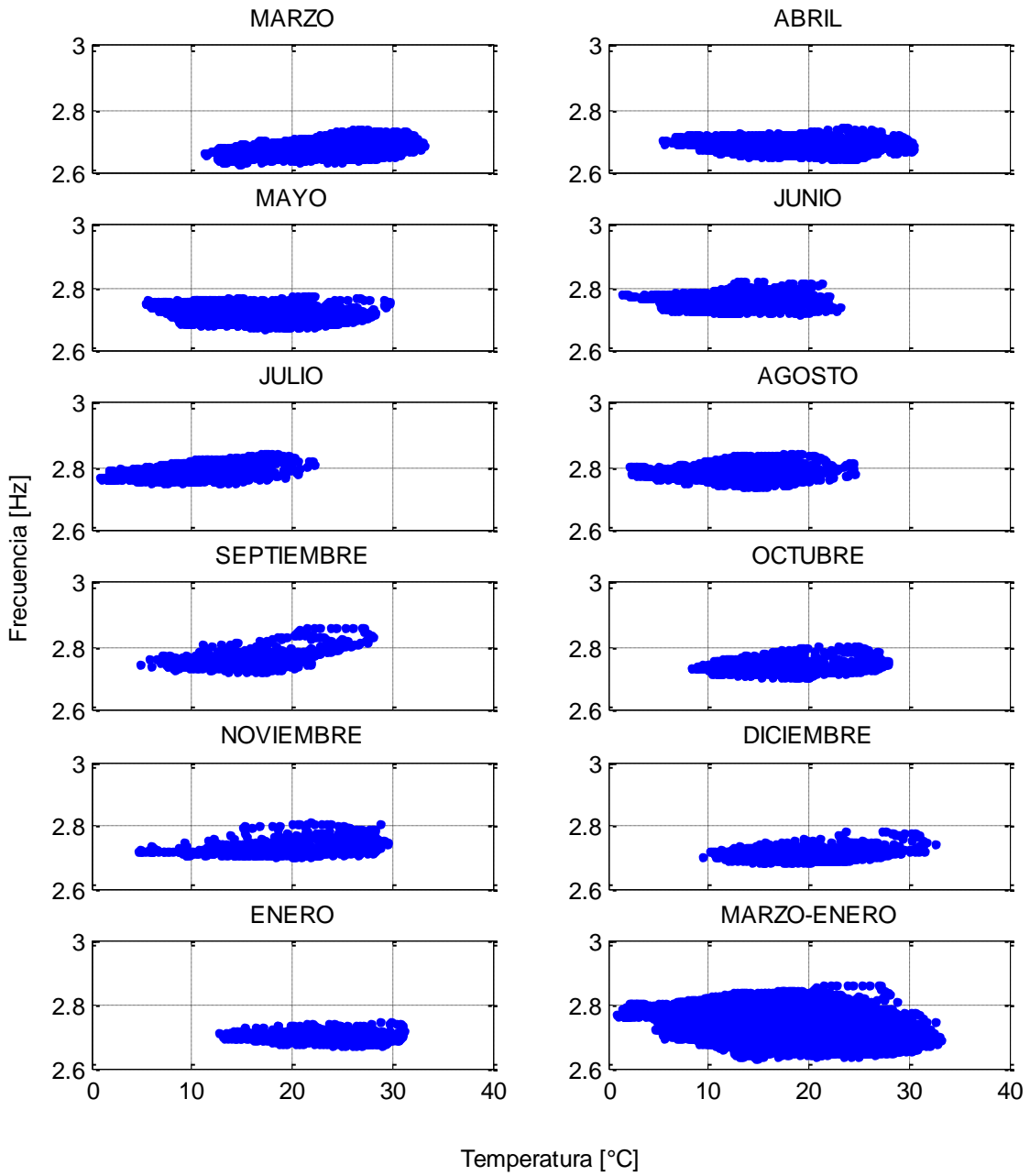


Figura 6-32: Relación entre Frecuencia 3 y Temperatura. Análisis mensual.

FRECUENCIA 1 - HUMEDAD RELATIVA

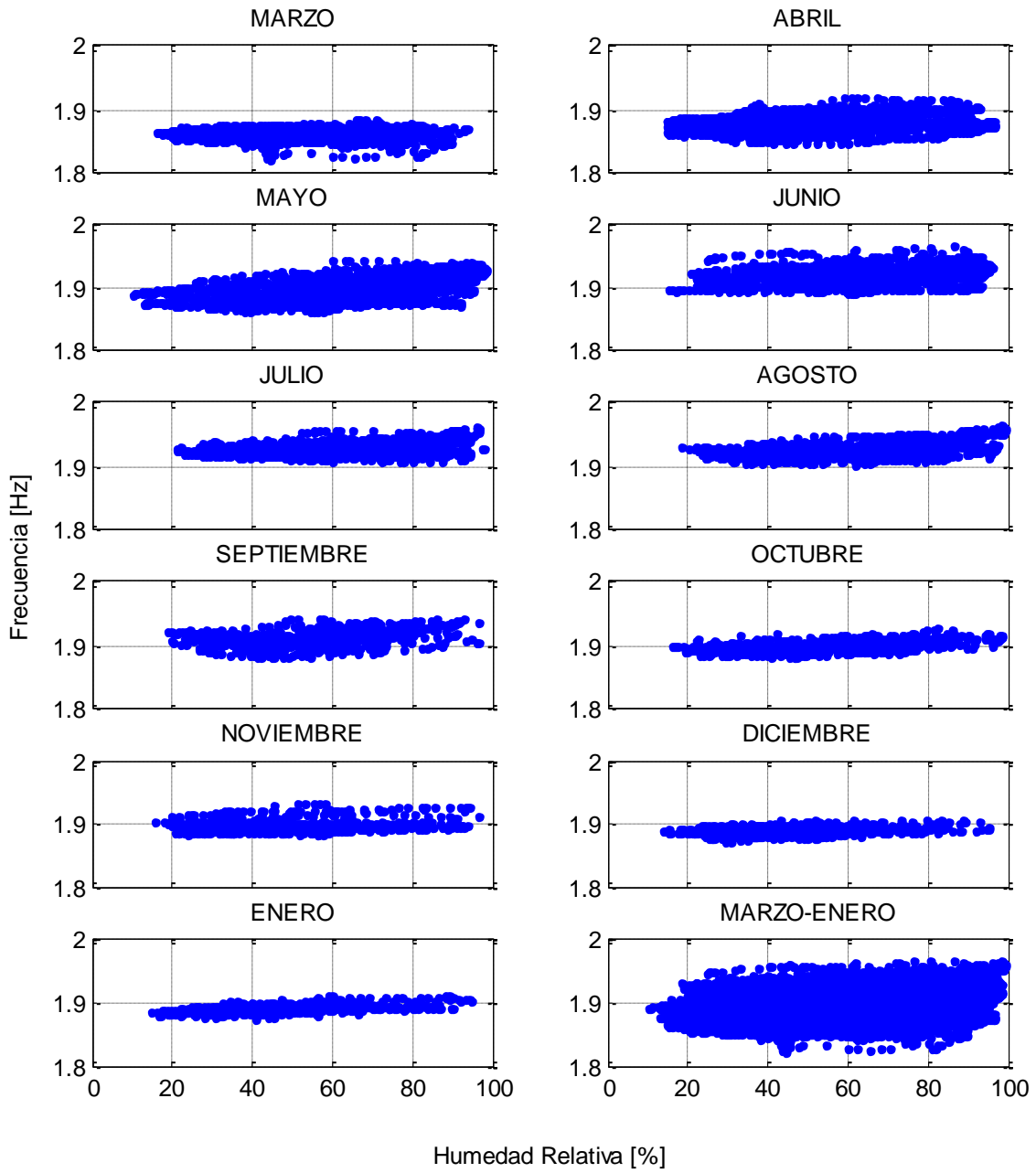


Figura 6-33: Relación entre Frecuencia 1 y Humedad Relativa. Análisis mensual.

FRECUENCIA 2 - HUMEDAD RELATIVA

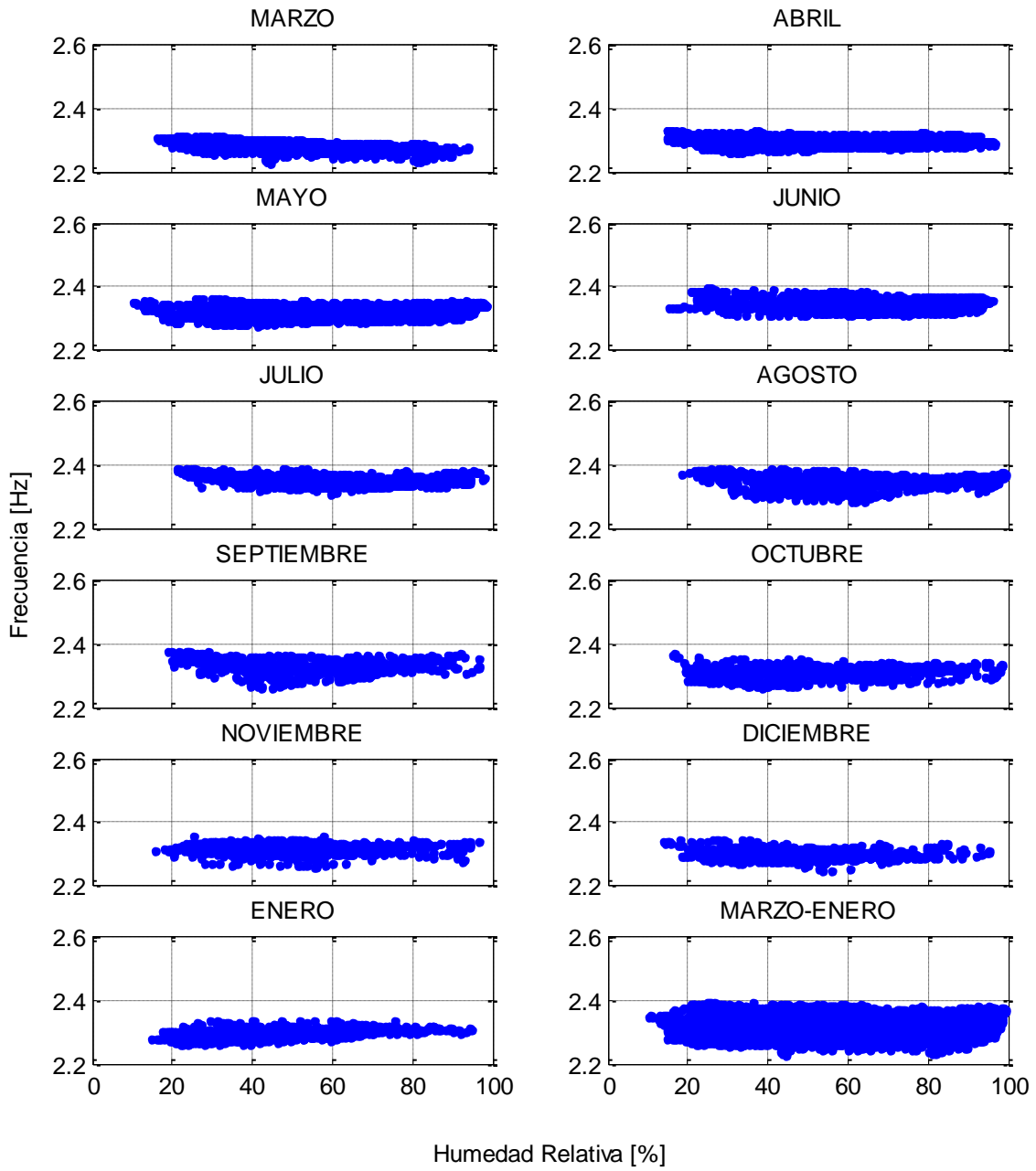


Figura 6-34: Relación entre Frecuencia 2 y Humedad Relativa. Análisis mensual.

FRECUENCIA 3 - HUMEDAD RELATIVA

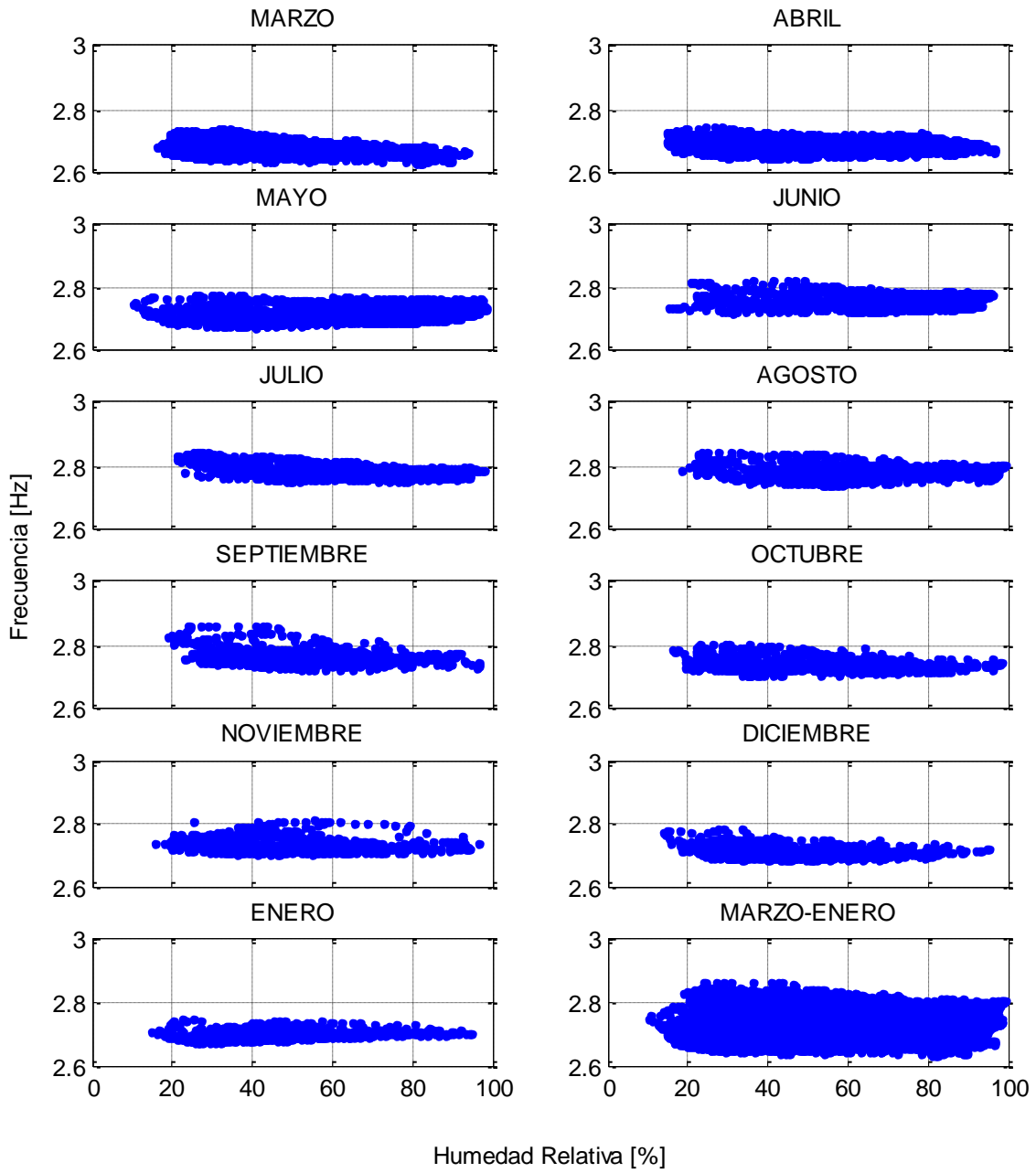


Figura 6-35: Relación entre Frecuencia 3 y Humedad Relativa. Análisis mensual.

FRECUENCIA 1 - PRESIÓN ATMOSFÉRICA

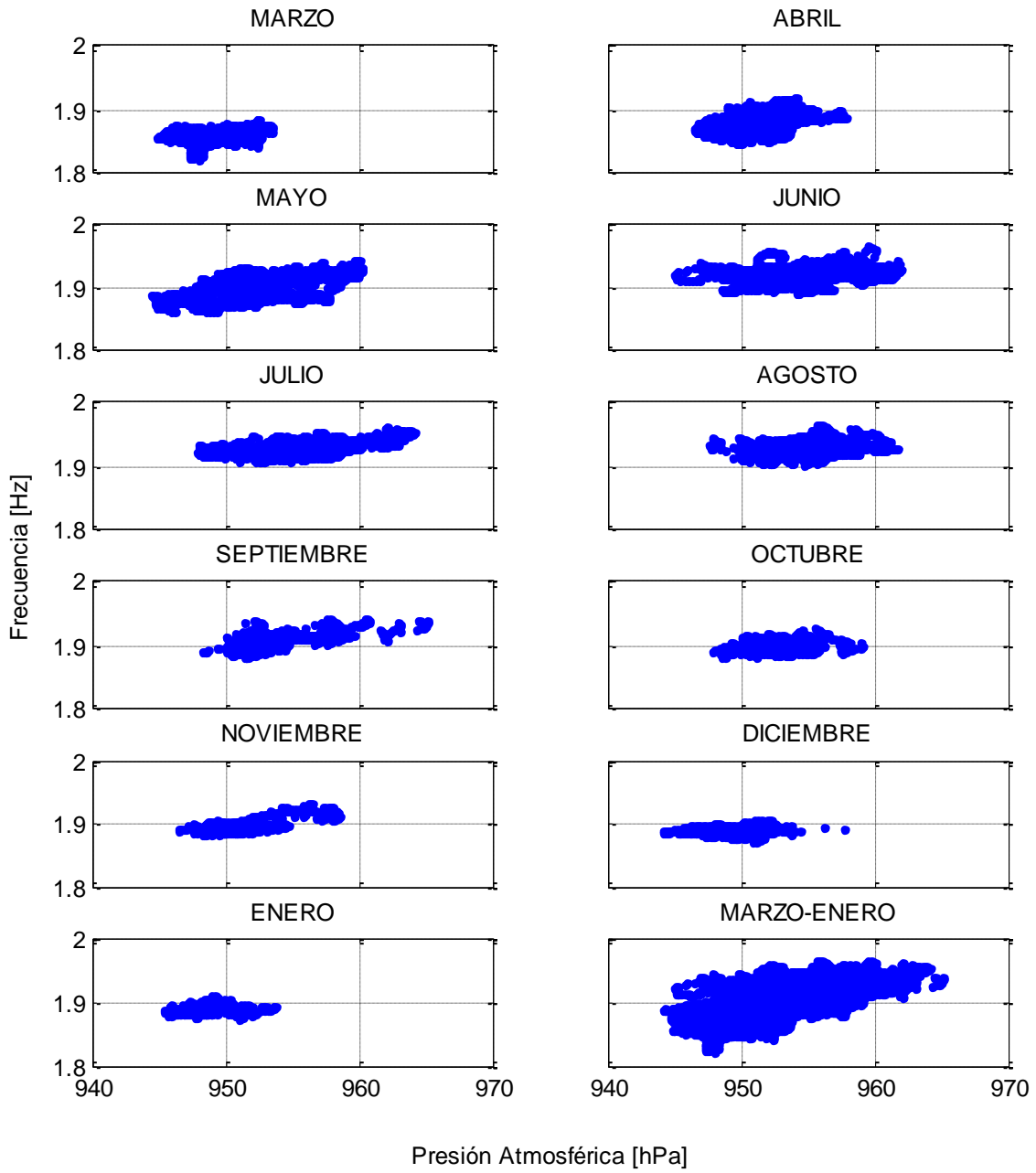


Figura 6-36: Relación entre Frecuencia 1 y Presión Atmosférica. Análisis mensual.

FRECUENCIA 2 - PRESIÓN ATMOSFÉRICA

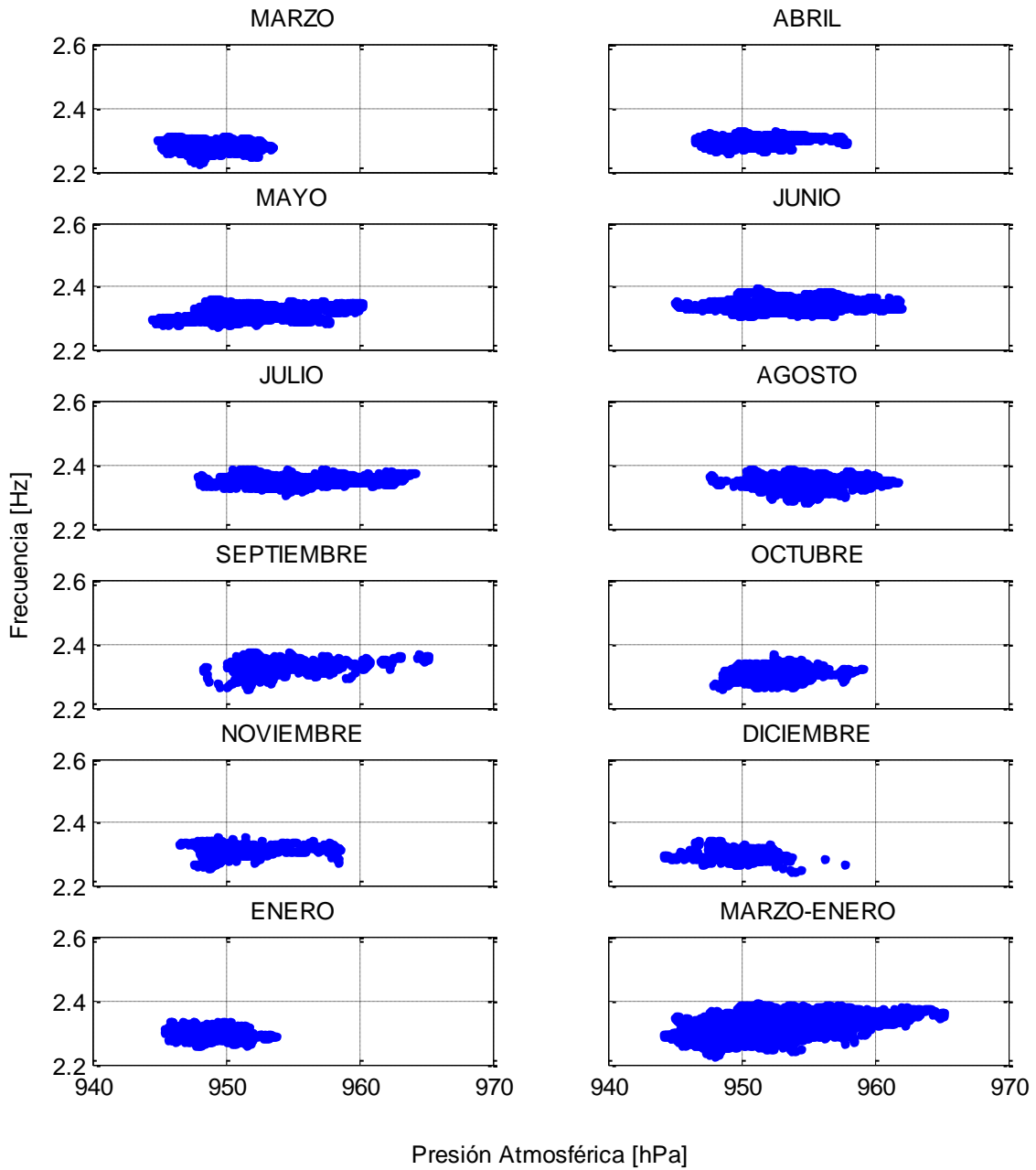


Figura 6-37: Relación entre Frecuencia 2 y Presión Atmosférica. Análisis mensual.

FRECUENCIA 3 - PRESIÓN ATMOSFÉRICA

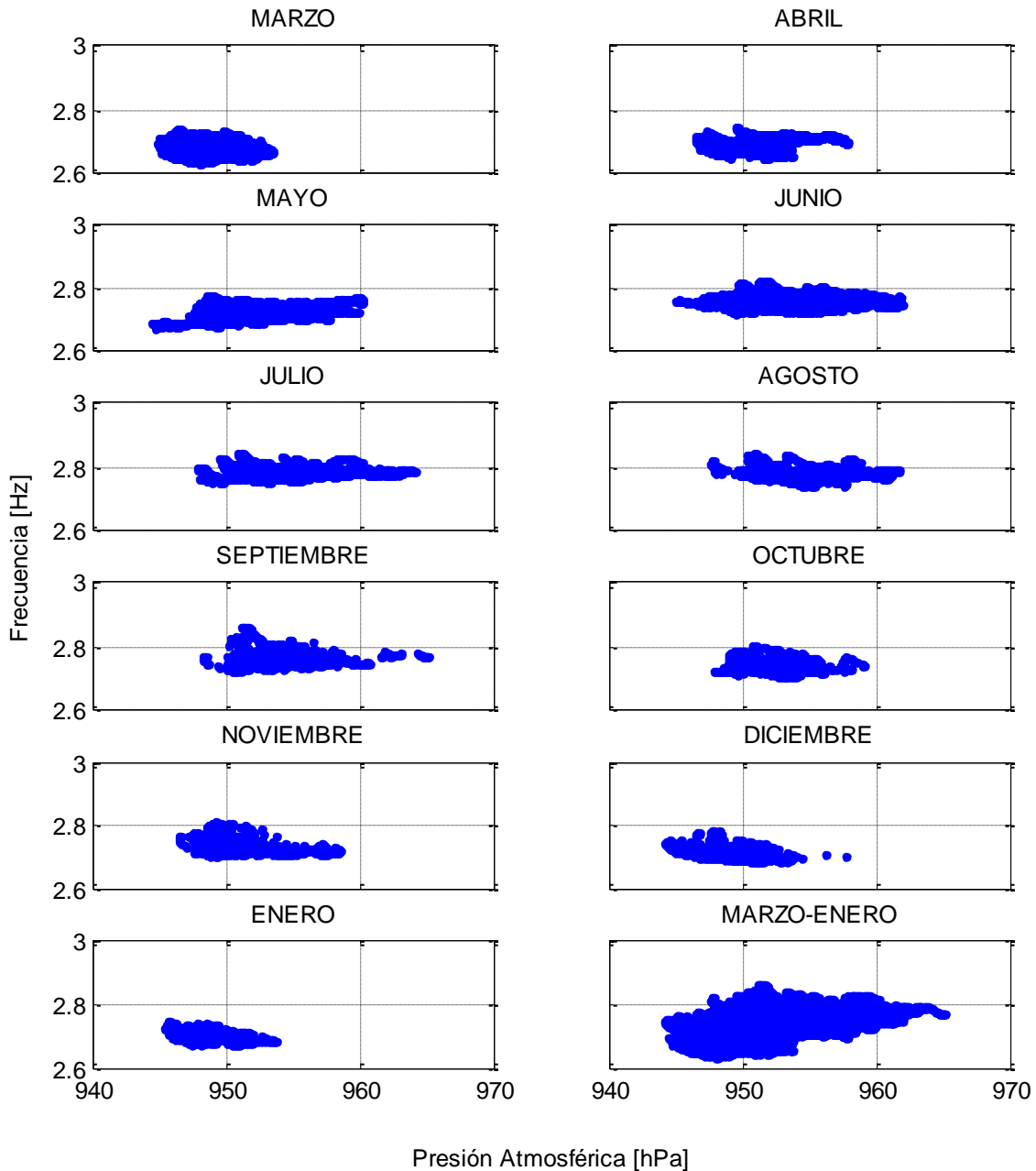


Figura 6-38: Relación entre Frecuencia 3 y Presión Atmosférica. Análisis mensual.

En las figuras anteriores se observa que existe una dependencia temporal en la variación de las frecuencias características, en donde la pendiente de las relaciones entre las frecuencias y los factores ambientales estudiados cambia a lo largo de los meses. Lo anterior es atribuible al efecto del cambio de posición del sol a lo largo del año, calentando distintos sectores de la estructura, produciendo la variación estacional indicada.

6.2.3. Correlación entre variables ambientales y frecuencias (con desfase)

Adicionalmente, se realiza un análisis para determinar la mejor correlación dado un lag de tiempo entre las frecuencias y las variables ambientales. Para ello, se calculan los coeficientes de correlación entre las frecuencias y las variables ambientales para todos los desfases entre 15 y 1440 minutos (desfase máximo igual a 1 día, asumiendo que el efecto de una variable ambiental se ve reflejado en una frecuencia de vibrar con un retraso máximo de 1 día) utilizando la función crosscorr en MATLAB, considerando un delta de tiempo de 15 minutos (establecido por las características de los datos). Finalmente, se escogen los mayores coeficientes de correlación y se registra el lag asociado. Los resultados se muestran en la Tabla 6-5 y Tabla 6-6.

Tabla 6-5: Coeficientes de mejor correlación y lag asociado. Datos pre 27F

	frecuencia 1			frecuencia 2			frecuencia 3		
	R	R ²	lag [horas]	R	R ²	lag [horas]	R	R ²	lag [horas]
Temperatura	-0.78	0.61	-2.50	-0.59	0.35	-17.75	-0.71	0.50	-19.75
Saturación a 5 m	0.83	0.69	0.00	0.76	0.57	-3.25	0.84	0.70	0.00
Saturación a 10 m	0.55	0.30	-3.25	0.51	0.26	-16.25	0.56	0.31	-17.25
Saturación a 20 m	0.42	0.17	-18.00	0.38	0.15	-18.00	0.43	0.18	-5.25
Humedad relativa	0.71	0.50	-2.75	0.54	0.29	-17.00	0.59	0.35	-19.00
Radiación Solar	-0.47	0.22	-5.00	-0.38	0.14	-21.00	-0.47	0.22	0.00
Presión atmosférica	0.64	0.41	0.00	0.51	0.26	-16.75	0.59	0.35	-18.50
Precipitación	0.22	0.05	-16.50	0.19	0.03	-17.50	0.16	0.02	-19.00
Velocidad Viento	-0.39	0.15	-0.75	-0.29	0.09	-17.25	-0.37	0.14	-19.00
Dirección Viento	-0.21	0.04	-10.00	-0.18	0.03	-8.75	-0.19	0.04	-8.50

Tabla 6-6: Coeficientes de mejor correlación y lag asociado. Datos pos 27F

	frecuencia 1			frecuencia 2			frecuencia 3		
	R	R ²	lag [horas]	R	R ²	lag [horas]	R	R ²	lag [horas]
Temperatura	-0.62	0.39	-2.50	-0.51	0.26	-18.00	-0.54	0.29	-16.50
Saturación a 5 m	0.38	0.15	-24.00	0.41	0.17	-24.00	0.35	0.12	-24.00
Saturación a 10 m	-0.09	0.01	-24.00	-0.25	0.06	-24.00	-0.26	0.07	-24.00
Saturación a 20 m	-0.08	0.01	-24.00	-0.21	0.04	-16.25	-0.19	0.03	-15.75
Humedad relativa	0.42	0.18	-2.75	0.32	0.10	-18.00	0.30	0.09	-16.25
Radiación Solar	-0.33	0.11	-4.25	-0.28	0.08	0.00	-0.32	0.10	0.00
Presión atmosférica	0.54	0.30	-0.75	0.48	0.23	-15.50	0.54	0.29	-17.75
Precipitación	0.11	0.01	-4.50	0.10	0.01	-12.50	0.07	0.01	-16.00
Velocidad Viento	-0.22	0.05	-0.25	-0.18	0.03	-17.75	-0.20	0.04	-16.25
Dirección Viento	-0.11	0.01	-3.75	-0.11	0.01	-13.25	-0.10	0.01	0.00

A continuación se grafican en un rango de 7 días las frecuencias y aquellas variables ambientales modificadas por el desfase que tienen mejores coeficientes de correlación con las frecuencias (Temperatura, Presión Atmosférica y Humedad Relativa).

En la Figura 6-39 se grafica la relación entre la frecuencia 1 y la temperatura, observándose la clara relación que existe entre estas dos variables, además del desfase de 2 h 30 min existente, lo cual tiene relación con el efecto retardado que tiene la temperatura sobre el edificio, y que se ha intentado explicar en 5.3 con el desarrollo de un modelo de transferencia de calor en el hormigón a través de la Ley de Fourier.

Por otra parte, en la Figura 6-40 y Figura 6-41 se observa que las frecuencias 2 y 3 tienen su mejor correlación con un desfase mucho mayor (18 h y 16 h 30 min respectivamente), no teniendo el mismo comportamiento que se observa en la frecuencia 1 en relación a la temperatura. Esta diferencia de comportamiento se puede producir debido a la trayectoria que tiene el sol durante el día, calentando heterogéneamente la estructura, y afectando de la misma manera las frecuencias características.

El resto de los gráficos son consecuentes con el resultado obtenido para la temperatura, ya que tanto la presión atmosférica como la humedad relativa son dependientes en parte de la temperatura. Así, se observa que para la frecuencia 1 los desfases tanto de la presión atmosférica como de la humedad relativa son del mismo orden que el desfase de la frecuencia 1 con la temperatura (2 h 45 min y 45 min respectivamente), mientras que los desfases para las frecuencias 2 y 3 son van entre 15 h 30 min y 18 h.

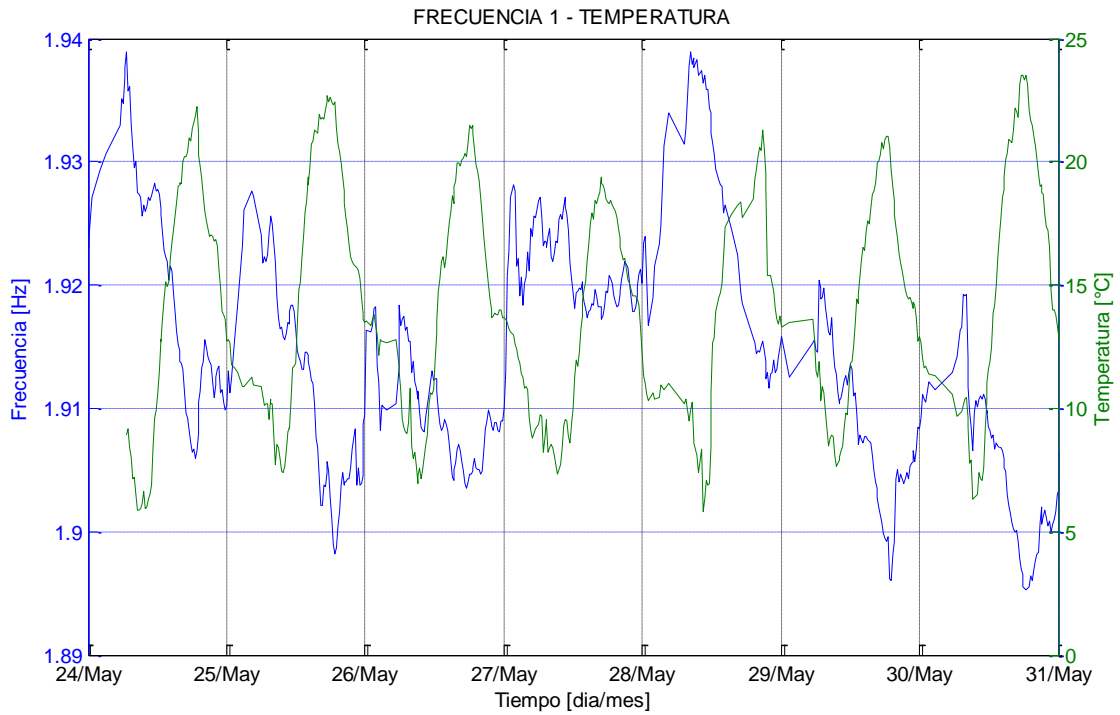


Figura 6-39: Relación entre Frecuencia 1 y Temperatura. Desfase 2 h 30 min

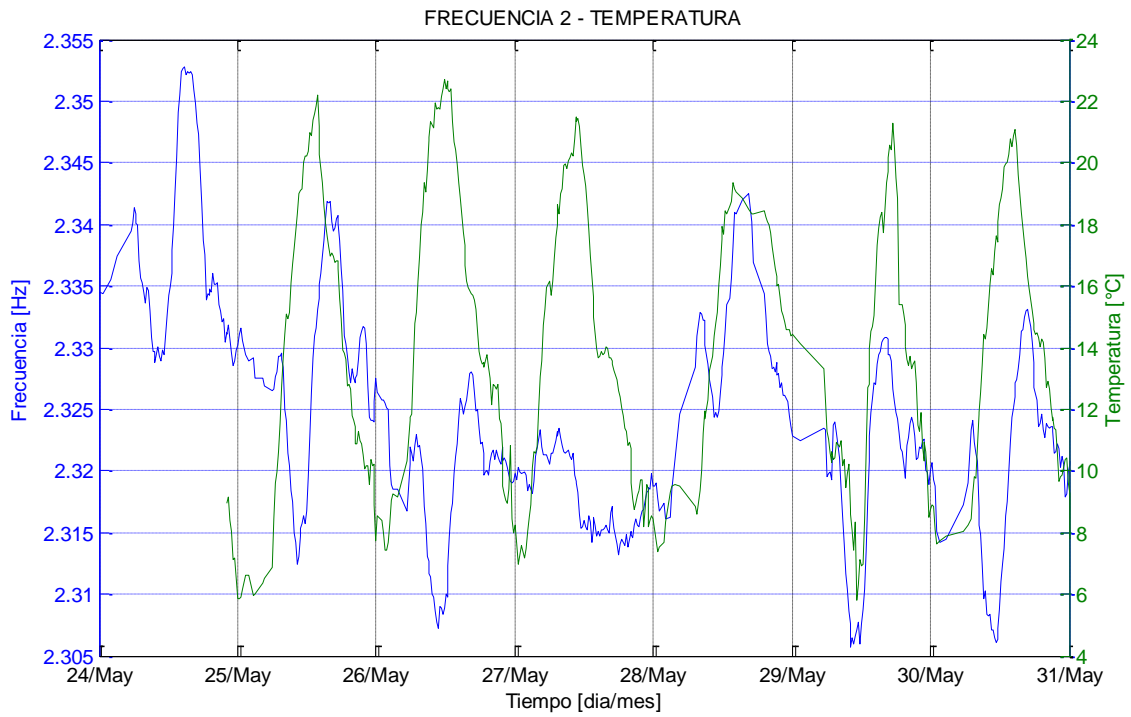


Figura 6-40: Relación entre Frecuencia 2 y Temperatura. Desfase 18 h

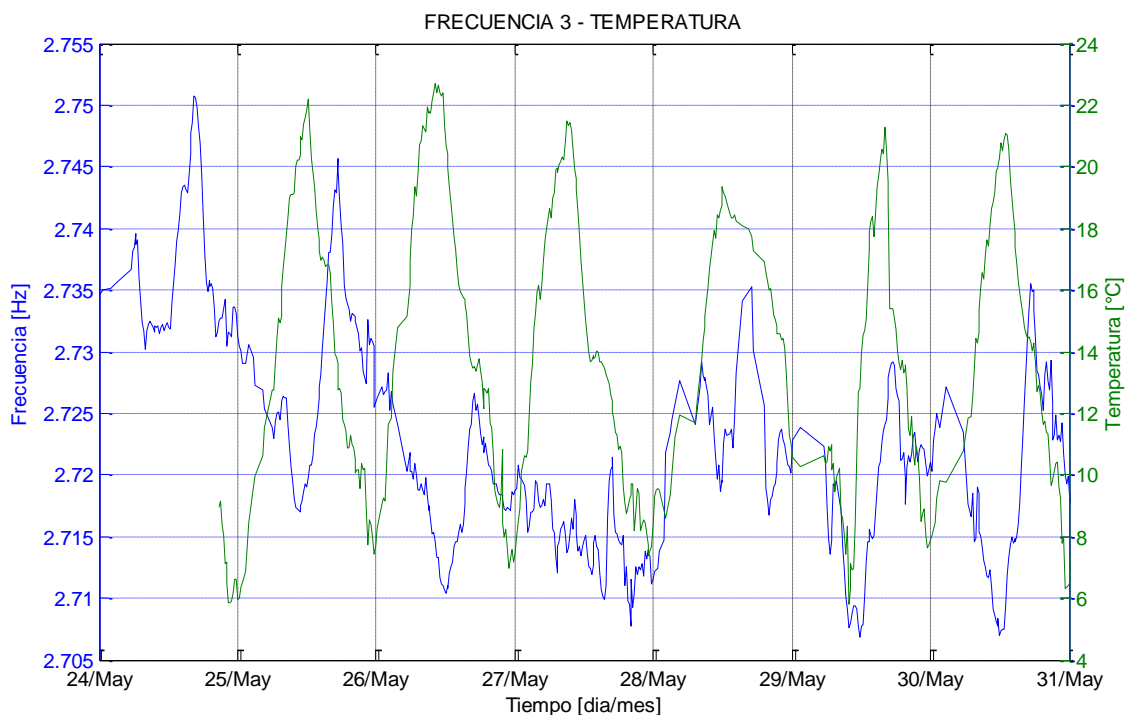


Figura 6-41: Relación entre Frecuencia 3 y Temperatura. Desfase 16 h 30 min

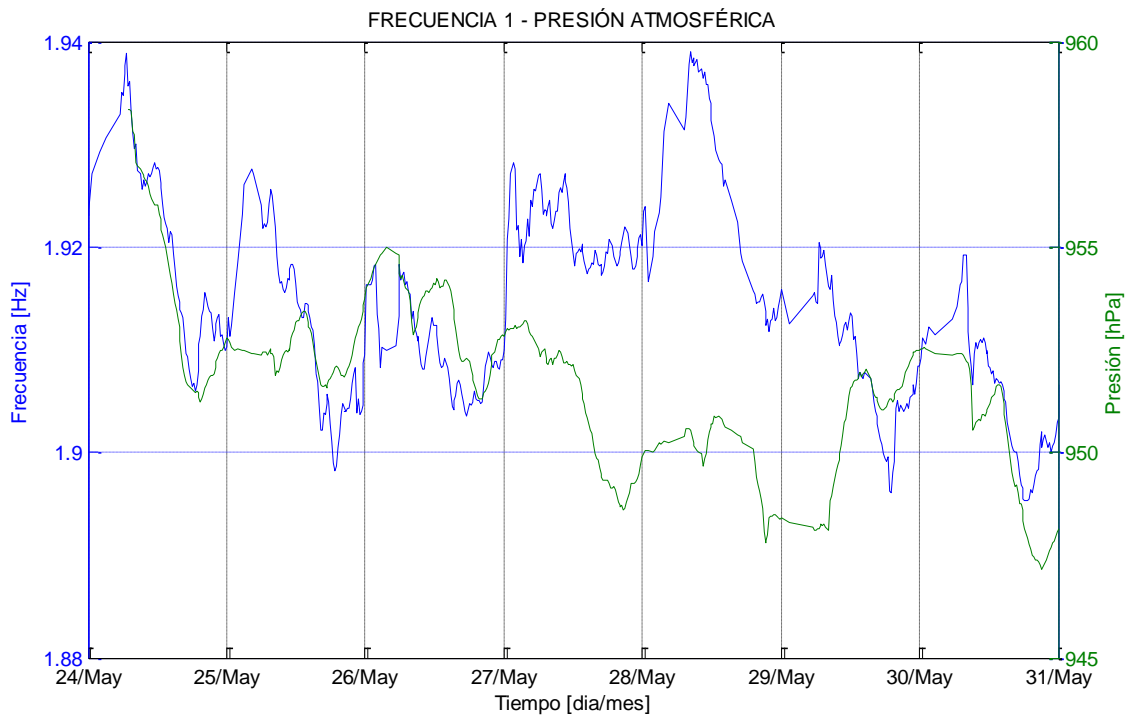


Figura 6-42: Relación entre Frecuencia 1 y Presión Atmosférica. Desfase 2 h 45 min

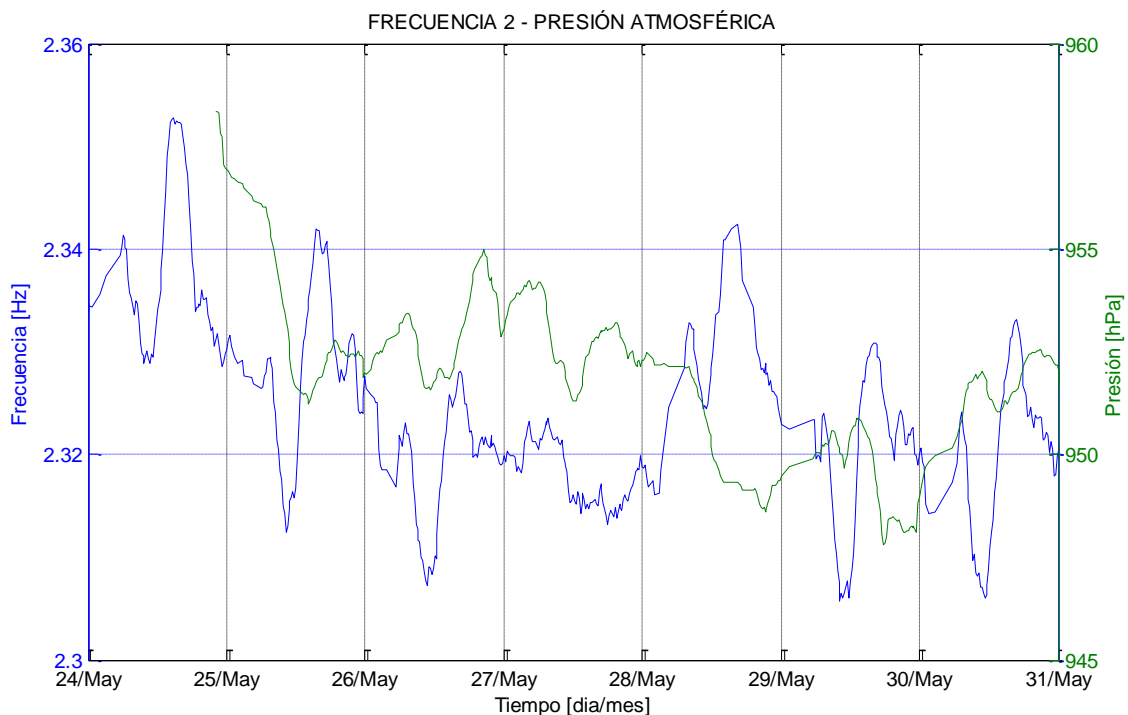


Figura 6-43: Relación entre Frecuencia 2 y Presión Atmosférica. Desfase 18 h

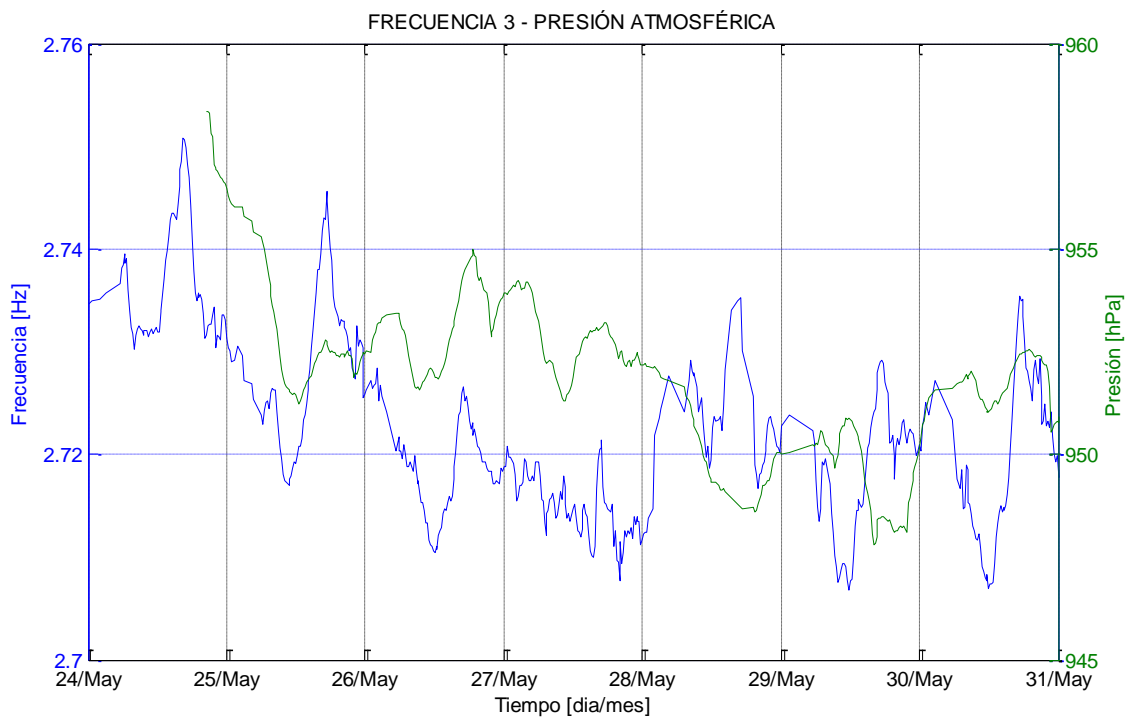


Figura 6-44: Relación entre Frecuencia 3 y Presión Atmosférica. Desfase 16 h 15 min

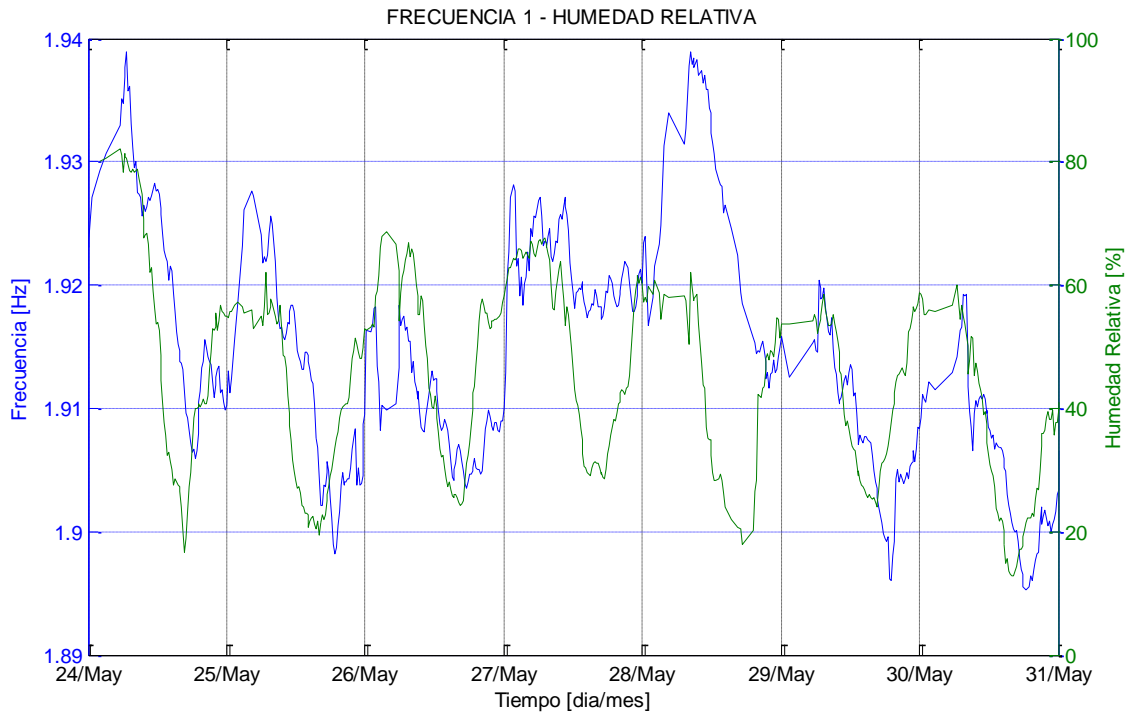


Figura 6-45: Relación entre Frecuencia 1 y Humedad Relativa. Desfase 45 min

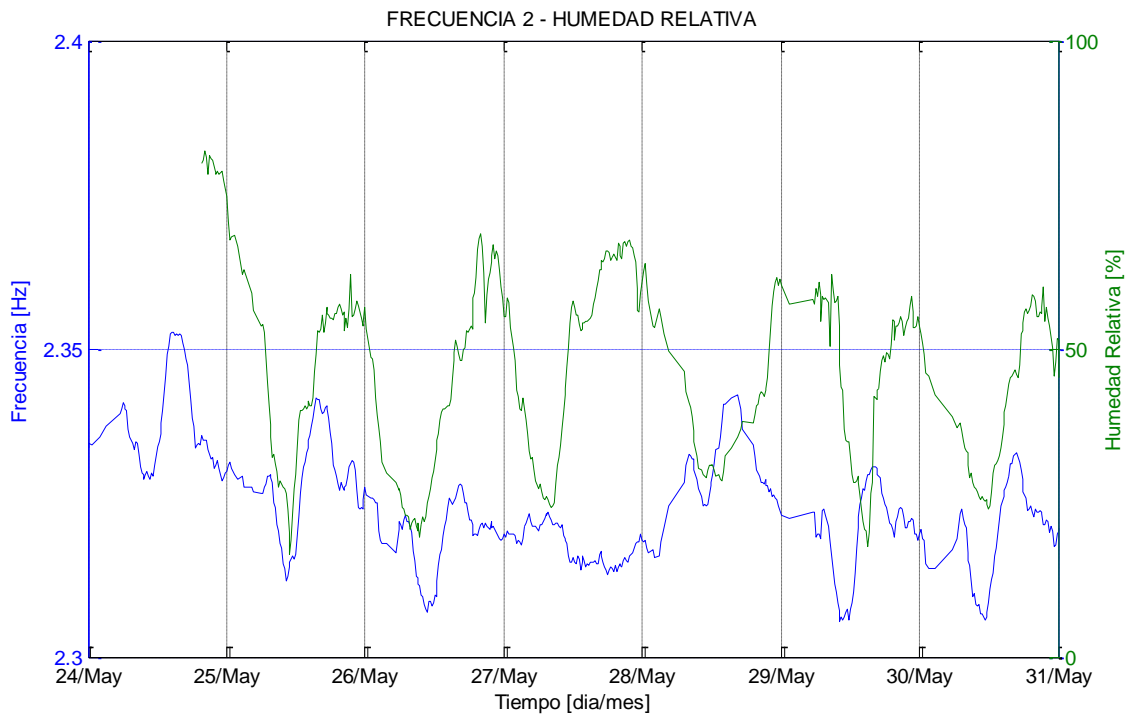


Figura 6-46: Relación entre Frecuencia 2 y Humedad Relativa. Desfase 15 h 30 min

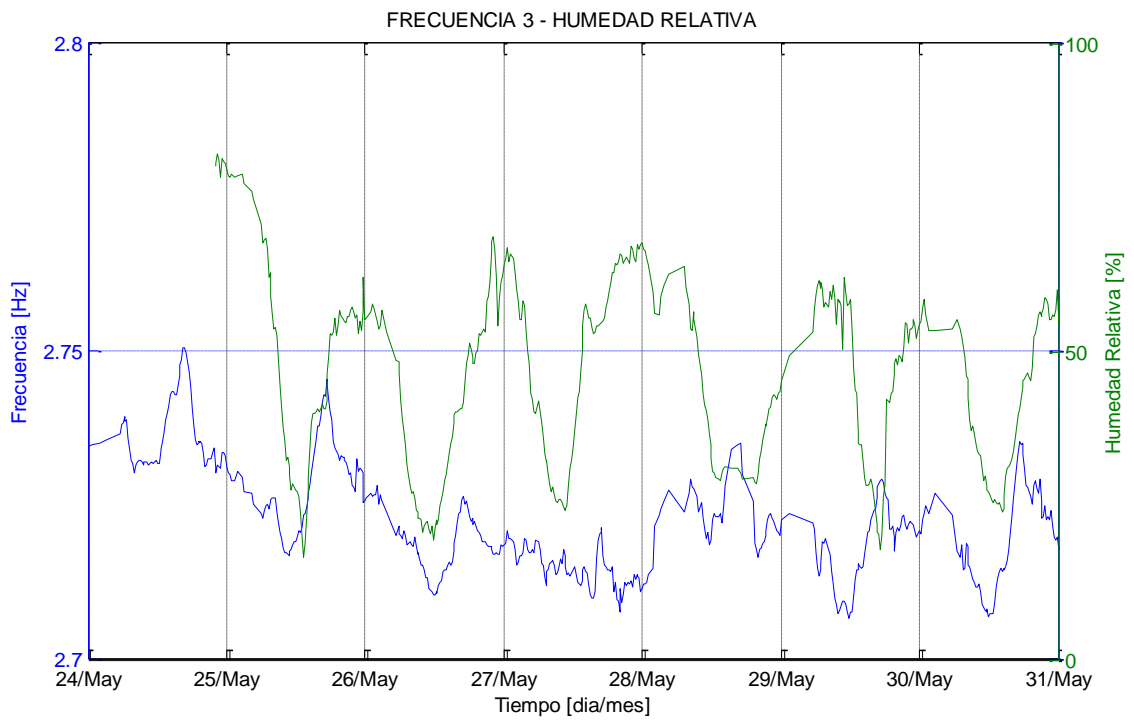


Figura 6-47: Relación entre Frecuencia 3 y Humedad Relativa. Desfase 17 h 45 min

6.3. Regresión Multiparamétrica Lineal

El análisis de las variables ambientales y su relación con las frecuencias características de la Torre Central realizado en 6.2 permite tener conocimiento de los factores ambientales que pueden ser relevantes para la modelación de las frecuencias, así como para comprender las relaciones que existen entre las distintas variables ambientales.

En esta sección se procede a analizar distintos modelos de predicción usando como predictores las variables ambientales: Temperatura, Presión Atmosférica, Humedad Relativa y Saturación del Suelo a 10 m. Para esto, se generan modelos mediante una regresión multiparamétrica lineal (o uniparamétrica para el caso de un predictor), y se evalúa el modelo mediante el coeficiente de determinación R^2 (sección 2.1.1) y el coeficiente de ajuste NRMSE (sección 2.2.1). Los resultados se muestran en la Tabla 6-7.

Tabla 6-7: Coeficientes de ajuste y R^2 regresiones

MODELO	f_1		f_2		f_3	
	Ajuste [%]	R^2	Ajuste [%]	R^2	Ajuste [%]	R^2
T	24.3	0.429	13.4	0.252	10.5	0.201
P	22.7	0.403	14.6	0.272	13.2	0.248
H	8.9	0.173	3.0	0.063	1.4	0.030
T-P	31.3	0.528	18.2	0.332	15.5	0.287
T-H	27.8	0.479	18.6	0.338	17.8	0.326
P-H	24.8	0.434	14.7	0.273	13.2	0.248
T-P-H	33.5	0.558	22.2	0.394	21.3	0.382
T-P-H-S	34.0	0.564	22.2	0.396	21.9	0.390

Adicionalmente, se estudian modelos de regresión en los cuales se desfazan las variables ambientales en función de la mejor correlación obtenida en 6.2.3. Este resultado se muestra en la Tabla 6-8.

Tabla 6-8: Coeficientes de ajuste y R² regresiones con lag

MODELO	f ₁		f ₂		f ₃	
	Ajuste [%]	R ²	Ajuste [%]	R ²	Ajuste [%]	R ²
T	27.62	0.477	11.37	0.215	8.67	0.168
P	16.27	0.299	17.19	0.315	19.15	0.347
H	7.72	0.149	7.41	0.144	5.00	0.098
T-P	35.17	0.580	22.10	0.393	21.96	0.391
T-H	29.91	0.510	14.97	0.278	10.97	0.210
P-H	17.96	0.327	18.60	0.338	20.64	0.371
T-P-H	35.54	0.585	22.79	0.404	22.77	0.404
T-P-H-S	36.38	0.595	22.82	0.405	23.47	0.415

Las diferencias porcentuales entre los modelos de regresión con los predictores sin y con desfase se muestran en la Tabla 6-9, en donde se observa que desfasar las variables ambientales no siempre supone una mejora en el coeficiente de determinación de los modelos. Por ejemplo, los modelos que tienen como predictor la temperatura y que se les aplica un desfase, mejoran en la frecuencia 1 pero empeoran en las frecuencias 2 y 3. Hay mejoras importantes para los modelos con desfase que utilizan como predictor la humedad relativa para las frecuencias 2 y 3, aunque en términos prácticos estos modelos no son muy útiles ya que la humedad relativa es el predictor menos relevante. Finalmente, se observa que para los modelos que utilizan 3 o 4 predictores, los coeficientes de determinación aumentan, aunque las mejoras de los modelos son pequeñas.

Tabla 6-9: Diferencia porcentual entre modelos sin y con desfase

MODELO	f ₁		f ₂		f ₃	
	Ajuste [%]	R ²	Ajuste [%]	R ²	Ajuste [%]	R ²
T	12.6	10.7	-16.5	-15.6	-19.1	-17.8
P	-33.0	-29.5	16.0	14.6	36.6	33.2
H	-14.6	-14.6	83.8	78.5	111.8	106.7
T-P	11.7	9.4	19.3	16.8	34.8	30.8
T-H	7.3	6.1	-21.6	-19.5	-47.6	-43.3
P-H	-31.8	-28.1	23.6	21.2	43.7	39.5
T-P-H	5.8	4.6	2.8	2.4	6.6	5.7
T-P-H-S	6.8	5.4	2.6	2.2	7.0	6.0

Finalmente, dado que las mejoras de los modelos con desfase son marginales en los modelos que tienen los mayores ajustes (T-P-H), se opta por utilizar los modelos sin desfase para facilidad de aplicación del método.

Se opta por graficar el modelo con la temperatura como predictor, y el modelo con la temperatura, presión atmosférica y humedad relativa como predictores. El primero sirve para tenerlo como referencia, dado que se supone que la temperatura debería ser el predictor ideal, considerando que las variaciones de las frecuencias de la estructura son producto de este efecto, y el segundo modelo se escoge por ser el que tiene los mayores ajustes en las 3 frecuencias estudiadas, salvo en comparación al modelo que utiliza la saturación del suelo como predictor.

En cuanto a la no inclusión de la saturación del suelo en los modelos definitivos a pesar de que mejora el ajuste de los modelos, se considera lo siguiente: se observa de la Figura 6-27, Figura 6-28 y Figura 6-29, que las variaciones de las frecuencias no siguen un patrón definido cuando existen aumentos de saturación, es decir, hay ocasiones en que cuando existe un aumento de saturación, las frecuencias aumentan, pero también se observa que en otras oportunidades, cuando existe un aumento de la saturación las frecuencias disminuyen, por lo tanto la correlación no es consistente. Por esta razón, se prefiere omitir este predictor para estos modelos.

Por otra parte, es claro que la saturación del suelo es un factor relevante en relación a las variaciones de frecuencia de la estructura en los momentos del año en que existen precipitaciones, siendo incluso mejor que el registro de la precipitación para ser utilizado como predictor, ya que es el aumento de la saturación del suelo el que cambia las frecuencias de la estructura y no las precipitaciones mismas.

Sin embargo, dadas las características de los registros de frecuencia y saturación, se recomienda un estudio de una mayor cantidad de datos (al menos un par de años de registros), para determinar una relación confiable entre variación de frecuencias y saturación del suelo, la cual se podría incluir en los modelos predictivos de regresión, pero no como predictor, sino que como una variable independiente que genere una variación de frecuencias fija en relación a una variación en la saturación del suelo.

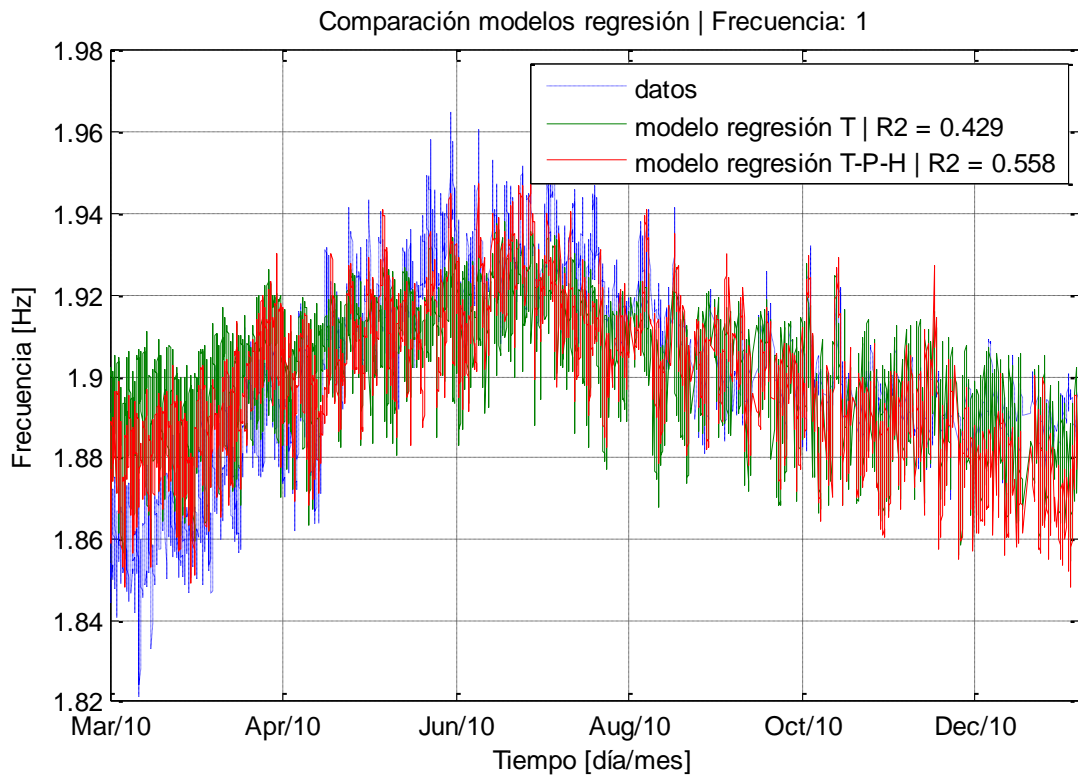


Figura 6-48: Modelos regresión multiparamétrica T y T-P-H, frecuencia 1

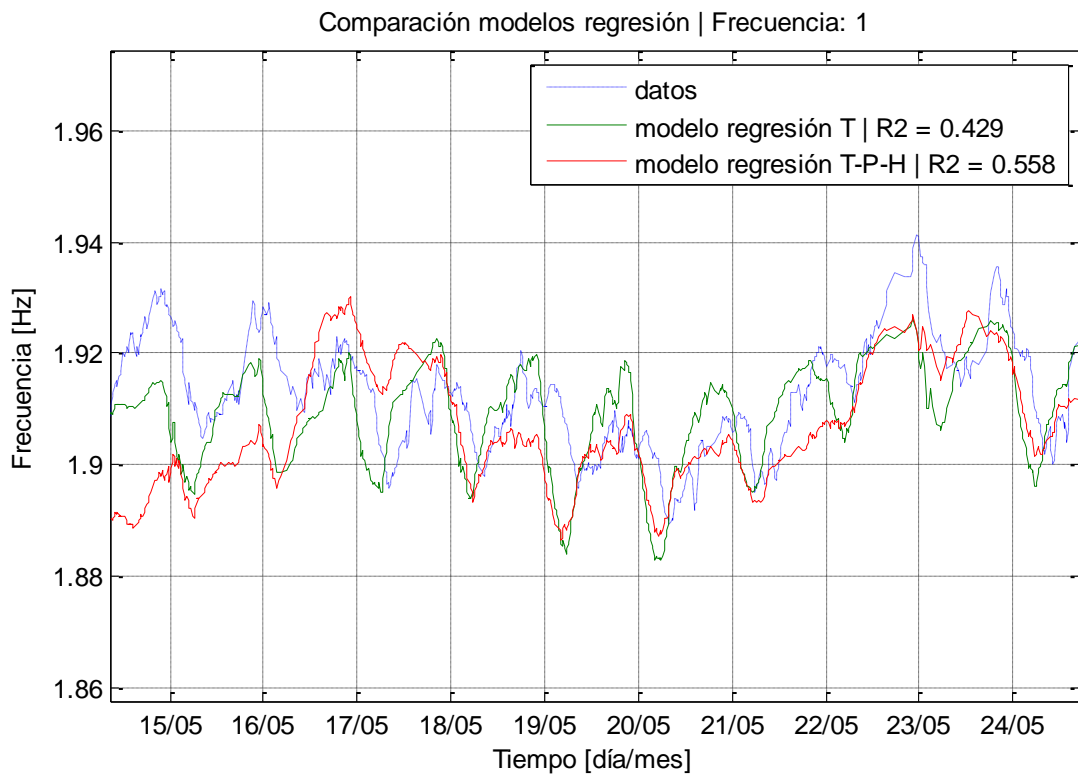


Figura 6-49: Modelos regresión multiparamétrica T y T-P-H, frecuencia 1 (2)

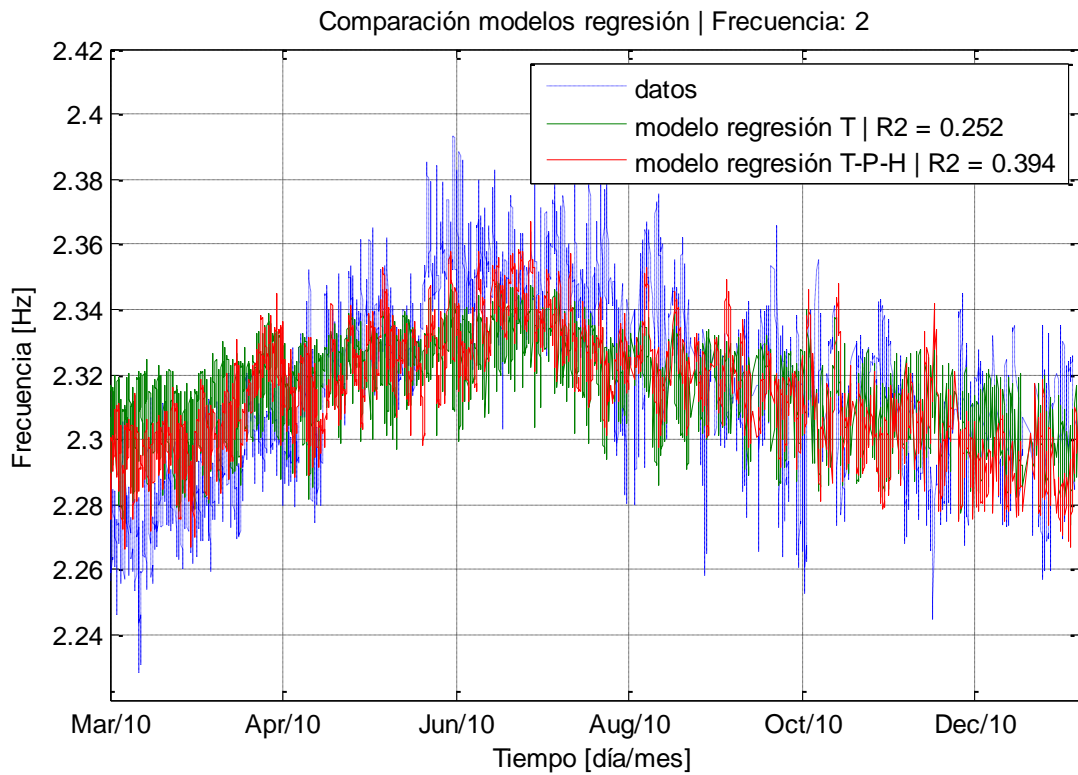


Figura 6-50: Modelos regresión multiparamétrica T y T-P-H, frecuencia 2

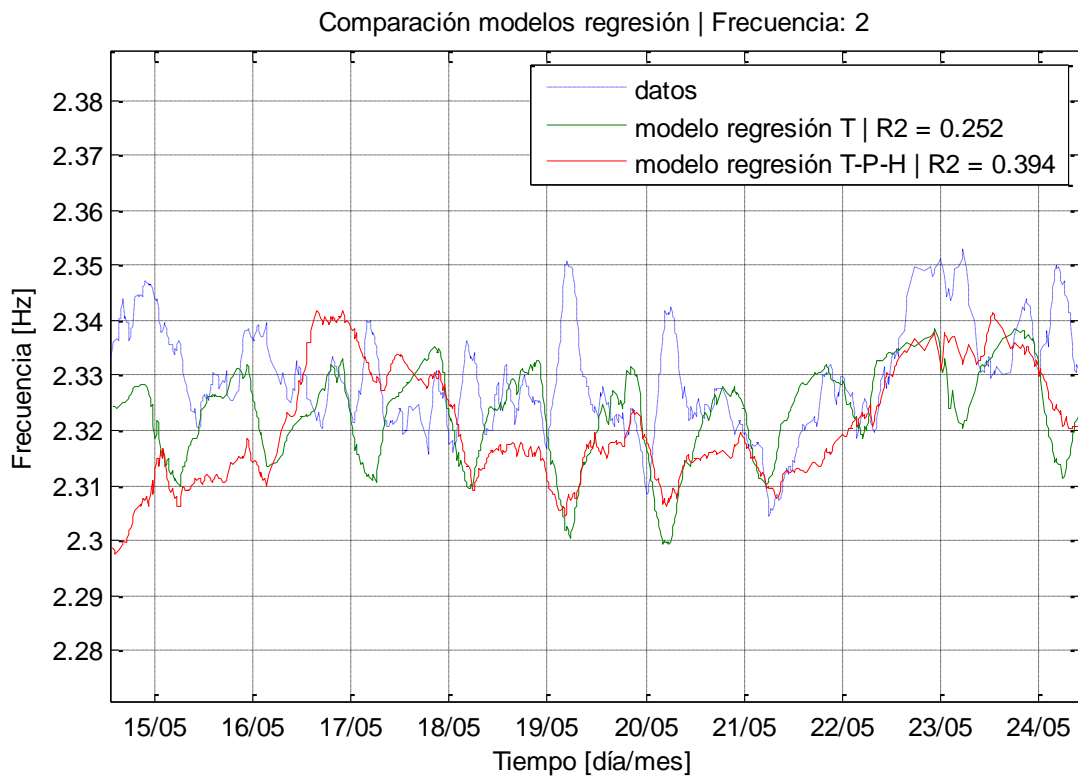


Figura 6-51: Modelos regresión multiparamétrica T y T-P-H, frecuencia 2 (2)

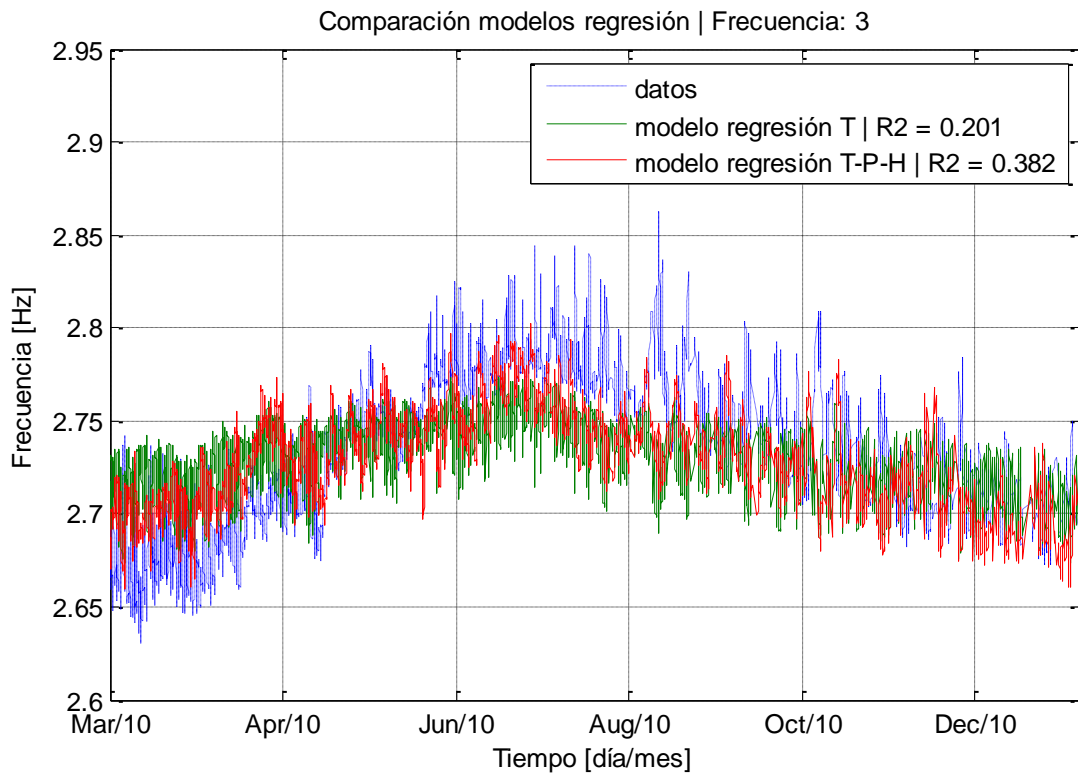


Figura 6-52: Modelos regresión multiparamétrica T y T-P-H, frecuencia 3

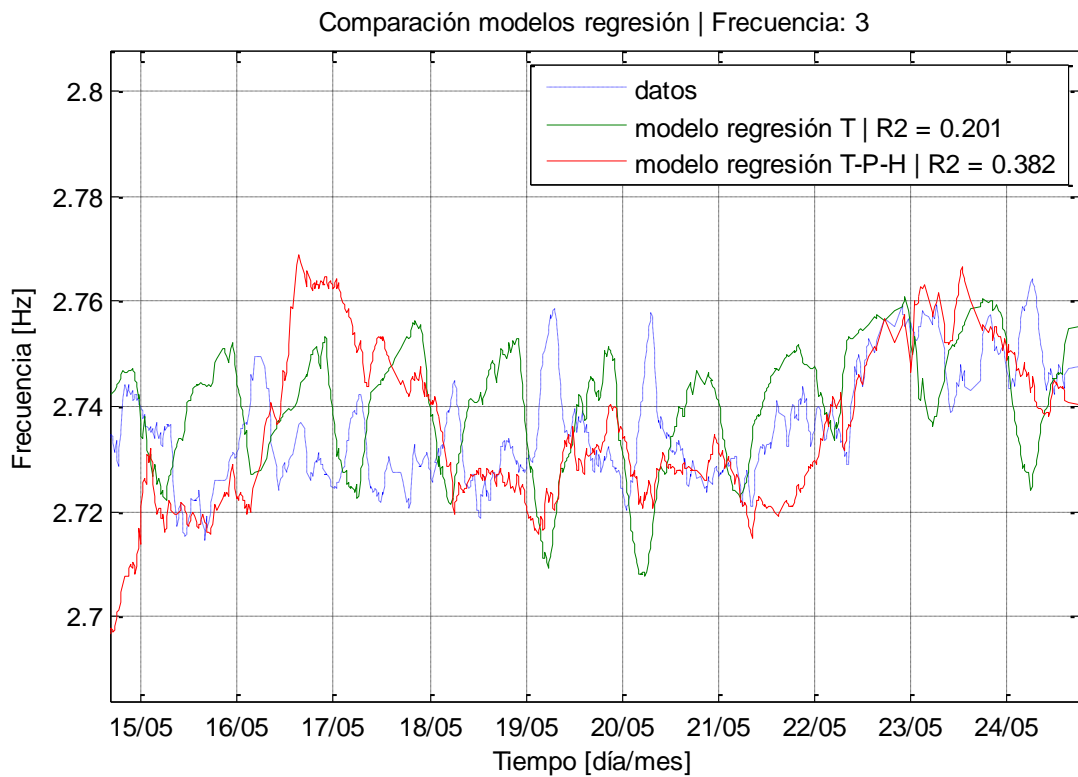


Figura 6-53: Modelos regresión multiparamétrica T y T-P-H, frecuencia 3 (3)

Los modelos anteriormente mostrados tienen la capacidad de simular la variación estacional y diaria de las frecuencias, en mayor medida para la frecuencia 1, y con algo más de dificultad para las frecuencias 2 y 3.

La función de ajuste multiparamétrico *robustfit* de MATLAB, permite que la temperatura funcione como predictor único, no así la función *regress*, por lo que en los modelos presentados se utilizó la primera función para las regresiones.

Es interesante finalmente mencionar el hecho de que los modelos que utilizan 3 predictores tienen un mejor ajuste que aquellos que tienen sólo un predictor (la temperatura), ya que los otros dos predictores no son responsables de la variación de las frecuencias de la estructura, sino que éstos varían debido a que son dependientes de la temperatura, por lo que de todas maneras tienen una correlación considerable con las frecuencias. A pesar de que la correlación entre la temperatura y la humedad relativa es alta ($R^2 > 0.6$), este predictor se utilizó de todas maneras, aunque fuera en cierto sentido redundante, ya que en términos prácticos, no afecta a la eficiencia de la obtención de los modelos predictivos.

6.4. ARX

Un modelo ARX está definido por diversos coeficientes que pueden tomar muchos valores distintos, y por consecuencia, existe una gran cantidad de potenciales modelos en función de la cantidad de predictores y de las características de los datos. A continuación se evalúan diversos modelos para escoger aquel que permita predecir de manera consistente las frecuencias características, y de esta manera, desarrollar una metodología para identificar variaciones de frecuencias debido a daño estructural.

6.4.1. Elección de modelos

Para la elección de los coeficientes que definen a los modelos ARX (n_a , n_b y n_k), se utiliza el coeficiente de ajuste NRMSE y el coeficiente de determinación R^2 . Para esto, se generan diversos modelos y se calcula dicho coeficiente, con lo que se decide qué modelos son adecuados.

Como se determinó en 6.2.1, las variables ambientales que tienen mayor correlación con las frecuencias características de la estructura son la temperatura, la presión atmosférica y la humedad relativa (Tabla 6-4), por lo que éstas son las variables utilizadas para realizar los modelos con ARX. Se incluye además el efecto de la saturación del suelo, ya que, a pesar de no tener un coeficiente de correlación alto con las frecuencias, tiene un efecto claro en ellas.

Se utilizan los datos posteriores al 27F, considerando un año de entrenamiento de los modelos, y una validación sobre el mismo año. Además, para que los errores del proceso de identificación no afecten en lo posible a la modelación, se utilizan los datos corregidos mediante el cálculo de una media móvil, procedimiento explicado en 6.1.1.

6.4.2. Evaluación de modelos base

En una primera instancia se realizan modelos con coeficientes n_a , n_b y n_k unitarios, para determinar una base comparativa para el resto de los modelos.

Tabla 6-10: Evaluación de modelos con coeficientes unitarios

MODELO	f ₁		f ₂		f ₃	
	Ajuste [%]	R ²	Ajuste [%]	R ²	Ajuste [%]	R ²
T	-903.1	0.054	-1027.0	0.302	-1216.7	0.558
P	17.2	0.388	15.8	0.419	16.7	0.381
H	-484.7	0.549	-448.2	0.010	-564.6	0.045
T-P	43.1	0.703	-88.7	0.447	-8.23E+16	0.019
T-H	-276.4	0.570	-1165.8	0.256	-1830.8	0.079
P-H	34.3	0.596	-27.5	0.118	-661.3	0.500
T-P-H	42.0	0.685	-52.9	0.337	-1.62E+05	0.029
T-P-H-S	44.8	0.710	-51.9	0.347	-8.03E+06	0.027

Se observa de la Tabla 6-10 que solamente los modelos para la frecuencia 1 muestran un ajuste razonablemente bueno, cercano al 40% para los mejores modelos, mientras que los modelos generados para las frecuencias 2 y 3 muestran coeficientes de ajuste muy bajos.

Para la frecuencia 1, el modelo que utiliza la saturación como predictor es el que presenta el mejor ajuste y el mejor coeficiente de determinación, pero no es considerablemente superior al modelo que no utiliza la saturación como predictor. Por esta razón, los modelos analizados posteriormente no consideran la saturación del suelo como predictor.

6.4.3. Modelo con mejor ajuste

Dado que se pueden generar diversos modelos ARX en función de los coeficientes que se escojan (n_a , n_b y n_k), se utiliza el *System Identification Toolbox* de MATLAB para identificar los modelos que presenten los mejores ajustes. Para ello, se analizan todas las combinaciones de coeficientes entre 1 y 10, utilizando como predictores temperatura y presión atmosférica, es decir se analizan 10^5 modelos. Sólo se analizan las combinaciones de los modelos con estos 2 predictores, ya que analizar un modelo con 3 predictores supone analizar 10^7 modelos, lo que tiene un costo computacional importante, y considerando además que la inclusión de la humedad relativa no mostró una mejora considerable en el análisis de los modelos base para la frecuencia 1, se opta por no realizar ese análisis.

En la Tabla 6-11 se muestran los resultados de los mejores modelos para las 3 frecuencias en estudio para los predictores T-P, y además se muestran los mejores modelos utilizando solamente la temperatura como predictor para tenerlo como referencia.

Tabla 6-11: Coeficientes de ajuste y R2 modelos ARX, frecuencias 1, 2 y 3

		f1	f2	f3
T	Coeficientes	[6,9,8]	[10,8,6]	[8,10,1]
	Ajuste [%]	22.37	-91.3	-774
	R2	0.472	0.174	0.52
T-P	Coeficientes	[9,[3,10],[2,6]]	[10,[9,10],[10,2]]	[7,[10,10],[2,6]]
	Ajuste [%]	46.04	36.17	-43.21
	R2	0.71	0.611	0.182

De la Figura 6-54 a la Figura 6-59 se grafican las simulaciones generadas por los modelos definidos en la Tabla 6-11.

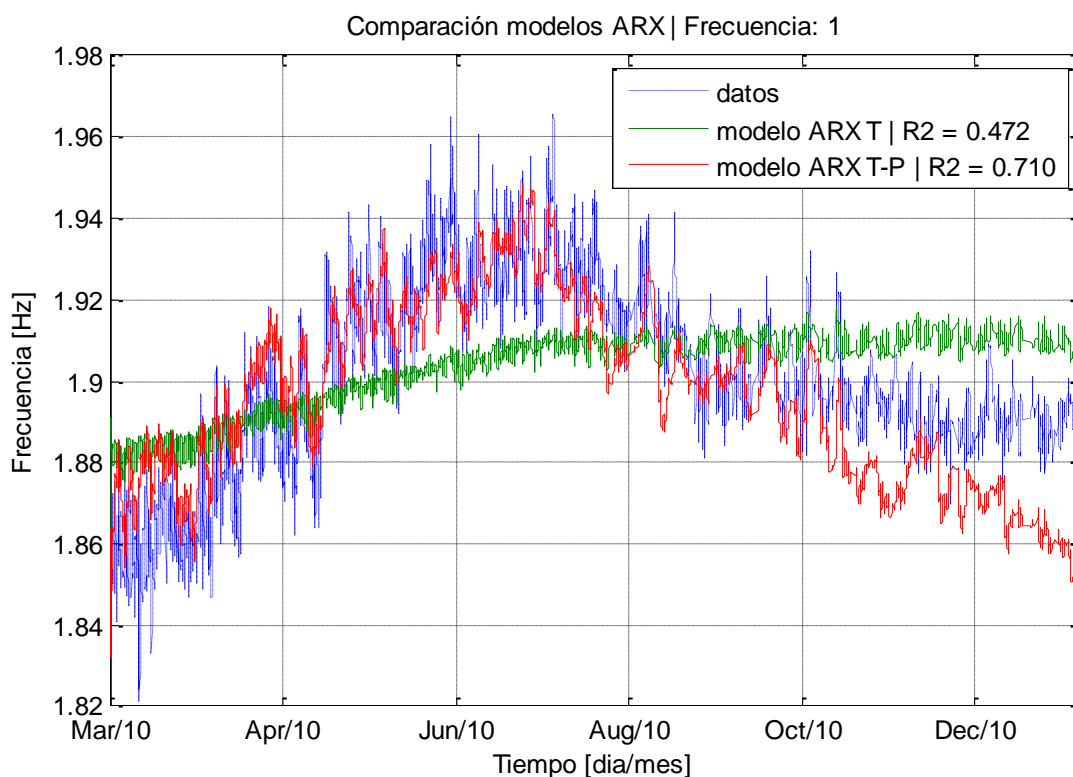


Figura 6-54: Modelos ARX T y T-P, frecuencia 1

Comparación modelos ARX | Frecuencia: 1

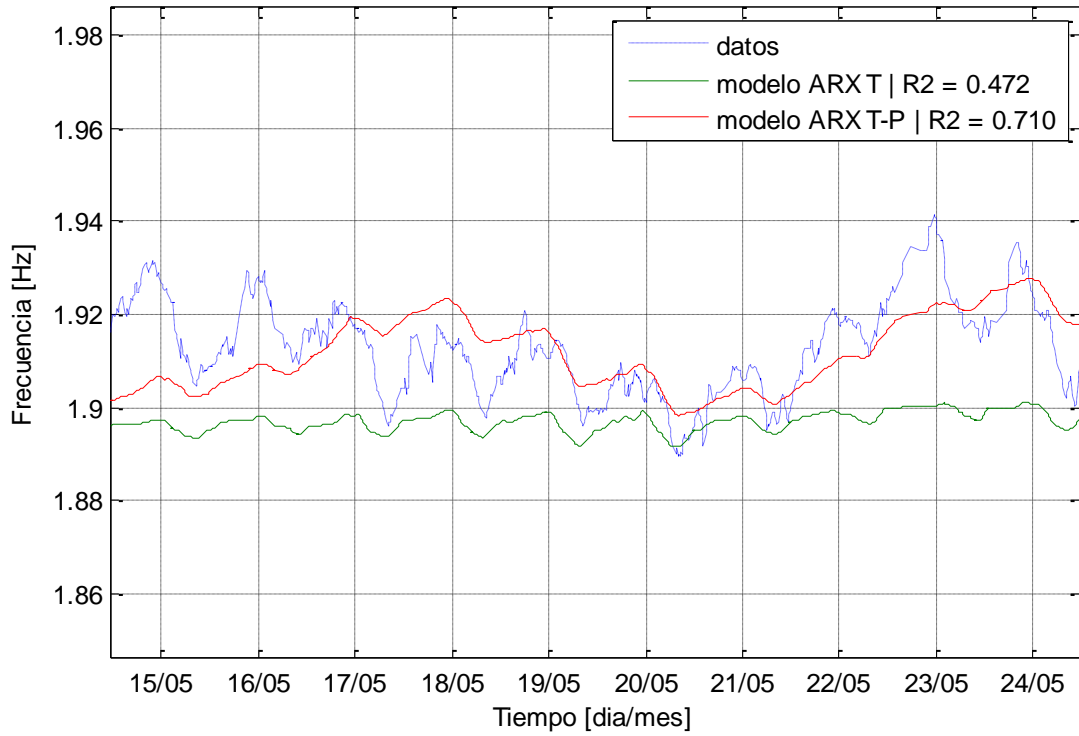


Figura 6-55: Modelos ARX T y T-P, frecuencia 1 (2)

Comparación modelos ARX | Frecuencia: 2

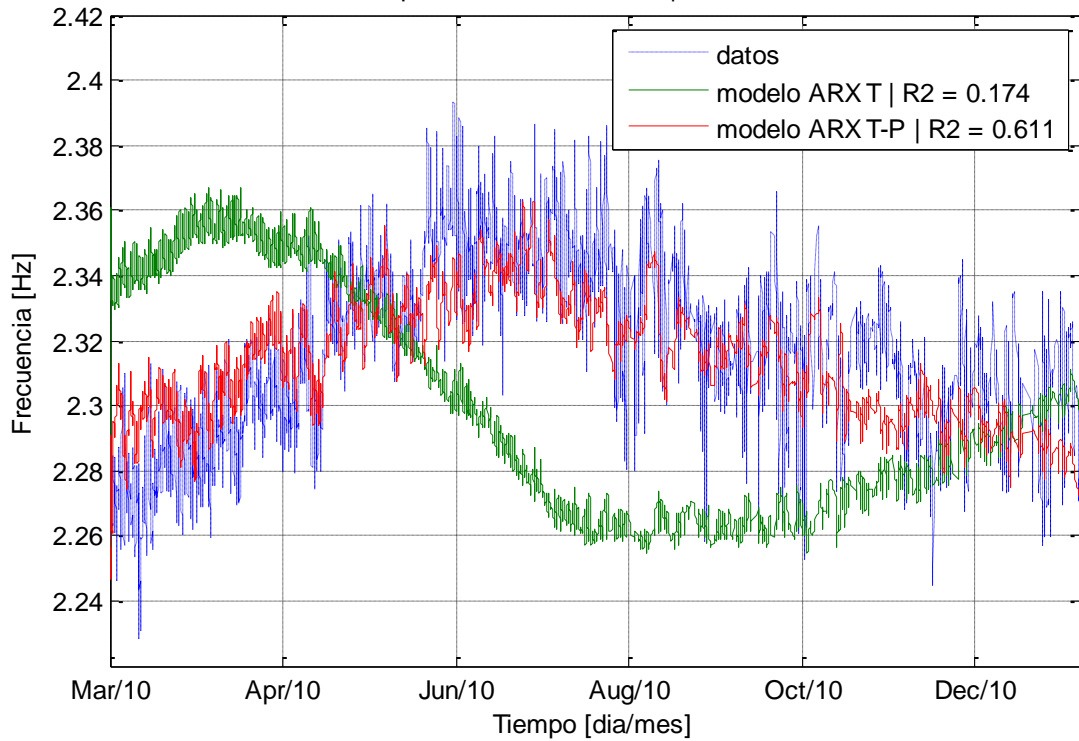


Figura 6-56: Modelos ARX T y T-P, frecuencia 2

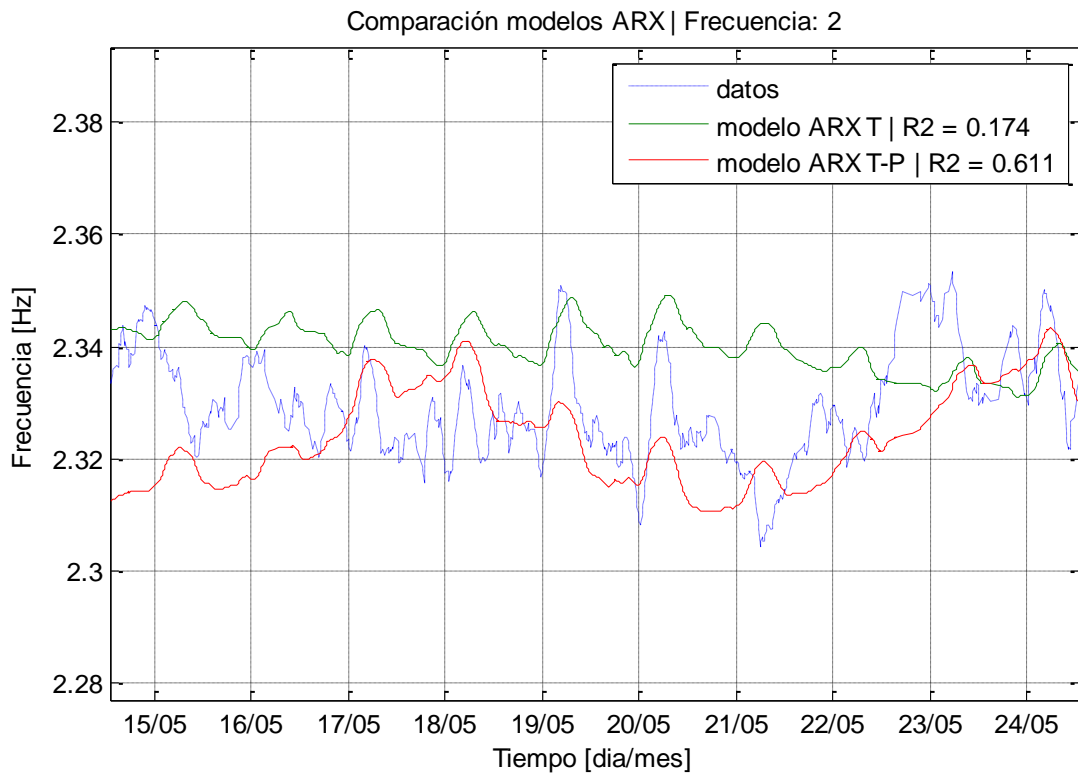


Figura 6-57: Modelos ARX T y T-P, frecuencia 2 (2)

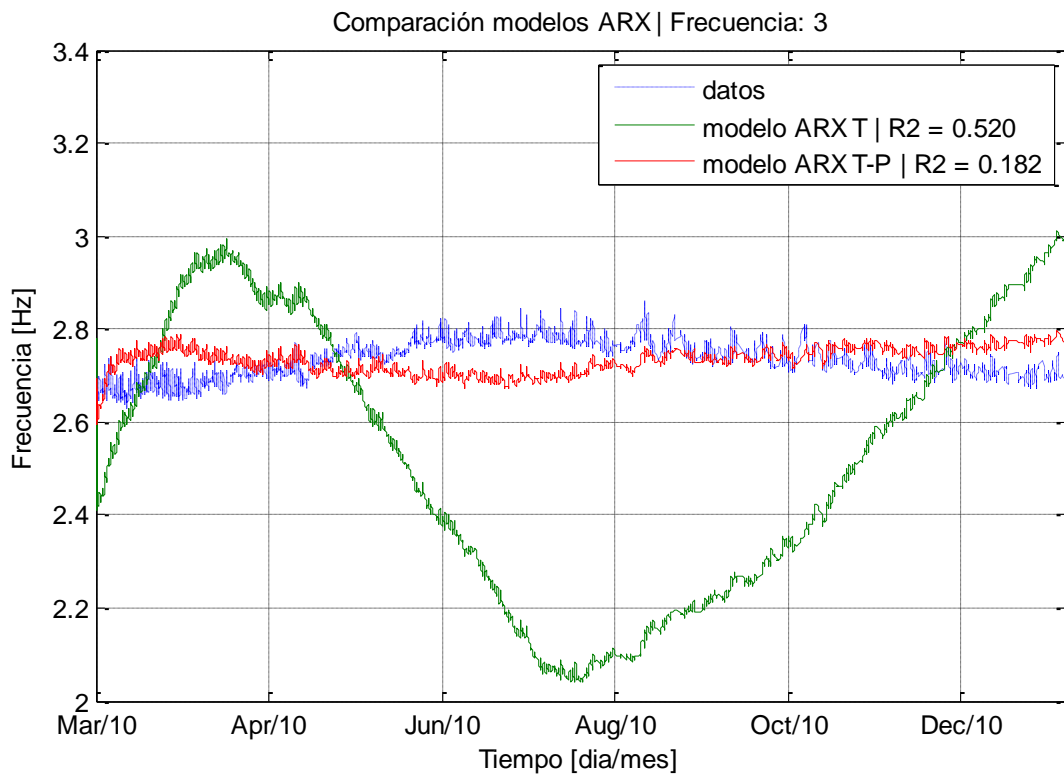


Figura 6-58: Modelos ARX T y T-P, frecuencia 3

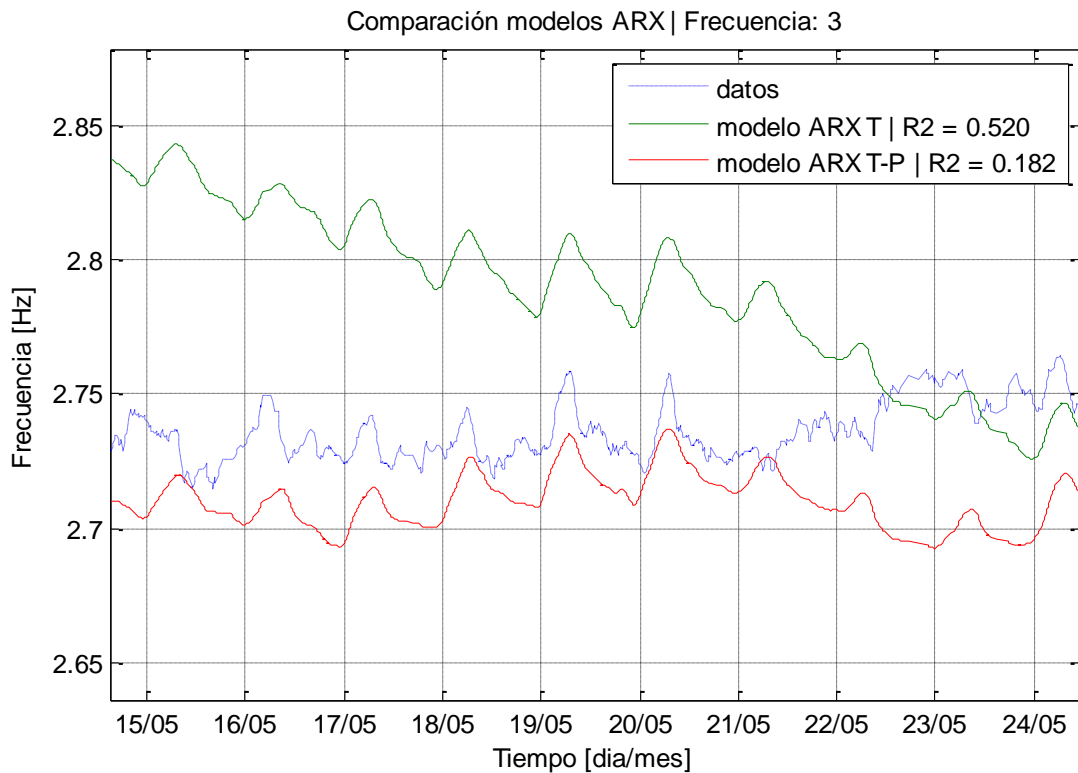


Figura 6-59: Modelos ARX T y T-P, frecuencia 3 (2)

De las figuras anteriores se observa que tanto para la frecuencia 1 como para la frecuencia 2 es posible establecer modelos que permitan recrear la variación diaria y estacional de las frecuencias con relativo éxito, mientras que los modelos generados para la frecuencia 3 no permiten tal cosa.

Se observa también que los modelos que utilizan como predictor sólo a la temperatura están lejos de poder simular las frecuencias características, teniendo que recurrir a un segundo predictor (presión atmosférica) para poder reproducir en parte las frecuencias.

Finalmente, para comparar los resultados de los modelos de regresión multiparamétrica y los modelos ARX, en la Tabla 6-12 se muestran los resultados de los mejores modelos para cada uno de los métodos. Se observa que el modelo ARX es superior en cuanto a ajuste y a coeficiente de determinación para las frecuencias 1 y 2, utilizando incluso 1 predictor menos. Mientras que el modelo de regresión es mejor para el caso de la frecuencia 3. Las mejoras en el ajuste de los modelos son considerables, teniendo un ajuste más de un 30% mayor para la frecuencia 1 y una mejora cercana al 50% para la frecuencia 2. La causa de que el modelo para la frecuencia 3 sea peor para

ARX no está clara, pero podríamos aventurarnos de que la humedad relativa jugó un papel importante en el modelo de regresión.

Tabla 6-12: Modelos de regresión y ARX con mejor ajuste

MODELO	f ₁		f ₂		f ₃	
	Ajuste [%]	R ²	Ajuste [%]	R ²	Ajuste [%]	R ²
Regresión T-P-H	33.5	0.558	22.2	0.394	21.3	0.382
ARX T-P	46.0	0.710	36.2	0.611	-43.2	0.182

6.4.4. Evaluación de ventanas de entrenamiento de modelos.

Un aspecto interesante del análisis de la relación entre frecuencias características y factores ambientales es que dicha relación varía a lo largo del año, posiblemente por el efecto del ángulo de incidencia del sol, el cual varía a lo largo del año. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 6-30 en la sección 6.2.2 en donde la relación de la frecuencia 1 con la temperatura cambia de pendiente en cada mes de análisis. El fenómeno se presenta también para las otras frecuencias y los otros factores ambientales estudiados (presión atmosférica y humedad relativa), aunque el efecto es más notorio para la temperatura.

Por las razones anteriormente expuestas, se decide aplicar el modelo ARX para distintas ventanas temporales, realizando en cada una de ellas un entrenamiento independiente. Los predictores que se utilizan son temperatura y presión atmosférica, los cuales generaron el mejor modelo ARX para coeficientes unitarios. No se evalúan distintos coeficientes para cada uno de los modelos por el importante costo computacional asociado, considerando además que el modelo ARX que utiliza predictores de temperatura y presión atmosférica, para coeficientes unitarios, tuvo un ajuste razonablemente bueno (ajuste = 43.1% y $R^2 = 0.7$).

En la Figura 6-60 se muestran los datos de marzo de 2010 a enero de 2011, divididos en 5 ventanas temporales, y para cada una de ellas se aplicó un modelo ARX. Se adjuntan los valores del coeficiente de ajuste y R^2 para cada modelo.

Evaluación ventanas de entrenamiento ARX

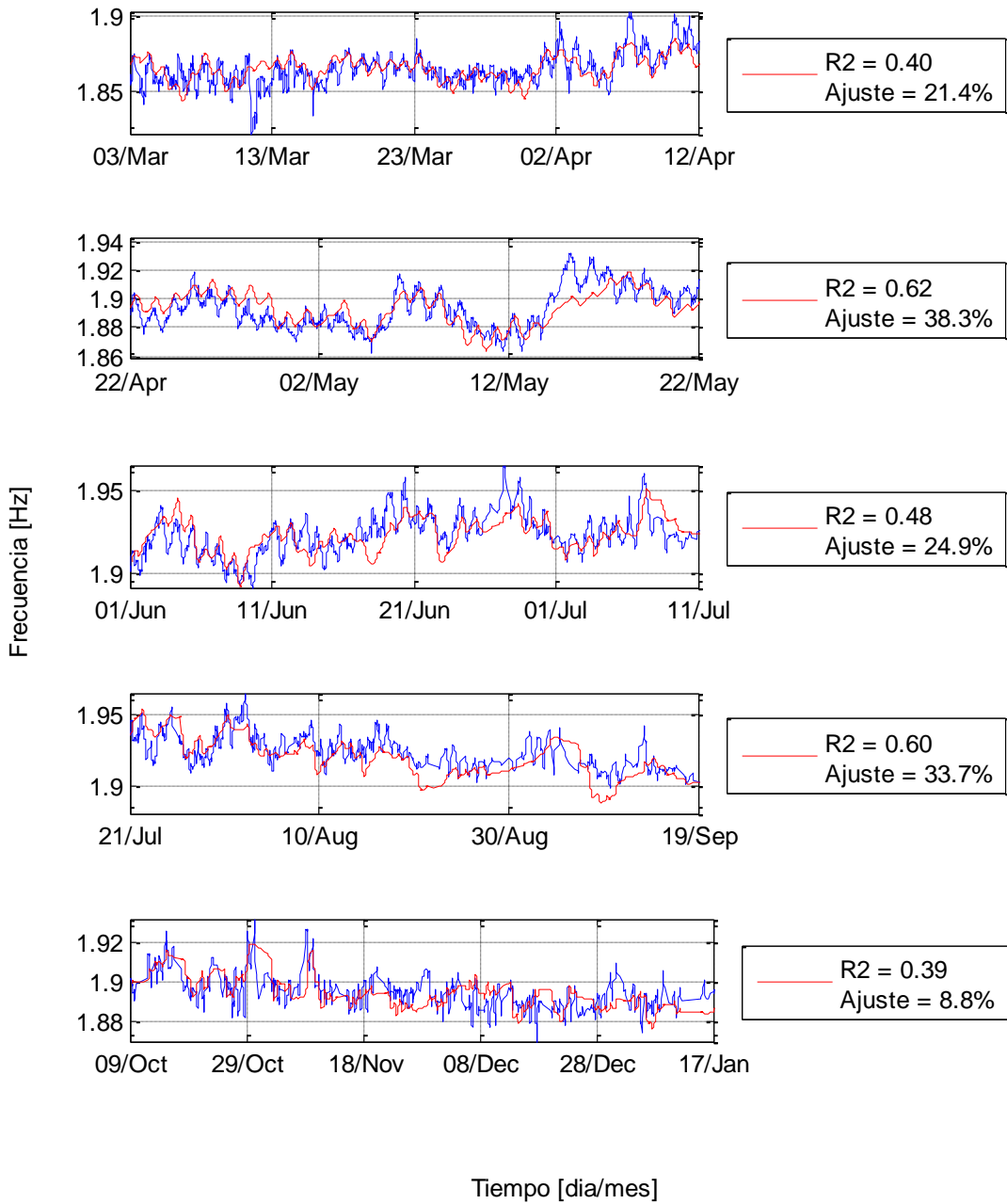


Figura 6-60: Evaluación ventanas de entrenamiento regresión T-P-H

Los resultados anteriores muestran que todos los modelos individuales generados tienen peor ajuste que el modelo realizado para todos los datos juntos.

Por otra parte, se realizó un análisis similar, pero estudiando el efecto de la aplicación de ventanas más pequeñas de entrenamiento (1 mes), para efectos de la validación del modelo. Es decir, se realizaron 9 entrenamientos distintos entre los meses de abril y diciembre de 2010, y cada modelo fue aplicado individualmente a los

respectivos meses del año 2011, y luego uniendo los registros de validación y creando el registro completo de 9 meses. Los resultados se muestran en la Figura 6-61 para el modelo de entrenamiento mensual, mientras que en la Figura 6-62 se muestran el mismo periodo de validación para el modelo de entrenamiento anual.

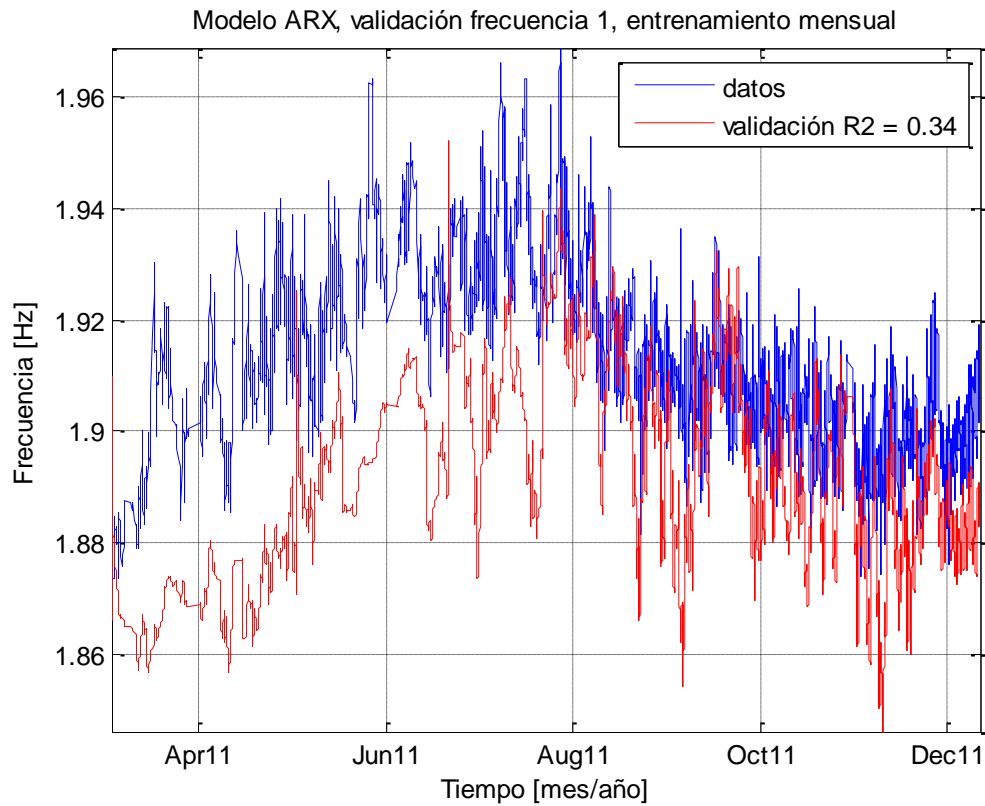


Figura 6-61: Validación modelo ARX, frecuencia 1, entrenamiento mensual

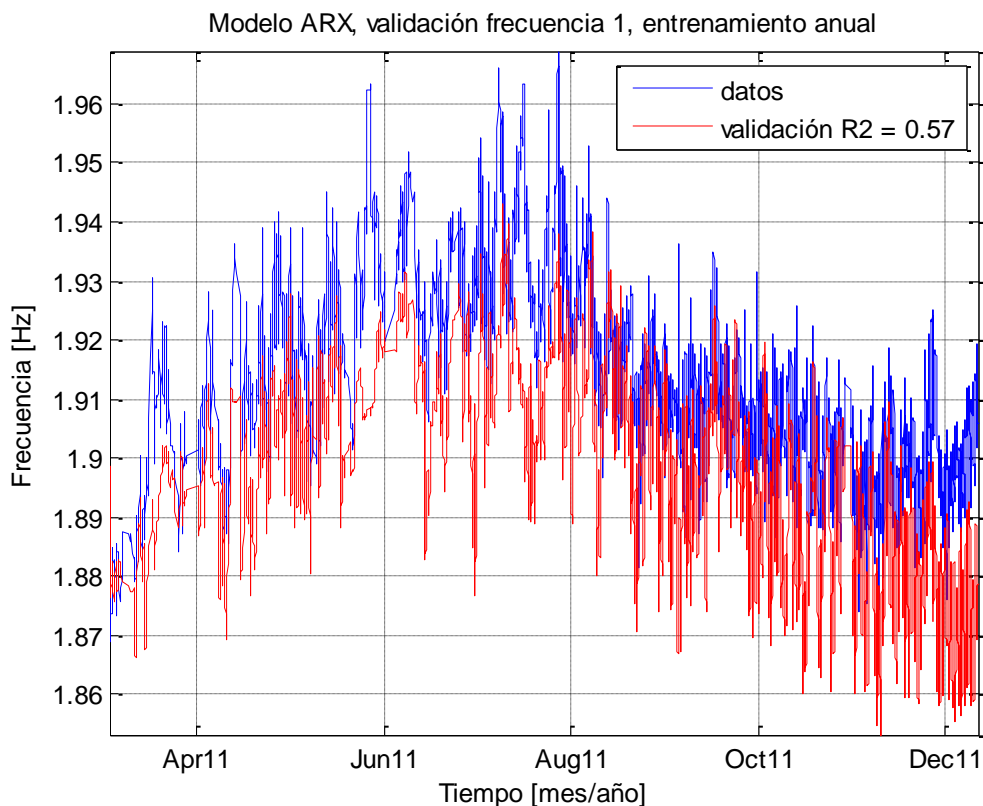


Figura 6-62: Validación modelo ARX, frecuencia 1, entrenamiento anual

Se observa que el modelo de entrenamiento mensual no genera buenos datos de validación, en comparación al modelo de entrenamiento anual, el cual al menos sigue la tendencia estacional de variación de las frecuencias.

Una causa probable de que el entrenamiento por ventanas no funcione, es el hecho de que se asume que el comportamiento entre un mes de un año y el mismo mes del año siguiente será muy similar, pero bajo esta premisa, se está obviando el hecho de que los eventos de lluvia son más bien aleatorios en el tiempo, y por tanto el efecto de la saturación del suelo pasa a tomar un papel importante en el entrenamiento y en la validación. Por esta razón, puede ser más importante poder captar un nivel de variación global (anual) que intentar captar variaciones más puntuales, haciendo entrenamientos por meses.

6.4.5. Modelo ARX no lineal

De manera adicional a los análisis requeridos en esta memoria, se desarrollan modelos predictivos utilizando la metodología ARX no lineal, la cual se define de la siguiente manera:

$$y_k = F(y_{k-1}, y_{k-2}, \dots, u_k, u_{k-1}, u_{k-2}, \dots) + \varepsilon_k \quad (6.1)$$

En donde F es alguna función no lineal, que puede ser determinada con diversos métodos. No se profundizará en la obtención de la función F en esta memoria.

Los modelos son generados con la función *nlarx* en MATLAB, utilizando parámetros n_a, n_b y n_k unitarios. Los resultados se muestran en la Tabla 6-13, mientras que las variaciones porcentuales de la comparación de los modelos ARX lineales y no lineales se muestran en la Tabla 6-14

Tabla 6-13: Coeficientes de ajuste y R2 para modelos ARX no lineal

MODELO	f ₁		f ₂		f ₃	
	Ajuste [%]	R ²	Ajuste [%]	R ²	Ajuste [%]	R ²
T	38.9	0.680	-86.7	0.326	-1138.4	0.698
P	41.7	0.663	28.5	0.525	-20.3	0.004
H	29.4	0.533	-92.8	0.466	-133.3	0.432
T-P	35.1	0.653	-21.9	0.022	-109.6	0.094
T-H	38.4	0.666	-44.9	0.061	-137.9	0.221
P-H	23.8	0.488	-21.1	0.032	-60.5	0.007
T-P-H	33.5	0.619	0.4	0.162	-176.9	0.018
T-P-H-S	59.1	0.835	3.1	0.183	-330.4	0.358

Tabla 6-14: Variaciones porcentuales entre modelos ARX lineal y no lineal

MODELO	f ₁		f ₂		f ₃	
	Ajuste [%]	R ²	Ajuste [%]	R ²	Ajuste [%]	R ²
T	218.0	170.6	168.8	7.6	6.7	22.2
P	83.0	52.3	57.5	22.4	-2040.7	-196.0
H	225.8	-2.9	131.4	191.5	123.6	162.5
T-P	-20.5	-7.4	120.6	-181.0	200.0	133.2
T-H	264.5	15.6	185.2	-122.7	172.0	94.2
P-H	-35.8	-19.9	26.5	-115.8	166.5	-194.5
T-P-H	-22.7	-10.1	203.0	-70.0	199.6	-50.3
T-P-H-S	27.6	16.1	225.4	-61.7	200.0	171.9

Se observa de la tabla anterior, que en comparación a los modelos ARX lineales, existe una mejora significativa de algunos modelos de la frecuencia 1, en particular el modelo que utiliza la temperatura como predictor. Sin embargo, los coeficientes de ajustes no son excepcionalmente altos, y no son mayores al modelo ARX lineal que utiliza como predictores temperatura y presión atmosférica (Tabla 6-11). Por otra parte, los modelos generados para las frecuencias 2 y 3 tienen coeficientes de ajustes muy bajos, muchos de ellos negativos, por lo que en general los resultados no son satisfactorios.

De la Figura 6-63 a la Figura 6-65, se grafican los modelos que utilizan como predictor la temperatura y aquellos modelos que presentan mayor ajuste. Para la frecuencia 1 los modelos permiten describir la tendencia de variación de las frecuencias, aunque hacia el final del periodo existen perturbaciones importantes en las frecuencias modeladas. Los modelos para las frecuencias 2 y 3 muestran resultados poco satisfactorios.

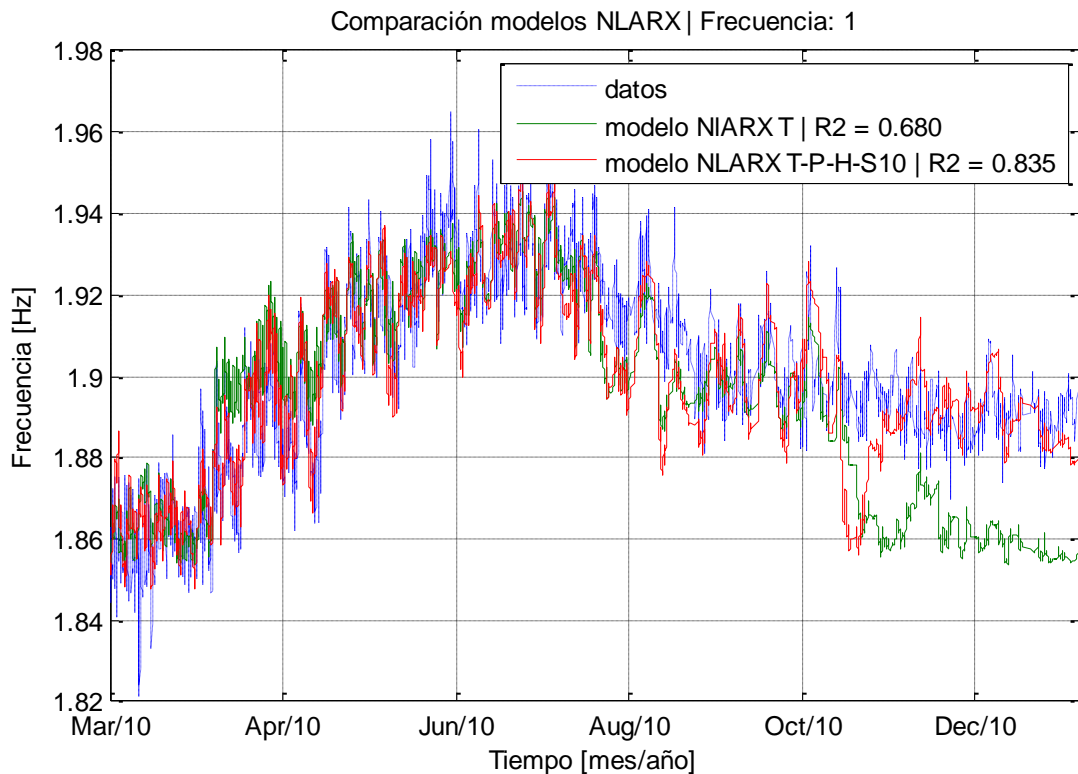


Figura 6-63: Modelos NLARX T y T-P-H, frecuencia 1

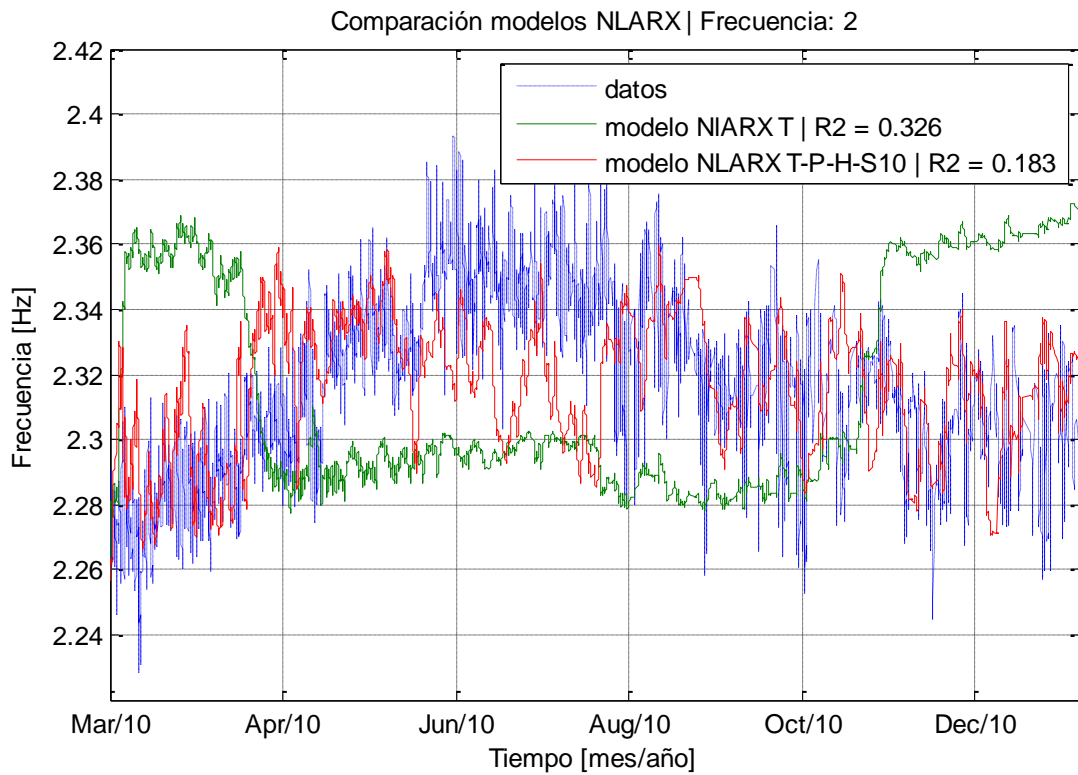


Figura 6-64: Modelos NLARX T y T-P-H, frecuencia 2

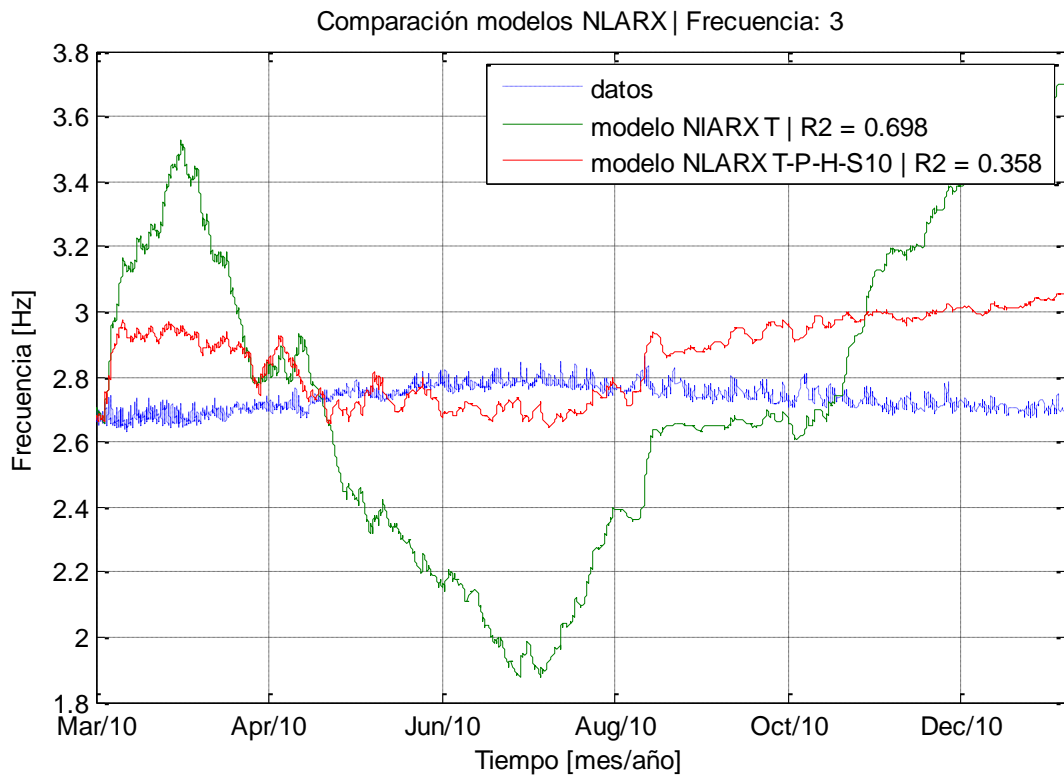


Figura 6-65: Modelos NLARX T y T-P-H, frecuencia 3

6.5. Detección de daño con modelos predictivos

El objetivo del estudio y la generación de modelos predictivos de frecuencias, es desarrollar una metodología que permita detectar daño estructural mediante la identificación de pequeños cambios en las frecuencias características de las estructuras.

La base del método está en asumir que las variaciones diarias y estacionales de las frecuencias son producidas por los efectos ambientales, por lo que dichas variaciones se podrían predecir conociendo tales variables. Una vez establecidos los modelos de predicción, las variables predichas se comparan con las variables medidas, y si existe una variación significativa entre lo medido y lo predicho, se asume que esa variación fue producida porque ocurrió daño en la estructura.

Así, a continuación se muestran figuras que representan tanto el entrenamiento (primer año de registro) como la validación (segundo año de registro) de los modelos, y paralelamente, se grafica el error que resulta de restar los modelos con los valores medidos, limitado por valores que representan un intervalo de 95% de confianza en donde se encuentra el error del primer año. Por otra parte, el error para el periodo de validación de cada modelo se grafica de manera independiente, en conjunto con la saturación del suelo, para observar la influencia que tienen los eventos de precipitación en las variaciones de las frecuencias características, y la importancia de considerar el efecto de la saturación del suelo en los modelos predictivos.

La detección de daño se realiza si el error del periodo de validación (segundo año de registro) cae fuera de los límites establecidos.

De la Figura 6-66 a la Figura 6-75, se muestra lo anteriormente explicado para los mejores modelos de regresión multiparamétrica y ARX, caracterizados en 6.4.3, exceptuando el modelo ARX para la frecuencia 3 por tener un ajuste muy bajo en relación a los otros modelos, por lo que entrega resultados poco útiles.

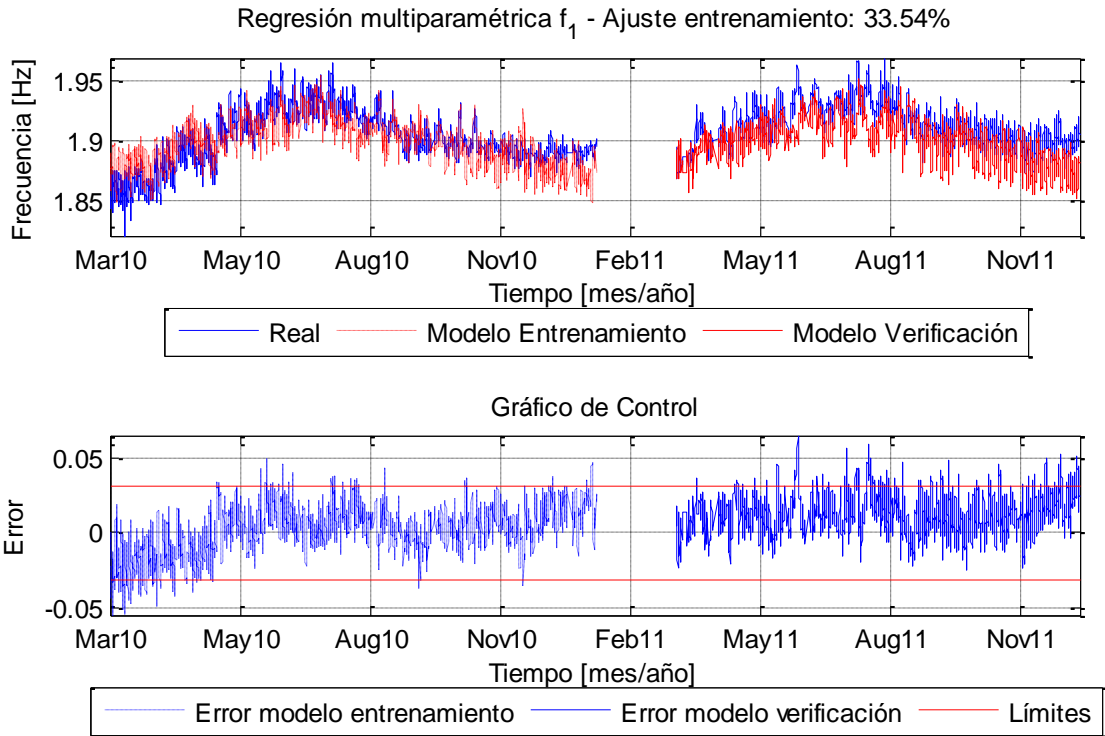


Figura 6-66: Identificación de daño, frecuencia 1. Modelo regresión con T-P-H

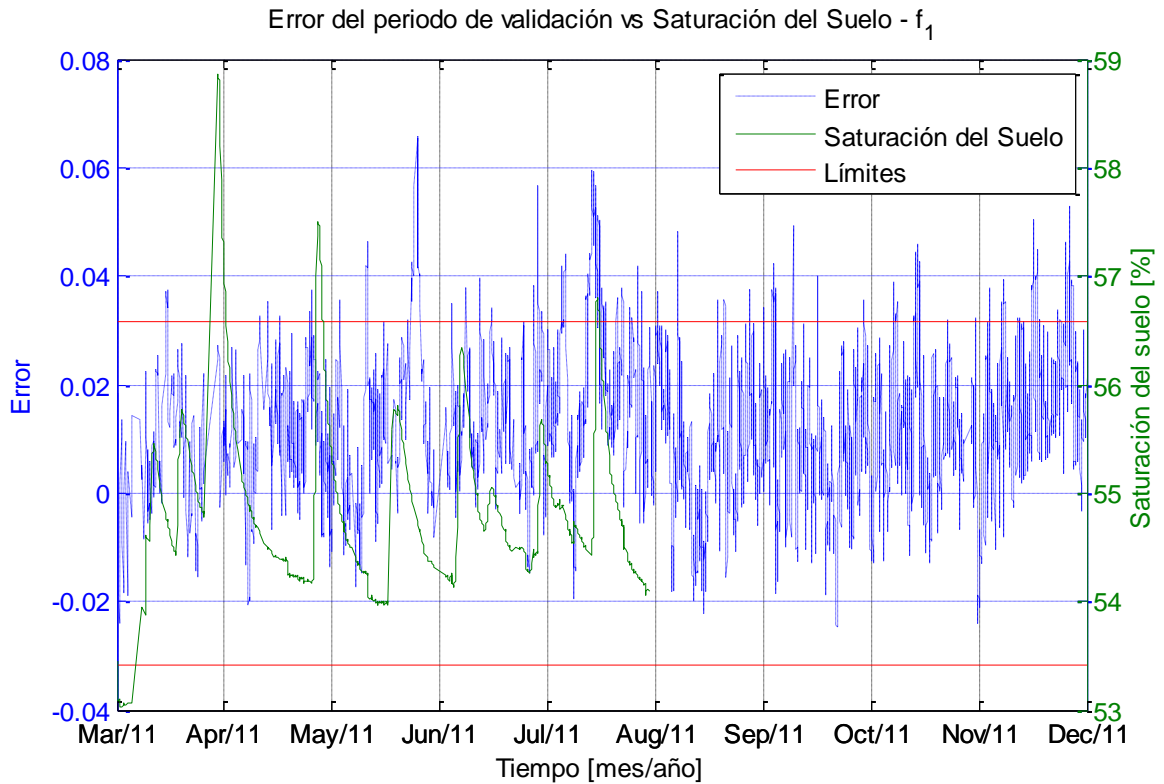


Figura 6-67: Error periodo de validación modelo regresión- frecuencia 1

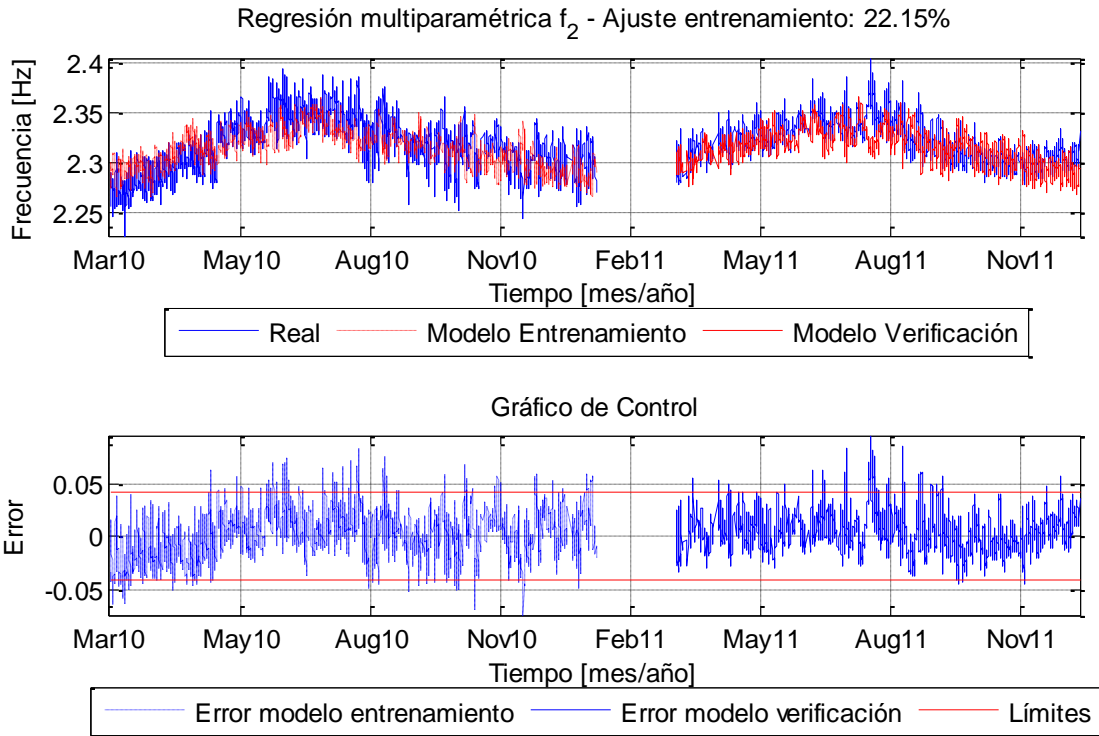


Figura 6-68: Identificación de daño, frecuencia 2. Modelo regresión con T-P-H

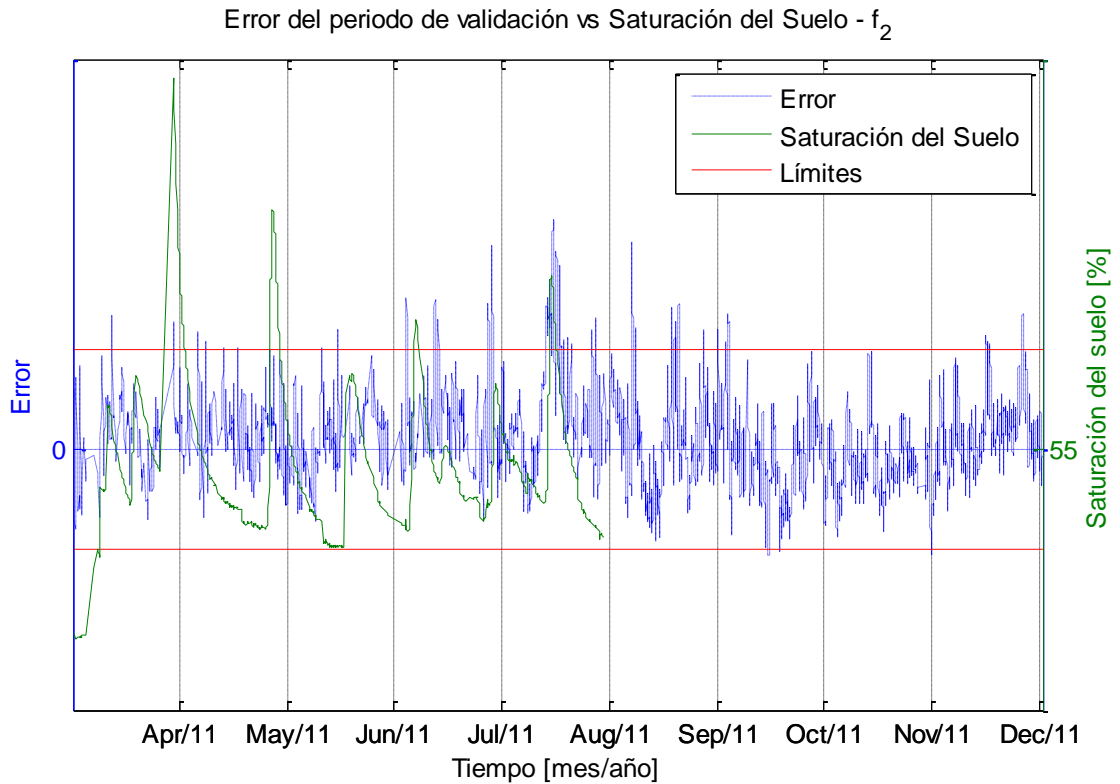


Figura 6-69: Error periodo de validación modelo regresión - frecuencia 2

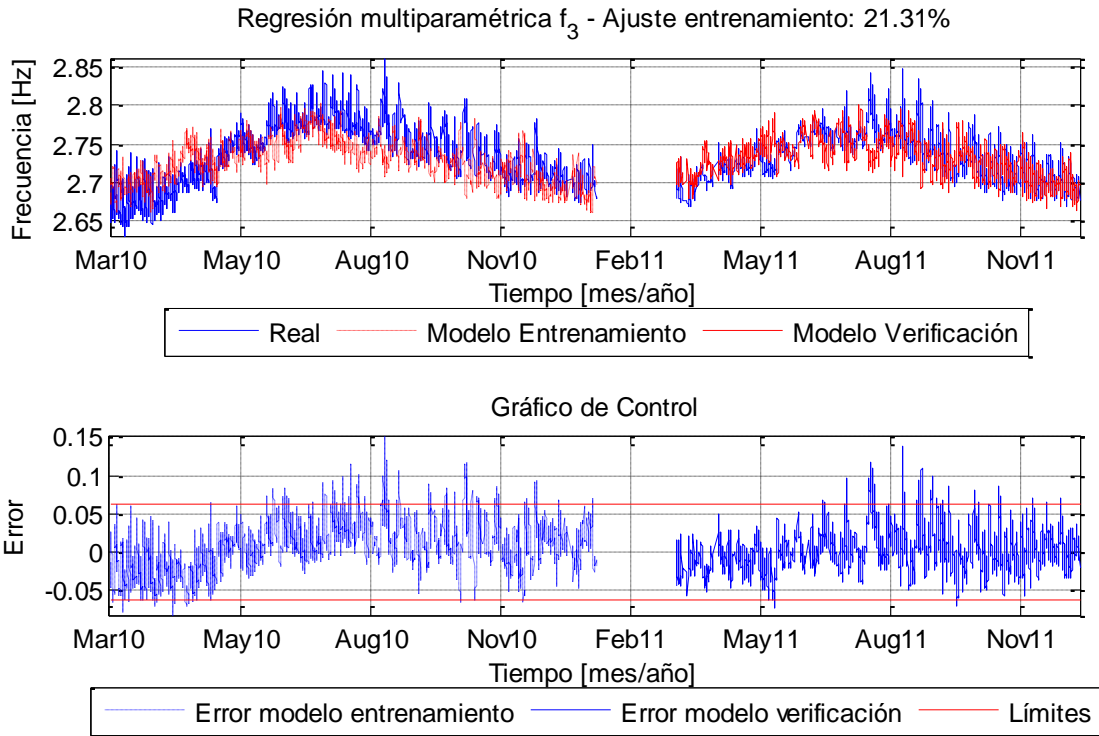


Figura 6-70: Identificación de daño, frecuencia 3. Modelo regresión con T-P-H

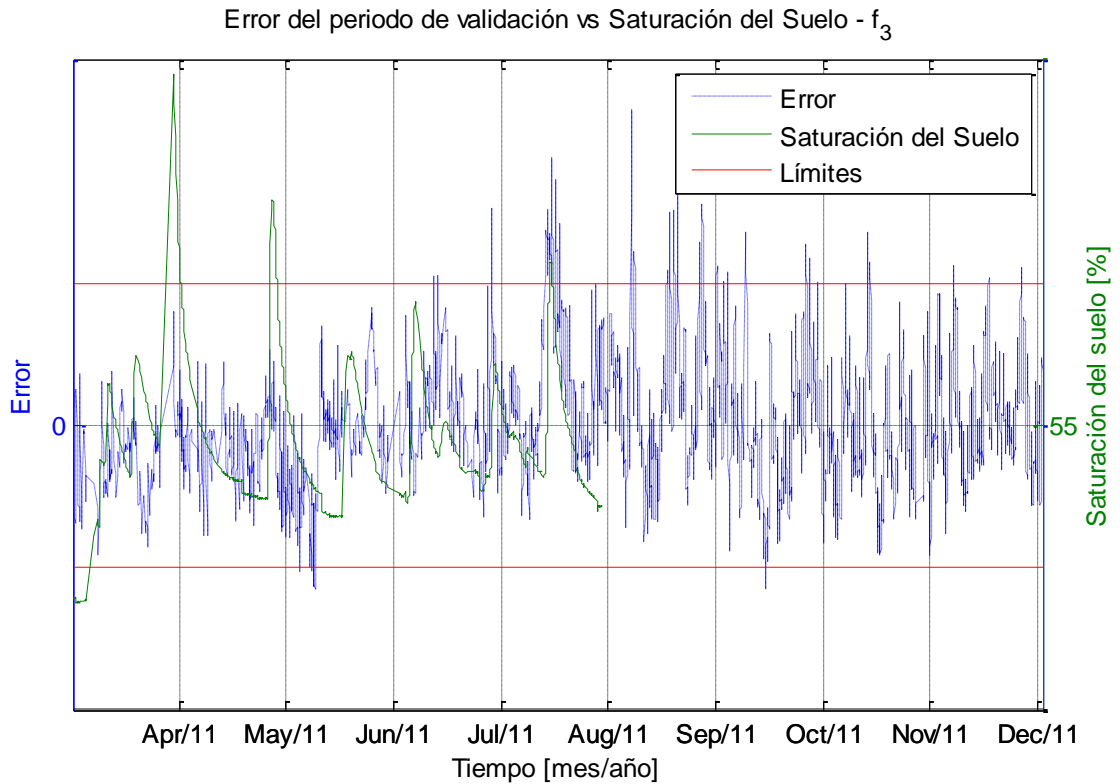


Figura 6-71: Error periodo de validación modelo regresión - frecuencia 3

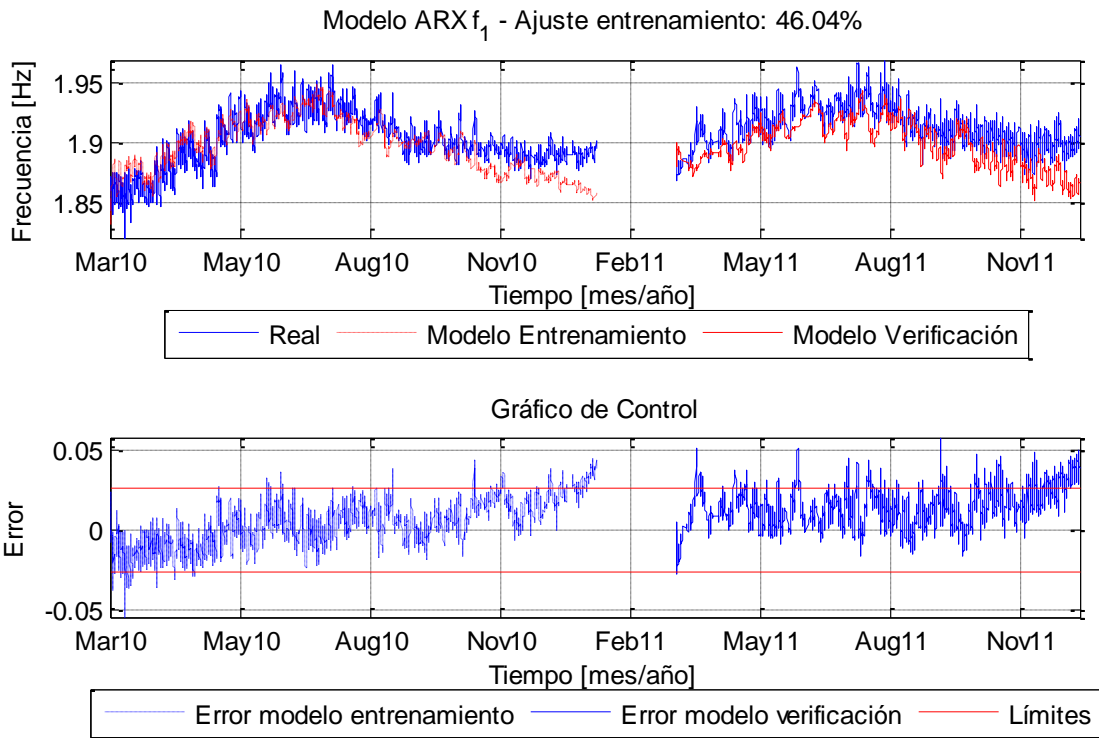


Figura 6-72: Identificación de daño, frecuencia 1. Modelo ARX con T-P

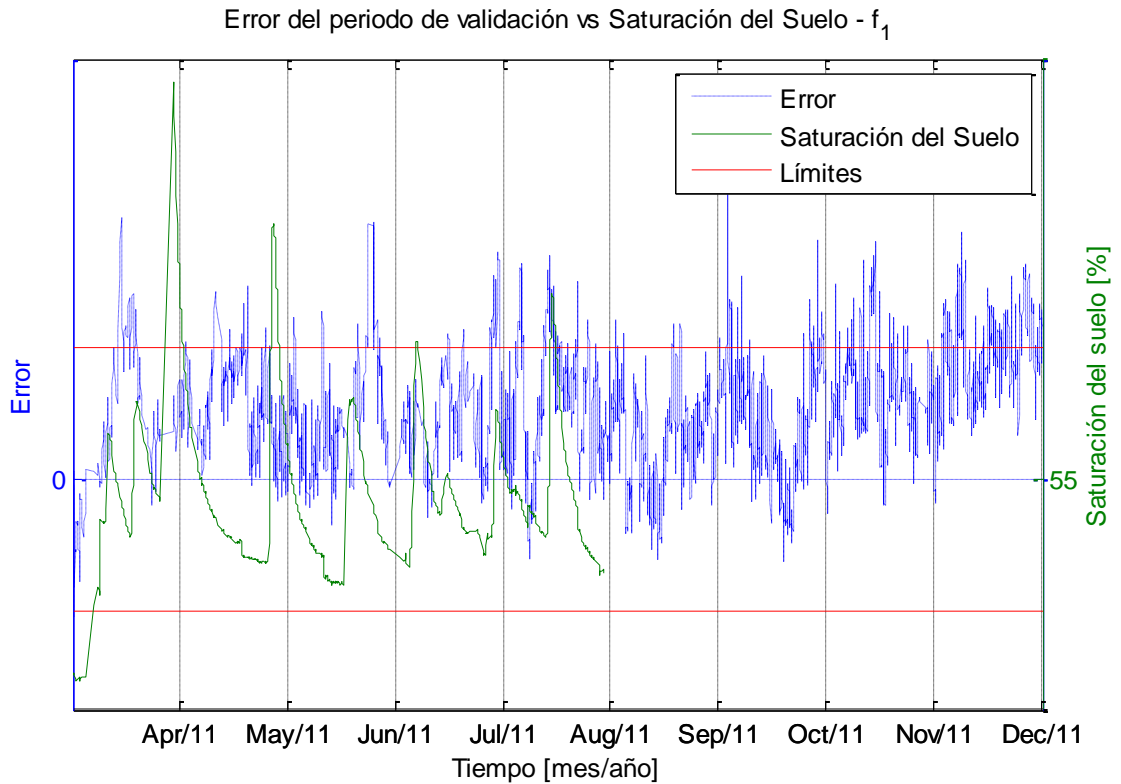


Figura 6-73: Error periodo de validación modelo ARX - frecuencia 1

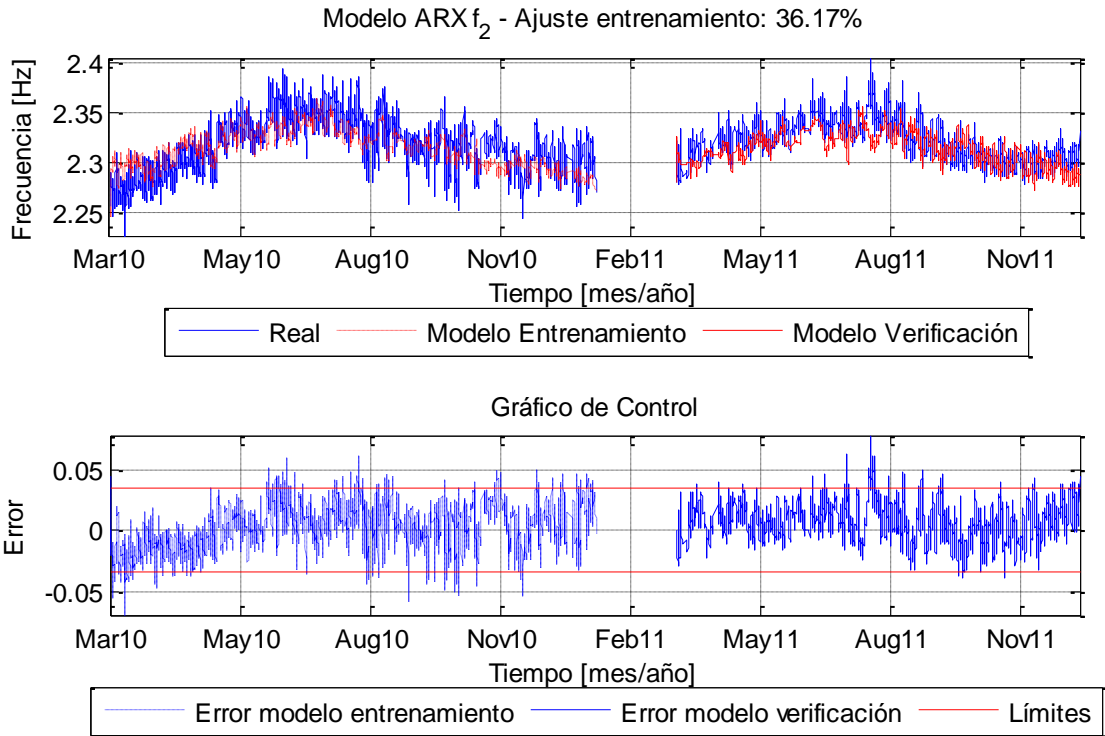


Figura 6-74: Identificación de daño, frecuencia 2. Modelo ARX con T-P

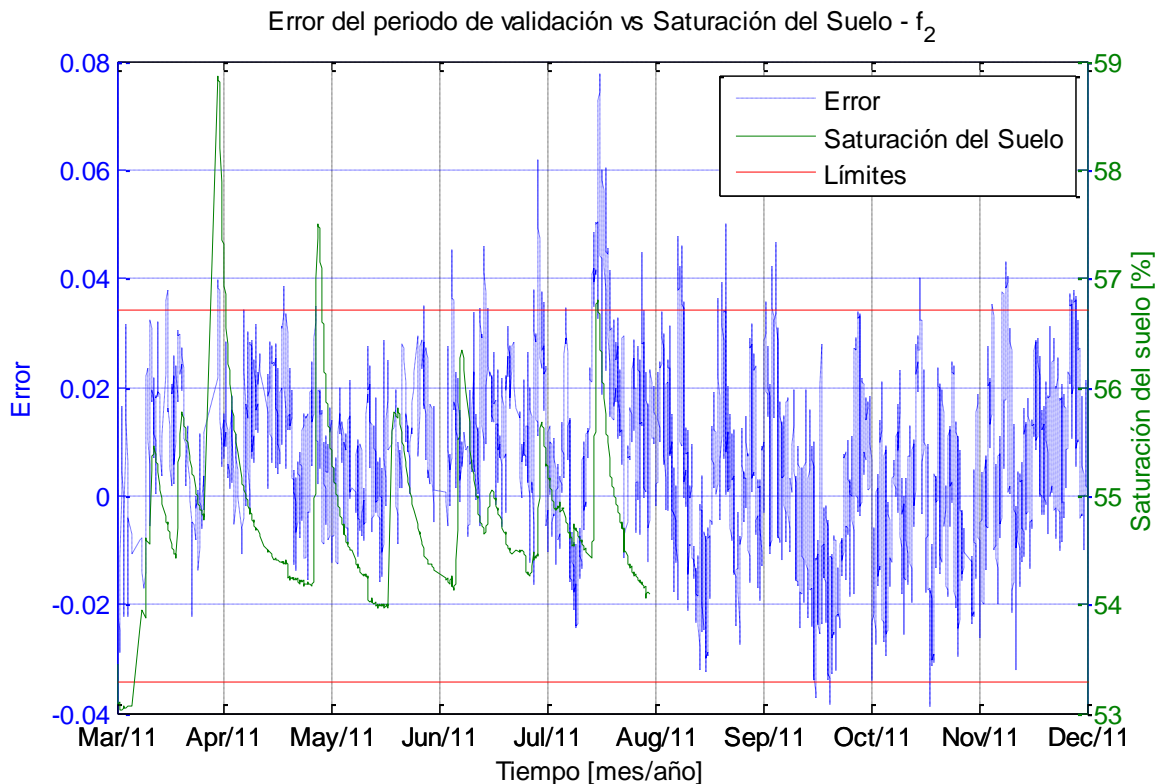


Figura 6-75: Error periodo de validación modelo ARX - frecuencia 2

En cuanto a la utilidad de la regresión multiparamétrica se observa que para las 3 frecuencias estudiadas, los datos de validación tienen buena concordancia con los datos medidos de la estructura, y en general siguen el patrón estacional de variación de las frecuencias. En cambio, el modelo ARX para la frecuencia 1, muestra una desviación en la predicción de las frecuencias hacia el final del periodo de validación, lo que produce una alerta de daño notoria. Por otra parte, el modelo ARX para la frecuencia 2 se muestra más estable durante todo el periodo de validación.

La desviación que se observa hacia el final del año de validación para el modelo ARX de la frecuencia 1, es probable que sea producto de la flexibilización de la estructura producto del 27F, lo cual produjo que las frecuencias cayeran en el periodo posterior al terremoto, para posteriormente estabilizarse nuevamente. Esta variación de frecuencias en el año de entrenamiento, produjo que el modelo considerara este efecto como normal, y que por ende, una variación normal hacia el final del segundo año de datos, sea considerada anormal, y genere una alerta de daño.

En todos los modelos, en el periodo cercano al mes de Agosto de 2011 (invierno 2011), se observa que el indicador de daño sobrepasa los límites notoriamente en varias ocasiones, lo que indica que existe una variación de frecuencias importante debido a otro factor que no es la temperatura. En los gráficos del error en el periodo de validación vs saturación del suelo, se aprecia cómo el indicador de daño sobrepasa los límites en periodos que coinciden con eventos de aumentos de saturación del suelo, lo cual indica que el efecto de las precipitaciones y el consiguiente aumento de saturación del suelo influye en los cambios de frecuencia de manera considerable.

Por lo tanto, se concluye que el efecto de la saturación del suelo es un factor muy importante de considerar si se quiere generar un sistema confiable de detección de daño, pero para ello se requieren datos confiables de saturación del suelo para poder establecer un patrón de comportamiento de las frecuencias con respecto a la saturación. Con la información que se posee es difícil establecer ese patrón, considerando además que los datos de saturación se encuentran hasta agosto de 2011.

A partir de lo observado en los modelos generados, se puede decir que los métodos de regresión multiparamétrica y autoregresivo son potencialmente útiles, pero

para una correcta utilización se requieren una mayor cantidad de datos de entrenamiento, de un periodo en que la estructura no se haya visto alterada, como fue el caso del 27F. Además, es importante para generar buenos modelos considerar el efecto de la saturación del suelo, puesto que la variación en las frecuencias que producen los eventos de lluvia es considerable.

6.6. PCA

Para evaluar la metodología basada en el análisis de las componentes principales, en una primera instancia se evalúan los datos post terremoto ya que es el periodo en que se tienen más registros, considerando además que el método requiere de un periodo de entrenamiento de al menos 1 año, de tal manera que se capturen todas las variaciones debido a efectos ambientales, tanto diarias como estacionales. Los registros post terremoto abarcan un periodo de 22 meses, los cuales se muestran en la Figura 6-76. Los datos utilizados son los originales generados por el proceso de identificación SSI_COV, para posteriormente utilizar los datos suavizados con la utilización de la media móvil en un análisis aparte.

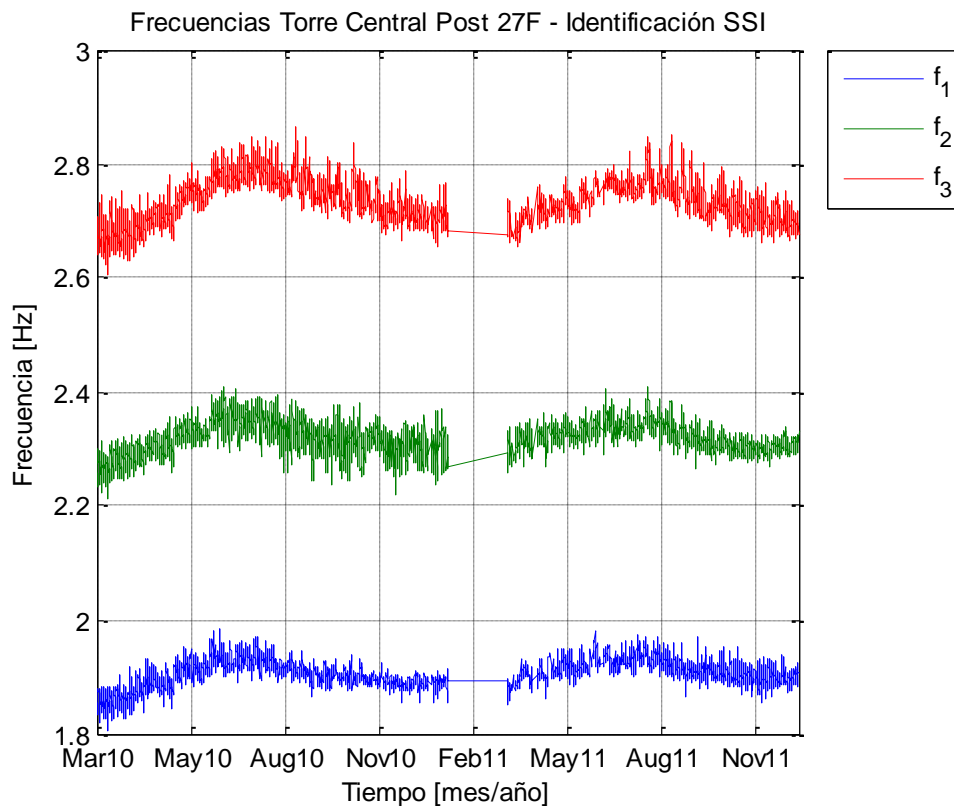


Figura 6-76: Frecuencias Torre Central Post 27F - Identificación SSI

En primer lugar, se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar distintos periodos de entrenamiento, y determinar la cantidad de datos mínimos de entrenamiento para obtener resultados útiles. Así, se consideran periodos de 1, 3, 6, 9 y 12 meses de entrenamiento, mientras que el resto de los datos en cada uno de los casos se utilizan para la validación del método. Los resultados de los gráficos de control

se muestran en la Figura 6-77. Como se describió en la sección 2.3, los gráficos de control son un medio para determinar la existencia de daño estructural mediante la evaluación del *Novelty Index*, y la determinación de si este índice sobrepasa los valores establecidos por UCL y LCL. En éstos gráficos se puede apreciar que a pesar de que en el periodo de aplicación del método no existió algún evento sísmico de magnitud considerable que pudiera suponer la existencia de daño estructural, hay una cantidad importante de índices que sobrepasan los límites superior e inferior, los cuales se definen como falsos positivos, pues a pesar de que el método indica la ocurrencia de daño, éste realmente no existe.

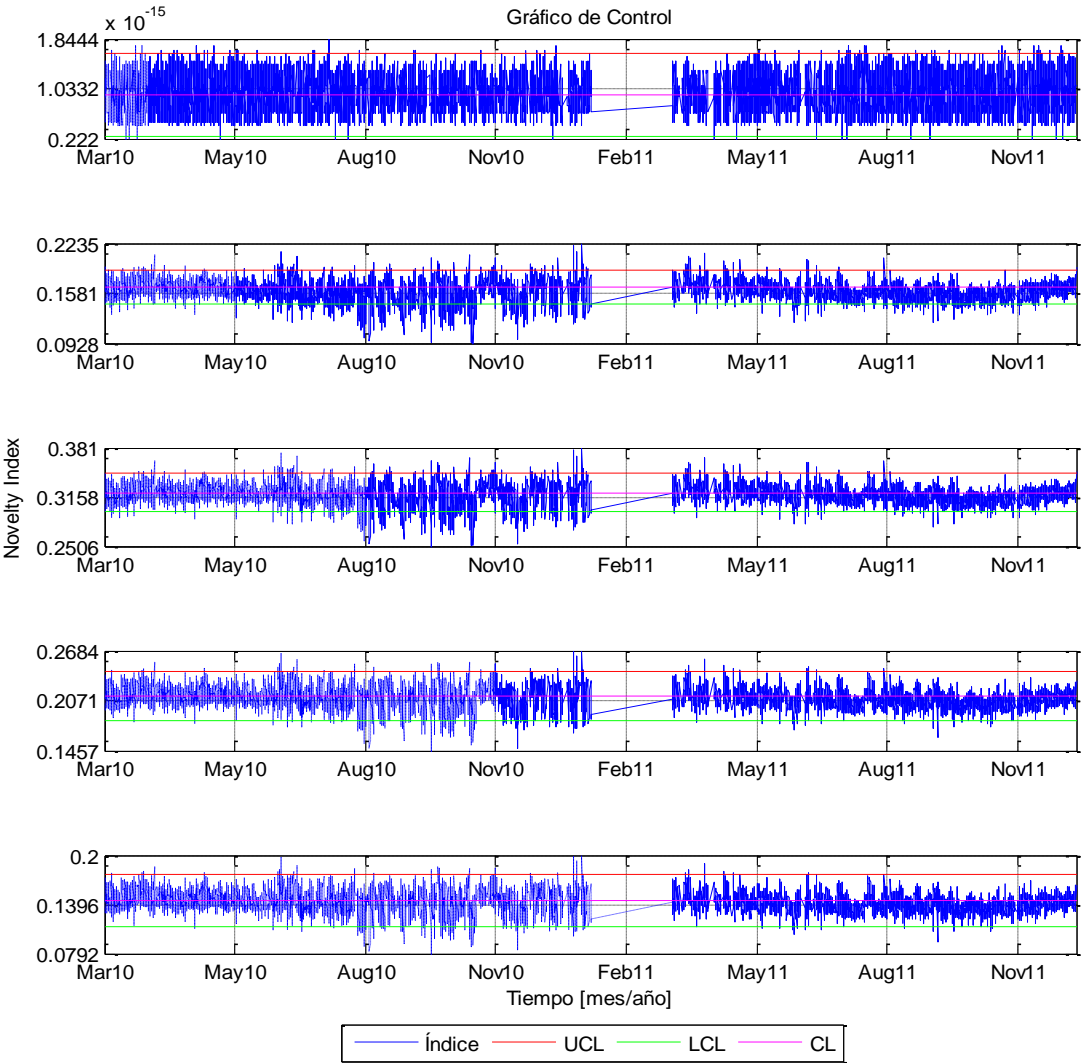


Figura 6-77: Gráficos de Control para 1, 3, 6, 9 y 12 meses de entrenamiento. Novelty Index achurado corresponde al tiempo de entrenamiento de cada gráfico.

En la Tabla 6-15 se muestra el número de veces en que el Novelty Index sobrepasa los límites superior o inferior para cada tiempo de entrenamiento. Es claro que a medida que el entrenamiento es mayor, la cantidad de falsos positivos disminuye. Sin embargo, es necesario notar que para 1 mes de entrenamiento la cantidad de falsos positivos es menor que para 3 y 6 meses de entrenamiento, y es igual que para 9 meses de entrenamiento. Lo anterior pudo haber ocurrido producto de que en el primer mes de entrenamiento (marzo de 2010) la variación de las frecuencias haya reflejado un comportamiento similar a un año completo de variación, lo que podría haber producido una matriz de rotación similar a los casos con más tiempo de entrenamiento. De todas maneras esta situación sería excepcional dado que el método requiere al menos 1 ciclo completo de variación de las propiedades dinámicas para lograr eliminar los efectos del medio ambiente [Magalhães, 2010], tal como se observa en el caso de 12 meses de entrenamiento, en donde el número de falsos positivos se reduce drásticamente.

Tabla 6-15: N° de falsos positivos en función del tiempo de entrenamiento

N° meses entrenamiento	N° falsos positivos
1	102
3	1546
6	596
9	102
12	30

El resultado anterior demuestra lo que se presenta en la literatura con respecto al tiempo de entrenamiento del método, ya que éste debe captar las variaciones de las frecuencias debido a los efectos ambientales, los cuales presentan un ciclo de 1 año.

Sin embargo, es claro que el resultado no es satisfactorio dada la alta cantidad de falsos positivos, lo cual se puede deber a diversos factores, tales como la influencia de los sismos en los registros ambientales, la influencia de la lluvia en la rigidez del suelo de fundación, la calidad del proceso de identificación, etc. A continuación se analiza la influencia que tienen los factores antes mencionados en la capacidad del método de detectar daño estructural.

6.6.1. Influencia de los sismos en la detección de daño

Durante el periodo de análisis de las frecuencias características de la Torre Central, se cuenta con 1782 registros de eventos sísmicos [León, 2013], los cuales perturban el registro de vibraciones ambientales y pueden alterar el cálculo de las frecuencias características de la estructura. Por esta razón, se evalúa la metodología PCA para el periodo post 27F, pero extrayendo los registros de frecuencia influenciados por sismos.

En la Figura 6-78 se muestra de manera conjunta las frecuencias de la Torre Central durante el periodo de entrenamiento y evaluación, y el gráfico de control durante el mismo periodo, para un entrenamiento de 12 meses.

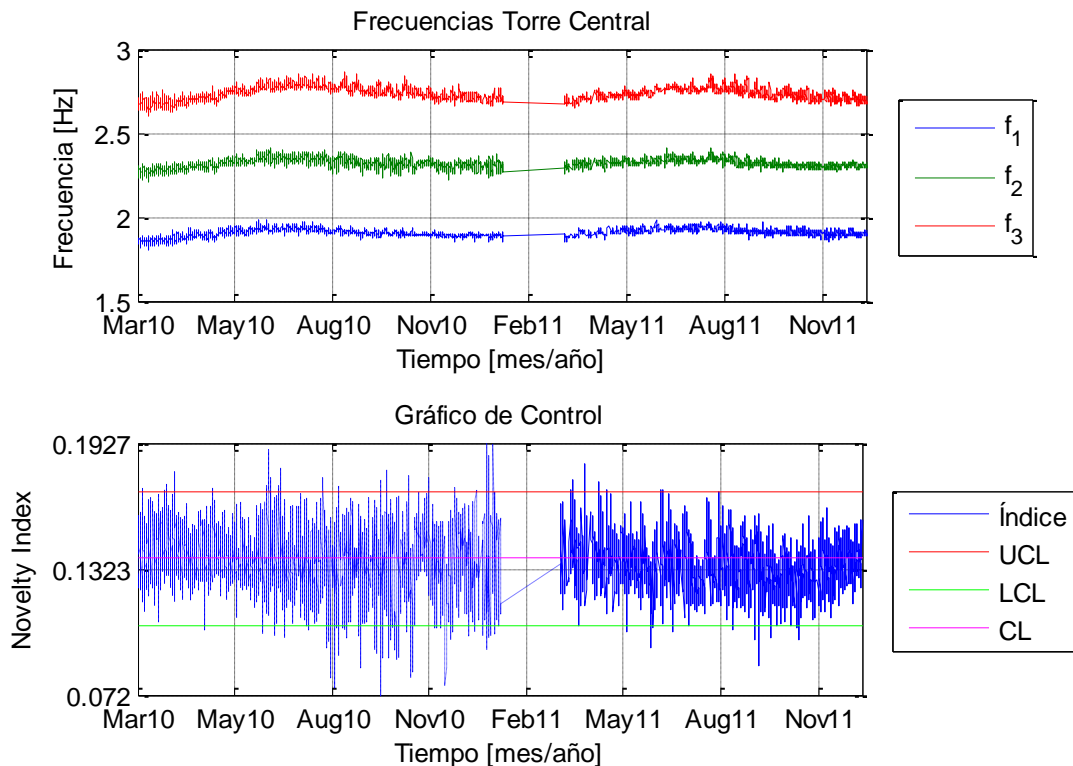


Figura 6-78: Frecuencias Torre Central y Gráfico de Control, sin sismos. Entrenamiento 12 meses.

Los resultados de este análisis muestran que el número de falsos positivos disminuye de 30 a 24, al no considerar los registros de frecuencias que están influenciados por sismos, lo que corresponde a una disminución de un 20%, pero que sin embargo, no explica la gran cantidad de falsos positivos que entrega el método, por

lo que se puede inferir que el efecto que tienen los sismos sobre la identificación del daño con el método PCA es menor.

6.6.2. Influencia de la lluvia en la detección de daño estructural.

Para determinar la influencia de la lluvia en la detección de daño estructural mediante el método PCA, se extraen de los registros de frecuencia aquellos datos que fueron generados en el momento en que se registró lluvia o dentro de 7 días después de un evento de lluvia. De esta manera, se aplica PCA con un entrenamiento de 12 meses y se genera el gráfico de control correspondiente, el que se muestra en la Figura 6-79 junto a las frecuencias con los efectos de lluvia extraídos.

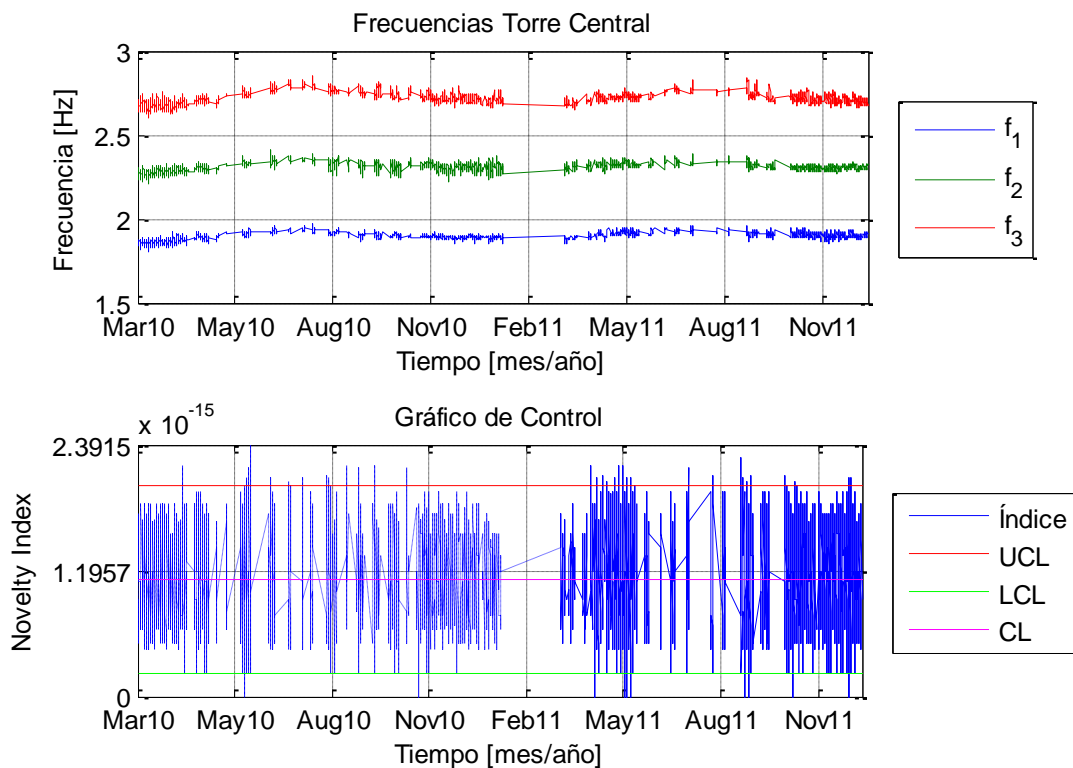


Figura 6-79: Frecuencias Torre Central y Gráfico de Control, sin lluvia. Entrenamiento 12 meses.

Como se puede apreciar de la figura anterior, al extraer los datos influenciados por los efectos de lluvia se elimina una parte importante de los datos, y al existir menos datos de entrenamiento, la matriz de transformación que se genera a partir de ese entrenamiento no logra captar la tendencia de variación de las frecuencias. Lo anterior se traduce en que existan más falsos positivos que el caso base (entrenamiento con todos los efectos incluidos), contando 66 casos en total.

Por otra parte, si se realiza un segundo análisis en el cual el entrenamiento se realiza con todos los datos, pero la evaluación se realiza sobre los datos con los efectos de lluvia eliminados, el número de falsos positivos disminuye a 8, lo que indica que el efecto que tiene el cambio de rigidez del suelo de fundación producto de los eventos de lluvia es muy significativo en relación a la aplicación de PCA, dado que produce variaciones de frecuencias que gatillan falsos eventos de daño.

Otros efectos que podrían influir en la presencia de una gran cantidad de falsos negativos producto de la lluvia son:

- El entrenamiento es insuficiente, ya que es posible que el método no logre captar la estacionalidad de la lluvia, y por ende, lo considere como una variación anómala.
- Dado que el número de componentes principales es igual al número de frecuencias consideradas para el análisis (3 frecuencias), como máximo es posible eliminar los 2 efectos que produzcan mayor variabilidad en los datos, pues se asume que la variabilidad a lo largo de la tercera componente principal es producida por otros factores, entre los cuales se encuentra el daño. Por esta razón, es posible que el efecto de la lluvia no sea factible eliminarlo, considerando que la primera componente principal está en la dirección de la variabilidad producida por la temperatura.

A pesar de que se obtienen buenos resultados al eliminar el efecto de la lluvia, con un entrenamiento con los datos originales, eliminar esa cantidad de datos es poco útil (para eliminar el efecto de lluvia se eliminan 14183 de un total de 33954 datos analizados), porque se elimina gran parte del tiempo en que es posible que pueda haber ocurrido daño, el cual no se habría identificado.

6.6.3. Influencia de la calidad del proceso de identificación en la detección de daño estructural.

Otro factor que tiene una influencia importante en la eficacia de PCA es la calidad y robustez del proceso de identificación, pues el nivel de variaciones que se registran tanto por los efectos ambientales como por los efectos del daño es pequeño,

por lo que se debe tener una identificación estable. Para analizar este factor, se utilizan los registros recalculados mediante la aplicación de una media móvil, descrita en 6.1.1.

Si se aplica PCA al registro de frecuencia recalculado con media móvil, se obtiene el resultado de la Figura 6-80, de donde el gráfico de control muestra que el Novelty Index sólo sobrepasa los límites 9 veces, lo cual significa una reducción considerable en comparación al caso base.

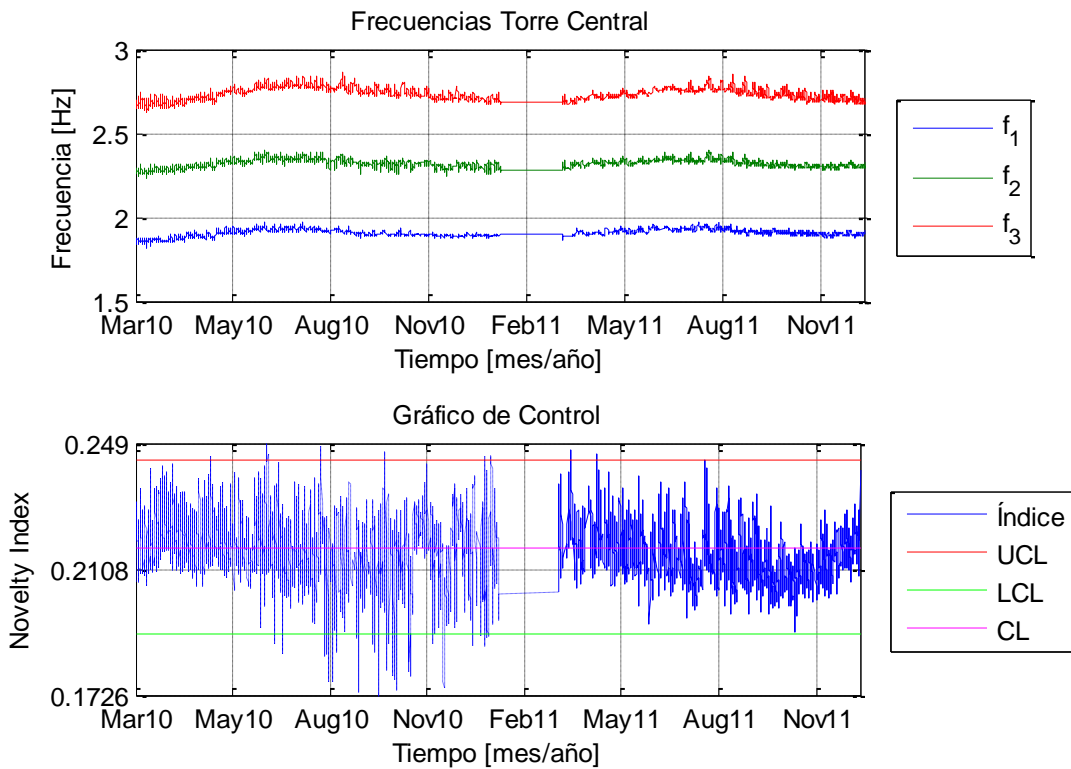


Figura 6-80: Frecuencias Torre Central y Gráfico de Control, media móvil. Entrenamiento 12 meses.

6.6.4. Representación gráfica método PCA

Finalmente, para complementar la comprensión del método PCA, de la Figura 6-81 a la Figura 6-83 se muestran las relaciones bidimensionales entre las frecuencias características de la estructura, destacando los datos que están influenciados con lluvia.

Se observa claramente la tendencia de variación en una dirección predominante, la cual es aquella dominada por las variaciones de temperatura. Además, se observa que la precipitación genera un aumento de las frecuencias características, las que varían en la dirección principal de variación.

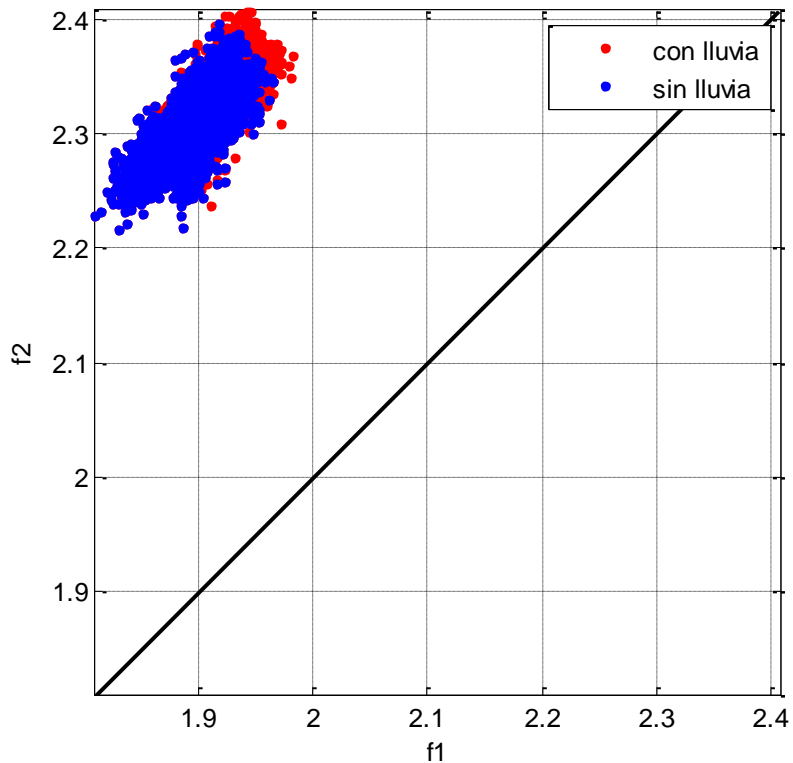


Figura 6-81: Relación frecuencias 1 y 2

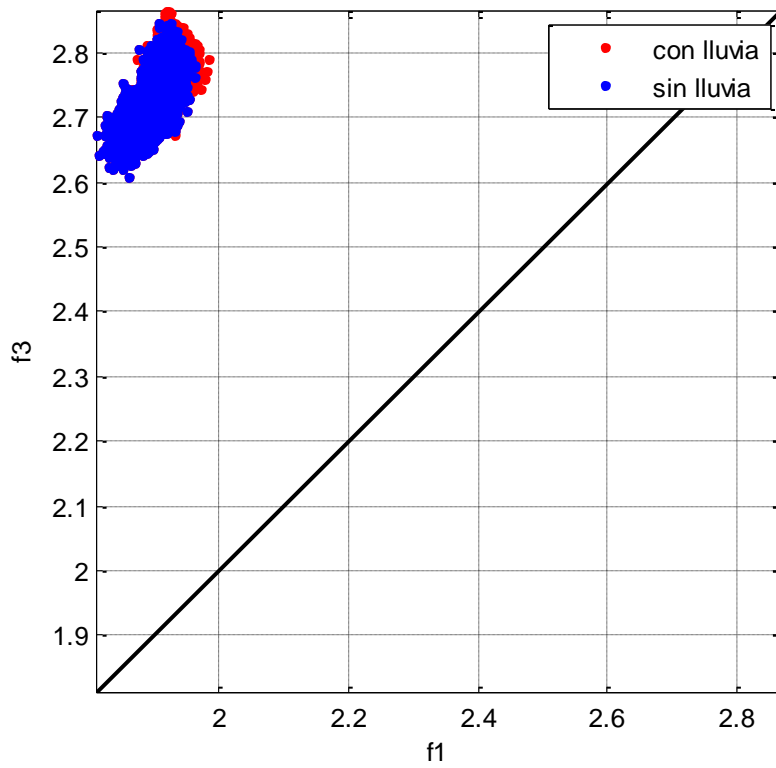


Figura 6-82: Relación frecuencias 1 y 3

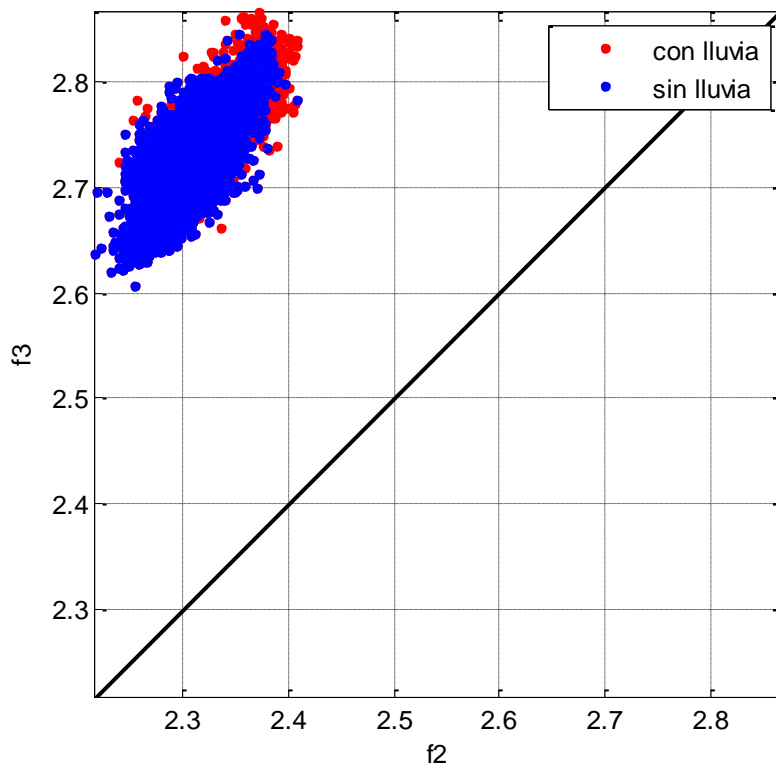


Figura 6-83: Relación frecuencias 2 y 3

Desde la Figura 6-84 a la Figura 6-86 se grafican las relaciones de las frecuencias en 3 dimensiones en distintas perspectivas, en donde se aprecia de igual manera que existe una dirección principal de variación, y dos direcciones de variación de menor magnitud, formando una figura geométrica con forma ovoidal.

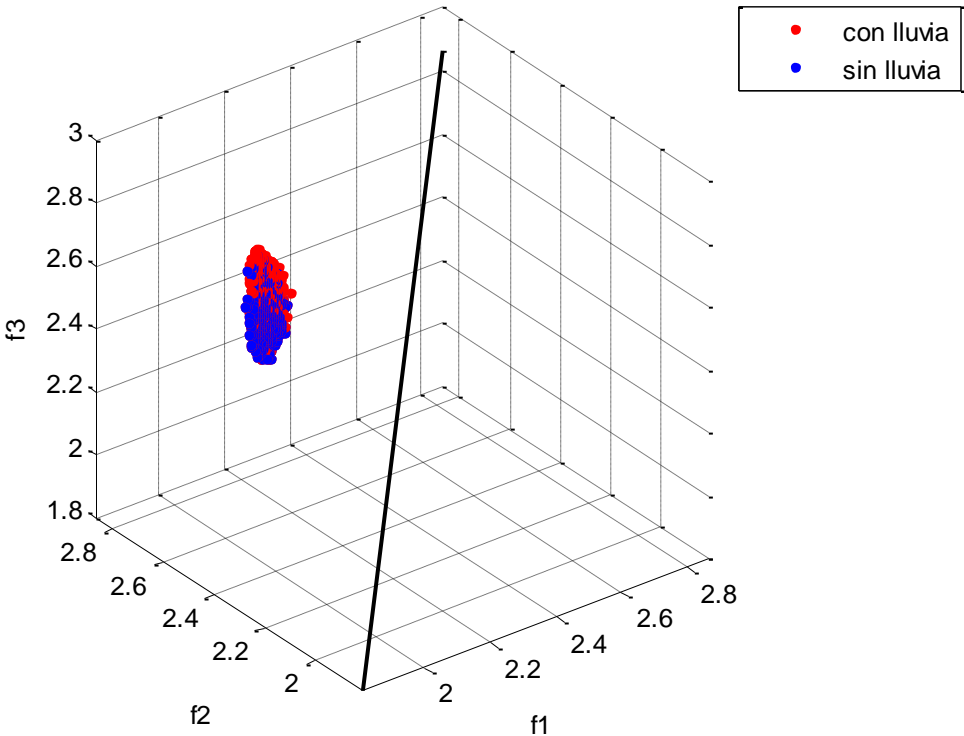


Figura 6-84: Relación frecuencias 1, 2 y 3

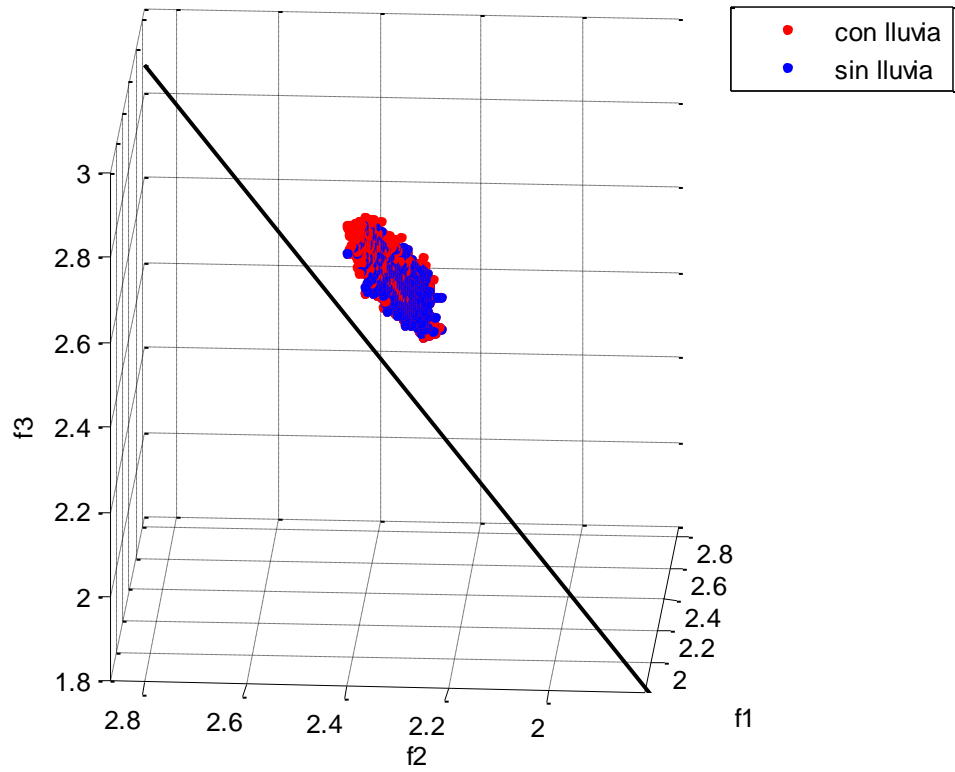


Figura 6-85: Relación frecuencias 1, 2 y 3 (2)

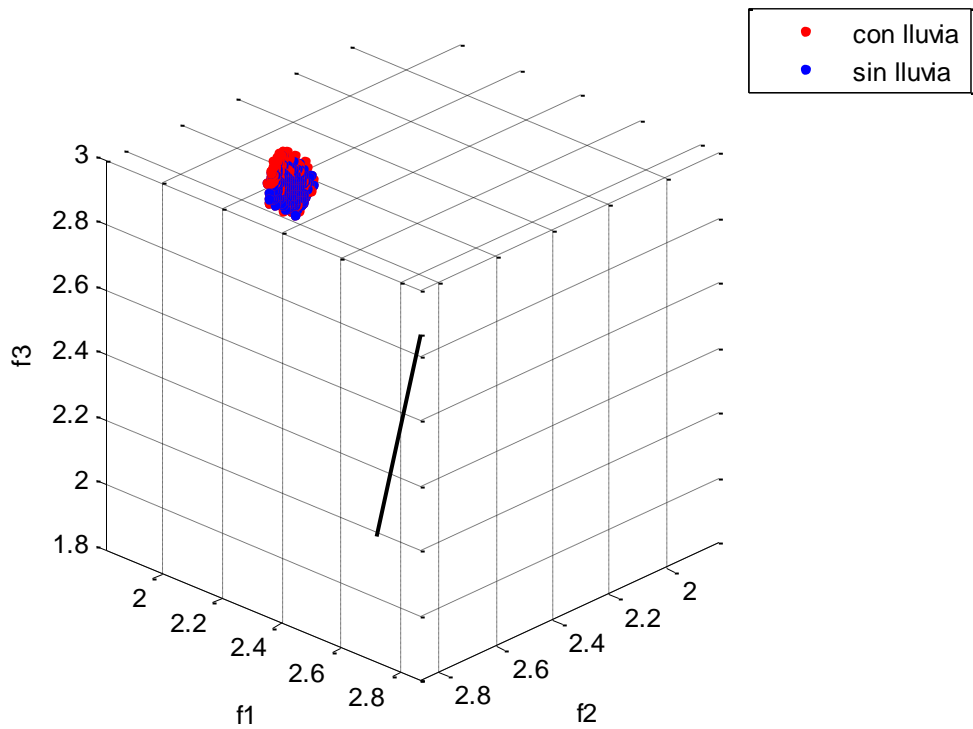


Figura 6-86: Relación frecuencias 1, 2 y 3 (3)

CAPÍTULO 7: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se han estudiado diversos aspectos relacionados al efecto que tienen las condiciones ambientales sobre las propiedades dinámicas de las estructuras, con el objetivo de evaluar metodologías que permitan identificar pequeños cambios de estado en éstas (como pueden ser daño leve o deterioro estructural).

En primer lugar, se ha realizado una evaluación experimental del impacto que tiene la temperatura sobre las frecuencias características de una viga de hormigón armado, con el objetivo de determinar la relación que existe entre el módulo de elasticidad del hormigón (armado) y la temperatura. Considerando lo encontrado en la literatura, se plantea la hipótesis de que la relación entre el módulo de elasticidad y la temperatura es inversa, sin embargo, una vez realizados los ensayos, se obtuvo que para la primera frecuencia característica dicha relación es directa, mientras que para las frecuencias características superiores la relación es inversa. Este resultado no es lo esperado y se piensa que las deficiencias experimentales, sumado al hecho de que la viga actúa como un conjunto de materiales (hormigón y acero) y no sólo como hormigón, han influido en este resultado. Por lo anterior, y teniendo en cuenta que la relación obtenida para la frecuencia 1 no es razonable en relación a lo observado en otras experiencias, se consideran sólo las frecuencias 2, 3 y 4 para generar una curva que relaciona inversamente la temperatura con el módulo de elasticidad del hormigón. Al final del capítulo 4, se realizan una serie de recomendaciones para mejorar las condiciones del ensayo realizado, considerando que no se tenía experiencia previa en relación a un ensayo de este tipo. El estudio de la variación de las propiedades mecánicas del hormigón en un rango de temperatura ambiente es un aspecto interesante en el ámbito de los sistemas de monitoreo estructural, pero que requiere de gran precisión al momento de ensayar, puesto que el rango de temperatura es pequeño, y cualquier perturbación a la hora de ensayar puede influir de manera significativa.

Una vez obtenida la relación entre el módulo de elasticidad y la temperatura, se realizan diversos modelos en base a un modelo bidimensional de un edificio de vigas y columnas, el cual modifica las propiedades mecánicas de sus elementos en función de registros reales de temperatura obtenidos de una estación meteorológica. Estos

modelos permiten observar la variación de las frecuencias debido a efectos térmicos, verificando lo que se ha observado en el edificio Torre Central, en donde existe una variación importante relacionada a efectos de temperatura. Por otra parte, el modelo de transferencia de calor realizado en base a la Ley de Fourier, es útil en cuanto caracteriza la variación de temperatura dentro de los elementos de hormigón, y explica los efectos de desfase en los cambios de frecuencia en relación a los cambios de temperatura. Considerando lo anteriormente expuesto, se abre la posibilidad de generar un modelo de mayor complejidad de una estructura real, el cual sirva para entender de manera más precisa los cambios de frecuencias características debido a cambios de temperatura. Por ejemplo, se podría estudiar el efecto que tiene la posición del sol a lo largo del año en un modelo en 3 dimensiones del Edificio Torre Central de la FCFM de la Universidad de Chile, determinando si esta variable es considerable en el cambio de las frecuencias características.

En relación a los estudios llevados a cabo para determinar la relación de las frecuencias características con las variables ambientales, se concluye que la temperatura es el factor principal, debido a que modifica las frecuencias de manera diaria (2.6% para las frecuencias 1, 2 y 3) y de manera estacional (6.8%, 8.2% y 7.7% para las frecuencias 1, 2 y 3 respectivamente). Por otra parte, se establece que las precipitaciones, y en particular, el aumento de saturación del suelo que ellas producen, es otro de los factores que modifican en gran medida las frecuencias (5.0%, 4.9% y 4.0% para las frecuencias 1, 2 y 3 respectivamente, considerando que la variación normal por temperatura es 2.6%). Por otra parte, se concluye que la existencia de correlaciones significativas entre la presión atmosférica y la humedad relativa con las frecuencias características no implica que estos factores ambientales tengan efectos sobre las frecuencias, sino que se establece que dicha correlación viene dada por la influencia de la temperatura en la presión atmosférica y la humedad relativa, y que por consecuencia estas variables están correlacionadas con las frecuencias.

En cuanto a los modelos de regresión realizados para predecir las frecuencias características en función de las variables ambientales, se establece que dicha modelación es posible y potencialmente útil, pero se requiere una mayor cantidad de datos para generar entrenamientos confiables. Además, no es posible incluir de manera

satisfactoria la influencia de las precipitaciones en los modelos de regresión, por lo que dicho factor se debe modelar de otra manera e incluir en los modelos de regresión.

Se establece que ARX genera mejores modelos que la regresión multiparamétrica, incluso utilizando menos predictores, pero tiene como desventaja que es necesario evaluar una gran cantidad de modelos para determinar los coeficientes adecuados.

Por otra parte, la aplicación del método PCA como recurso para detectar cambios de estado en estructuras afectadas por efectos ambientales, entregó resultados satisfactorios al detectar el daño generado por el terremoto del 2010, y en un análisis en un periodo posterior, se estableció que el *Novelty Index* es robusto y no se ve afectado en gran medida por las precipitaciones en comparación a los modelos de regresión. El método fue entrenado sólo con 1 año de información de frecuencias, lo que corresponde al mínimo recomendado para este tipo de análisis, por lo que es posible que se genere un método mucho más robusto en el caso que se realice un entrenamiento con un mayor número de años de entrenamiento.

Si se comparan los dos enfoques planteados (regresiones y PCA), se establece que ambos son enfoques útiles y que no representan una gran complejidad en su aplicación, ni requieren grandes recursos computacionales, lo que los hace potencialmente aplicables. Sin embargo, en términos de resultados, ambos enfoques presentan ventajas y desventajas, y para ambos modelos sería útil contar con más datos para evaluarlos de mejor manera. De todas maneras, dado que la aplicación de las metodologías estudiadas no es excluyente, y considerando que se cuenta con los recursos de monitoreo estructural y de factores ambientales, su uso podría ser de manera paralela, supliendo las deficiencias de un método en las ventajas del otro.

Finalmente, considerando lo expuesto en este trabajo, el desarrollo de sistemas de monitoreo de salud estructural requiere un estudio exhaustivo de las condiciones ambientales que afectan a las estructuras, para posibilitar de esta manera la detección de cambios de estado en las estructuras relacionados a daño, deterioro u otros factores, información que puede ser utilizada para la detección temprana de problemas estructurales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Basoalto, J. [2013] “Análisis del efecto de las condiciones ambientales en las propiedades modales de un edificio de hormigón armado”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, FCFM, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
2. Bentz, D. [2000] “A computer model to predict the surface temperature and Time-of-Wetness of concrete pavements and bridge decks”. Building and Fire Research Laboratory Gaithersburg, Maryland, U.S.A.
3. Boroschek, R., Nuñez, T. and Yáñez, T. [2010] “Development of a real time internet based monitoring system in a nine story, shear wall building”. Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering. Ohrid, Republic of Macedonia.
4. Cengel, Y. and Boles, M. [2011] “Termodinamics. An Engineering Approach”. McGraw-Hill Companies, Inc. New York, U.S.A.
5. Charpin, J.P.D., Myers, T.G., Fitt, A.D., Ballim, Y. and Pattini, A. [2004] “Modelling surface heat exchanges from a concrete block into the environment”. Proc. 1st South African Mathematics in Industry Study Group, Univ. of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.
6. Deraemaeker, A., Reynders, E., De Roeck, G., and Kullaa, J. [2008] “Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment”. Mechanical Systems and Signal Processing, 22 (2008) 34-56.
7. FEMtools [2013], “Modal Parameter Extractor User’s Guide, Version 3.7”. Dynamic Design Solutions, Leuven, Belgium.
8. He, X. [2008] “Vibration-based damage identificaction and health monitoring of civil structures”. Ph.D. thesis, Structural Engineering Dept., University of California, San Diego.

9. Hu, W. [2011] "Operational modal analysis and continuous dynamic monitoring of footbridges". Ph.D. thesis, Faculty of Engineering, University of Porto, Porto.
10. Johnson, R. and Wichern, D. [2007] "Applied Multivariate Statistical Analysis". Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A.
11. Kodur, V.R. and Harmathy, T.Z. [2002] "Properties of building materials" in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, P. J. DiNenno, Ed., National Fire Protection Association, Quincy, Mass, USA.
12. Lazcano, P. [2008] "Variación de los parámetros modales del edificio de la Cámara Chilena de la Construcción a partir de registros ambientales y sísmicos". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, FCFM, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
13. León, P. [2013] "Variación de Propiedades Dinámicas de la Torre Central debido a Factores Sísmicos". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, FCFM, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
14. Magalhães, F. [2010] "Operational modal analysis for testing and monitoring of bridges and special structures". Ph.D. thesis, Faculty of Engineering, University of Porto, Porto.
15. Magalhães, F., Cunha, A. and Caetano, E. [2009] "Online automatic identification of the modal parameters of a long span arch bridge". Mechanical Systems and Signal Processing, 23 (2009) 316-329.
16. Ni, Y. Q., Zhou, H. F. and Ko, J. M. [2009] "Generalization Capability of Neural Network Models for Temperature-Frequency Correlation Using Monitoring Data". J. Struct. Eng. 2009.135:1290-1300.

17. Peeters, B., De Roeck, G. [2001] "One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(2), 149-171.
18. Verdugo, G. [2009] "Estudio del efecto de los cambios de humedad del suelo en la frecuencia natural de una estructura". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, FCFM, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
19. Xia, Y., Chen, B., Zhou, X. -. and Xu, Y. -. [2013]. "Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma suspension bridge temperature behavior". *Structural Control and Health Monitoring*, 20(4), 560-575.
20. Yan, A. -M., Kerschen, G., De Boe, P. and Golinval, J. -C. [2005] "Structural damage diagnosis under varying environmental conditions-Part I: A linear analysis". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19 (2005) 847-864.
21. Yan, A. -M., Kerschen, G., De Boe, P. and Golinval, J. -C. [2005] "Structural damage diagnosis under varying environmental conditions-Part II: local PCA for non-linear cases". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19 (2005) 865-880.
22. Zhou, H. F., Ni, Y. Q. and Ko, J. M. [2011] "Eliminating Temperature Effect in Vibration-Based Structural Damage Detection". *J. Eng. Mech.* 2011.137:785-796.