



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**INSTRUMENTACIÓN PARA EL MONITOREO
DE OBRAS CIVILES**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

MARCO ANTONIO MENDOZA SALAS

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. GERARDO RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ

México D.F., Ciudad Universitaria, 2011





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS.

A mis padres, Angélica Salas Campoy y Lorenzo Mendoza Muñoz, por brindarme su cariño y sustento en los buenos y malos momentos de mi vida. Por darme la oportunidad de estudiar y ser un hombre de bien y por ser un gran ejemplo, de fortaleza y dedicación. A mis hermanas Angélica Edith y Ana Lorena Mendoza Salas, por su afecto y apoyo incondicional. A mis cuñados Edgar, Víctor y a mis sobrinos Vanesa y Damián. A todos ustedes, les dedico mis logros.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por recibirme en sus aulas. A la Facultad de Ingeniería por proveerme las herramientas para ejercer la profesión. A mis maestros por compartir sus conocimientos y experiencias con migo. Sobre todo, al Ing. Marco Aurelio Torres Herrera por sus consejos.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por la ayuda económica otorgada para la elaboración del presente trabajo de tesis. Además, por ofrecerme la oportunidad de colaborar en sus proyectos y adquirir nuevos conocimientos. Al personal que labora en sus instalaciones y en especial, al M.I. Gerardo Rodríguez Gutiérrez por su diligencia, paciencia, apoyo y confianza.

A mis sinodales. Al Dr. Roberto Gómez Martínez y al M.I. Miguel Angel Mendoza García, por su amistad y por aclarar mis dudas. Al Ing. Marcos Trejo Hernández por sus enseñanzas, al M.I. Marco Antonio Macías Castillo por su comprensión y apoyo. Y al Dr. David Muriá Vila por sus comentarios.

A mis amigos de toda la vida, Ricardo Cortés García, Iván Pérez Hernández, Sergio Espinoza Vásquez y Violeta Isabel Núñez Elizalde, por su compañía, por compartir sus vidas con migo y por seguir a mi lado todos estos años. A Ana, Adriana, Augusto, Joel, Karla, Daniel, Jorge e Hipólito por su aprecio y simpatía.

A Armando Moreno Hernández, por darme la oportunidad de trabajar, por ser un gran amigo y maestro. Descanse en paz. A Mónica Millán Martínez por sus palabras de aliento y por estar al pendiente de mí. Y a Socorrito, Rogelio y Agustín por su amistad y compañía.

Y a todos aquellos, quienes me faltó mencionar y que compartimos gratos momentos juntos...

iMuchas gracias!

“La rutina es el hábito de renunciar a pensar”

José Ingenieros

ÍNDICE.

INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.	2
1.1 La importancia de la instrumentación.....	2
1.2 Reseña histórica de la instrumentación de obras civiles.....	3
1.3 Objetivos.	5
CAPÍTULO 2. PRINCIPIOS DE LA INSTRUMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS.....	6
2.1 El monitoreo estructural.....	6
2.2 Diferentes tipos de instrumentación en la ingeniería civil.....	10
2.3 Sensores y Transductores.	11
2.3.1 Selección de sensores.	11
2.3.2 Algunos sensores comunes en la instrumentación de estructuras.....	12
2.3.2.1 Acelerómetros.....	12
2.3.2.2 Deformímetros.	14
2.3.2.3 Transductores de desplazamiento.....	18
2.3.2.4 Transductores de temperatura.	19
2.3.2.5 Anemómetros.	20
2.3.2.6 Cuerdas vibrantes.	23
CAPÍTULO 3. LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA INSTRUMENTACIÓN.	26
3.1 La fibra óptica.	26
3.2 El GPS.	28
3.3 El escáner digital.	30
CAPÍTULO 4. LA INSTRUMENTACIÓN DE OBRAS CIVILES EN MÉXICO.	32
4.1 Algunos ejemplos de obras civiles instrumentadas en México.	33
4.1.1 Edificio Jalapa.	34
4.1.2 Catedral metropolitana.....	35
4.1.3 Centro Cultural Universitario Tlatelolco.....	36
4.1.4 Puente impulsora.....	37
4.1.5 Puente Chiapas.	38
CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN DE UNA ESTRUCTURA CON GEOMETRÍA ESPECIAL.....	39
5.1 El caso de un puente con trayectoria curva.	39
5.1.1 Descripción de la superestructura.	39
5.1.2 Descripción de la subestructura.	41
5.2 Monitoreo estructural.....	42
5.2.1 Descripción de la instrumentación.	43
5.2.2 Sistema de adquisición de datos.	46

5.2.3 Gestión de datos.	47
5.2.3.1 Procesamiento de los datos.....	47
5.2.3.2 Interpretación de los datos.	49
5.2.3.3 Corrección de los datos.....	51
5.2.4 Análisis de la información.....	64
5.2.4.1 Revisión de niveles de esfuerzo.....	64
5.2.4.2 Revisión de desplazamientos relativos.	67
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES FINALES.	71
APÉNDICES.....	73
Apéndice A. Incrementos de esfuerzo medidos a las 8:00 hrs.	73
Apéndice B. Incrementos de esfuerzo medidos a las 20:00 hrs.....	82
Apéndice C. Temperaturas medidas a las 8:00 hrs.	91
Apéndice D. Temperaturas medidas a las 20:00 hrs.	100
Apéndice E. Incrementos de esfuerzo corregidos, medidos a las 8:00 hrs.	109
Apéndice F. Incrementos de esfuerzo corregidos, medidos a las 20:00 hrs.	118
Apéndice G. Temperaturas corregidas, medidas a las 8:00 hrs.	127
Apéndice H. Temperaturas corregidas, medidas a las 20:00 hrs.	136
Apéndice I. Manual de revisión para cuerdas vibrantes.	145
BIBLIOGRAFÍA.	148

INTRODUCCIÓN.

La instrumentación de obras civiles es una práctica poco frecuente en México a pesar del desarrollo que tiene en otros países. La necesidad de encontrar nuevas metodologías que permitan evaluar el desempeño de la infraestructura ante la ocurrencia de fenómenos naturales tales como sismos, huracanes, inundaciones entre otros eventos y que ayuden al acceso de nuevos conocimientos encaminados a mitigar sus efectos con diseños innovadores y económicos, es una prioridad en toda nación donde existan obras de infraestructura importantes. Por lo tanto, es indispensable aprender de las experiencias adquiridas en otras partes del mundo y compartir nuestros logros en beneficio de la sociedad.

El desarrollo de estructuras inteligentes y la supervisión de la salud estructural son conceptos en el campo de la ingeniería civil que han sido más y más atractivos en la última década y han recibido la creciente atención de todo el mundo; en la investigación académica y aplicada. Las ideas básicas han sido obtenidas de las aplicaciones realizadas en la industria aeronáutica aeroespacial y automotriz, pero la migración hacia la industria de la construcción ha requerido del desarrollo de tecnologías especializadas y conocimientos sobre la fabricación de sensores, diseño de sistemas de monitoreo, recopilación de datos, análisis e interpretación de las mediciones y la toma de decisiones (Branko, et al., 2007).

La actividad científica y tecnológica encaminada al monitoreo estructural se concentra fundamentalmente en algunas instituciones públicas y privadas, así como en empresas de consultoría, por lo que la disponibilidad de recursos humanos en este campo es limitada. El desarrollo de nuevas herramientas y sus aplicaciones, nos obligan como futuros profesionistas a prepararnos mejor y aprovechar al máximo los conocimientos generados de esta actividad para ejercer en la mejor manera, la práctica de la ingeniería civil.

Los nuevos materiales, tecnologías de construcción y sistemas estructurales están siendo utilizados hoy en día con mayor frecuencia, por lo tanto, es necesario conocer más sobre su desempeño, la forma de aprovechar sus propiedades a la hora de diseñar y establecer métodos que permitan verificar su rendimiento. En contraste, la degradación de los materiales o el daño de los elementos estructurales que componen las estructuras son algunas razones por las cuales surge la necesidad de brindar mantenimiento a las construcciones existentes. La determinación del éxito en la realización de labores, tales como la implementación de nuevos métodos constructivos y la reparación o el reforzamiento de una estructura, es una justificación adicional de las actividades encaminadas a comprender el desempeño estructural de las edificaciones.

Actualmente, el número de obras civiles instrumentadas es muy reducido. Hasta el momento esta actividad no es obligatoria en ningún marco reglamentario y sus aplicaciones son poco conocidas. Sin embargo, la aparición de nuevas exigencias técnicas y económicas que conllevan a reducir riesgos en la construcción, a garantizar la seguridad de los usuarios y minimizar los costos, hacen del monitoreo estructural una labor indispensable en la búsqueda de nuevas alternativas para el ejercicio de la ingeniería civil, ya que representa un área de oportunidades científicas, tecnológicas y empresariales. Dado el actual crecimiento de la industria de la construcción y las carencias de espacio en las zonas urbanas.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.

Las obras civiles tienen presencia en todas las sociedades, sin importar la cultura, religión, ubicación geográfica y desarrollo económico. En la actualidad es difícil imaginar una civilización sin casas, edificios, carreteras, ferrocarriles, puentes, túneles, presas y plantas de energía eléctrica. Por lo tanto, un buen diseño, económico, con una calidad constructiva que garantice una mayor durabilidad y seguridad, son algunos de los objetivos de la ingeniería estructural.

1.1 La importancia de la instrumentación.

El mal funcionamiento de las estructuras puede tener serias consecuencias. La ocurrencia de algún accidente derivado de esta situación puede involucrar vidas humanas o en su defecto, las poblaciones pueden sufrir carencias si la infraestructura queda parcial o completamente fuera de servicio. El colapso de bastimentos tales como redes de energía eléctrica, carreteras, tuberías de agua potable o drenaje, etc. pueden provocar el caos. En términos económicos el efecto puede ser de dos tipos, ya que esto implica un impacto directo, que es reflejado por los costos de reconstrucción y un impacto indirecto, que involucra a otras ramas de la economía. Mientras que el derrumbe de monumentos históricos tales como puentes, catedrales, edificios y palacios, es otro aspecto de cuidado, ya que su comportamiento estructural es complejo debido al carácter empírico de los métodos constructivos y de diseño que se emplearon en su elaboración (Meli, 2008). Estas cuestiones no pueden tomarse a la ligera, ya que representarían una lamentable pérdida para la sociedad.

Al monitorear las obras civiles, se fomenta la investigación y la adquisición de nuevos conocimientos que promueven un mayor entendimiento del comportamiento de los materiales y métodos tradicionales de construcción, lo cual puede reflejarse en un mejor aprovechamiento de la infraestructura existente. Inclusive puede implementarse desde la etapa constructiva sirviendo como apoyo para detectar errores constructivos que pueden inferir en su funcionamiento, permitiendo aplicar las acciones correspondientes para corregir el problema (Rodríguez, 2010). Y cuando la estructura ya no satisface el nivel de desempeño requerido y los costos de reparación o refuerzo son elevados. Permite la realización de las labores de desmantelamiento de un inmueble, evitando riesgos y con un alto grado de seguridad (Branko, et al., 2007).

En pocas palabras, la importancia de la instrumentación de obras civiles recae en la búsqueda de respuestas a diversas problemáticas. A pesar de ello, la cultura del monitoreo estructural aún no se ha extendido como debería ser. En muchas ocasiones, se considera como una actividad que solo tiene trascendencia en la investigación científica. Sin embargo, los hechos dicen todo lo contrario. Es un proceso encaminado a proporcionar información exacta, relativa a la condición y desempeño de una estructura a través del tiempo. Por lo tanto, frecuentemente tiene un papel esencial en las actividades administrativas de un proyecto, ya que con la ayuda de los datos obtenidos del programa de monitoreo se pueden establecer las medidas necesarias que permiten planificar las acciones destinadas a optimizar la operación, proporcionar mantenimiento, reparación y remplazo de los elementos de una estructura, basándose en datos seguros y objetivos que permiten verificar hipótesis y reducir incertidumbres, lo cual fomenta el desarrollo de construcciones confiables, seguras y durables.

1.2 Reseña histórica de la instrumentación de obras civiles.

Durante el siglo anterior, se estudiaron y se observaron una serie de fenómenos físicos que tuvieron un significado importante en el desarrollo de sensores y de la instrumentación. Estos fenómenos constituyen la base de los aparatos de medición que conocemos hoy en día. Es por ello que podemos hablar del efecto termo eléctrico, piezoeléctrico, de la interacción entre la deformación mecánica, la variación de resistencia eléctrica y aplicarlo al monitoreo estructural.

A finales del siglo XIX, ya se utilizaban muchos transductores que eran capaces de medir variables que no podían detectar los seres humanos como diversas partes no visibles del espectro electromagnético y la radiación infrarroja. Los conflictos militares contribuyeron a encontrar nuevas ideas y tecnologías. La primera guerra mundial (1914-1918) precipitó el desarrollo de las radiocomunicaciones. La necesidad de implementar sistemas de comunicación de radio marítimos permitió establecer buenas comunicaciones entre los barcos mediante el desarrollo de detectores, amplificadores y generadores de señales de radiofrecuencia que sirven para acondicionar las lecturas obtenidas con diversos instrumentos. Gracias a estos adelantos tecnológicos, la variedad de efectos e interacciones físicas que se descubrieron en el siglo XIX encontraron su aplicación como sensores cuando se dispuso de los amplificadores electrónicos a partir del año de 1920. La variación de la resistencia de los metales sometidos a una deformación se comienza a utilizar en medidas de esfuerzo con deformímetros en 1930. La sensibilidad a la luz del selenio se utilizó en el control de la intensidad de la luz. Los termopares y las resistencias de platino se emplearon para el diseño de termómetros que comenzaron a utilizarse en las fábricas para realizar procesos de control de calidad, entre otras tantas aplicaciones.

Durante la segunda guerra mundial (1939-1945) se desarrollaron los sistemas de radar, los controladores de vuelo de aeronaves y otros dispositivos en los cuales la instrumentación era una parte importante en el desarrollo de la actividad naval y aeronáutica (figura 1.1). Esto también permitió la telemetría de trenes de carga a través del uso de bulbos en la instrumentación y posteriormente el desarrollo de los rayos x, los electrocardiógrafos, entre otros dispositivos utilizados en la práctica de la medicina y la industria (Lázaro Manuel, et al., 2001).



Figura 1.1: Portaviones USS Hornet y bombardero B-25 Mitchel (Anónimo, 1945)

La aparición de las primeras computadoras electrónicas a mediados de la década de los 40's marcaba el inicio de nuevas aplicaciones encaminadas a la investigación y la industria. Sin embargo aun no se podía hablar de sistemas de monitoreo, ya que sus primeras aplicaciones solo se limitaban a realizar labores de índole militar, como realizar cálculos de artillería que involucran determinar la trayectoria de bombas e incluso, misiles (Figura 1.2). Más adelante, comenzaron a utilizarse en tareas más comunes como resolver sistemas de ecuaciones lineales, calcular la nómina de una empresa, realizar censos, entre otras.

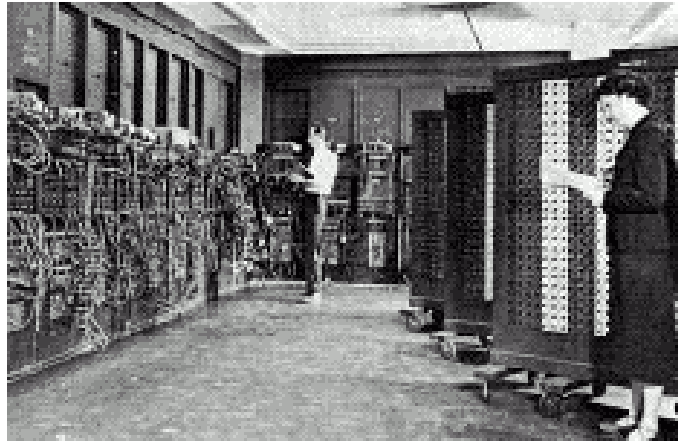


Figura 1.2: Primera computadora electrónica ENIAC (Universidad de Pensilvania, 1946)

En aquel entonces no era fácil imaginar una construcción dotada con sensores que permitieran conocer su comportamiento estructural. Sobre todo teniendo en cuenta lo elevado de los costos de estos dispositivos, la falta de sistemas de adquisición de datos que fueran compatibles con los mismos y que la capacidad de las computadoras para manipular, almacenar y procesar información recabada con estos aparatos representaba un desafío que estaba en puerta. Todo esto hacía muy remota la posibilidad de que esta actividad fuese factible en la práctica. Los avances más representativos en este campo vieron sus inicios en los laboratorios al tratar de conocer con mayor exactitud, las propiedades mecánicas de algunos materiales tales como el concreto y el acero, los cuales se emplean en la construcción, así como elaboración de otros productos tales como herramientas, maquinaria, etc.

La llegada del boom industrial en países como Japón y los Estados Unidos durante la década de los 70's, fomentó la construcción de grandes obras que permitieran el traslado y comercialización de sus productos hacia otras naciones. La economía mundial giro en torno a estas dos potencias, por lo cual el deterioro de caminos y puentes como consecuencia del uso y la presencia de fenómenos naturales tales como tifones y terremotos arraigaron en estas y en otras naciones del mundo, la necesidad de brindar mantenimiento a sus construcciones y preservarlas en condiciones óptimas para su operación. Sin embargo, no fue sino hasta de la década de los 90's cuando se inicio el desarrollo de las primeras aplicaciones del Monitoreo de la Salud Estructural y como consecuencia el surgimiento de los primeros sistemas de monitoreo estructural, los cuales se desempeñaron principalmente en el monitoreo de puentes en países como Corea, China y Japón por citar algunos ejemplos, mientras que en otras naciones tales como Suiza y los Estados Unidos se han realizado avances en el desarrollo de sistemas de monitoreo basados en el GPS, cuyas aplicaciones han extendido su uso en otras estructuras tales como edificios, redes de distribución de agua potable, presas, plantas de energía nuclear, etc.

Hasta la fecha se pueden hablar de tres generaciones de sistemas de monitoreo. La primera se caracterizó por el uso de un sistema independiente constituido por sensores y equipo que efectúa transmisiones en línea a una computadora en campo. La segunda generación permite la operación simultánea de dos o más sistemas de monitoreo diferentes para que trabajen en forma conjunta e incluso facilita la manipulación de los datos en sitio (Koh et al., 2002). La tercera generación hace referencia a aplicaciones tales como la fusión de dos o más sensores, la habilidad de transmitir múltiples señales simultáneamente, la incorporación de energías renovables en el funcionamiento de los sistemas de captura, el establecimiento de algoritmos de vigilancia automática, procesamiento de señales, etc. De igual manera se ha procurado la participación de medios satelitales que permitan la transmisión inalámbrica de los datos, así como la visualización y la adquisición de los mismos vía internet. Incluso, se han estado desarrollando sensores inalámbricos, lo cual, es un indicio de que las nuevas tendencias tecnológicas están siendo encaminadas hacia el uso de menos cables, al desarrollo de sistemas de monitoreo versátiles y al impulso de la vigilancia de la salud estructural, como una actividad cuya trascendencia, sea cada vez más fácil de realizar y sin fronteras.

1.3 Objetivos.

El presente trabajo trata de enfatizar la importancia de la instrumentación de estructuras, no sólo como una actividad exclusiva de la comunidad científica de nuestro país, sino como una herramienta que permite vigilar la integridad estructural de todo proyecto en sus múltiples etapas. Para lo cual, se plantean los siguientes objetivos:

- Describir las actividades que conforman el monitoreo estructural.
- Conocer el funcionamiento de algunos tipos de sensores comúnmente empleados en el monitoreo estructural.
- Presentar algunas de las tecnologías utilizadas hoy en día en instrumentación de estructuras.
- Mostrar algunos ejemplos de obras civiles monitoreadas con estos dispositivos en México.
- Exponer las actividades realizadas en el monitoreo de un puente con trayectoria curva, el cual se localiza en el estado de Chiapas.

CAPÍTULO 2.

PRINCIPIOS DE LA INSTRUMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS.

La instrumentación de estructuras no es una tendencia novedosa. Desde la antigüedad, los ingenieros, arquitectos y artesanos han sido cuidadosos en observar el comportamiento las construcciones con el afán de descubrir fallas, signos de degradación o simplemente extender sus conocimientos e implementarlos en el diseño de futuros proyectos (Branko, et. al., 2007). Lo único novedoso son los métodos empleados para llevar a cabo esta actividad.

2.1 El monitoreo estructural.

El monitoreo de la salud estructural es un proceso que consiste en la captura continua o periódica; de forma permanente o habitual, de los parámetros más representativos que permiten conocer el estado de una estructura. Lo cual significa que puede realizarse a corto, mediano, largo plazo o inclusive durante la vida útil de un inmueble.

Las principales actividades que conforman el monitoreo estructural son:

- I. Selección de la estrategia del monitoreo
- II. Instalación del sistema de monitoreo.
- III. Mantenimiento del sistema de monitoreo.
- IV. Manejo de los datos.
- V. Cierre de actividades.

Cada una de estas etapas se divide a su vez en sub-actividades, las cuales complementan el monitoreo de la salud estructural (tabla 2.1). Todas estas en conjunto, son importantes, pero la más trascendente de ellas, es la creación de una buena estrategia de monitoreo, debido a que de esta se derivarán el resto de las tareas a realizarse.

Al iniciar un proyecto de monitoreo es necesario definir la meta e identificar los parámetros que se emplearán para realizar los objetivos propuestos. Esta selección debe ser cuidadosamente analizada ya que los parámetros deben mostrar el comportamiento real de la estructura. Lo cual, no es una tarea fácil ya que cada construcción posee sus propias particularidades tanto geométricas como funcionales.

Una vez identificados los parámetros a monitorear se seleccionan los distintos aparatos que ayudarán a obtener las mediciones y a registrarlas correctamente. Al conjunto de todos los elementos que permiten llevar a cabo estas actividades se denomina sistema de monitoreo. Existen a su vez distintos tipos de sistemas de monitoreo que difieren entre sí, por sus principios de funcionamiento. Sin embargo, todos ellos constan de componentes similares, como sensores, unidades para el almacenamiento y lectura de la información recopilada y programas de computadora para el manejo del sistema y control de la información.

La selección sistema de monitoreo más adecuado, depende entre otros factores de los objetivos a alcanzar, los parámetros elegidos, la precisión de las mediciones, la frecuencia de las capturas, las condiciones del lugar en donde será instalado (presencia de campos electromagnéticos, variaciones de temperatura, humedad, etc.), el procedimiento requerido para la instalación de los diferentes componentes del equipo, la posibilidad de automatizar el sistema, conectividad remota, la forma de manejar los datos, el nivel en que la estructura será supervisada (global o local), etc.

Estrategia de monitoreo	Instalación del sistema de monitoreo	Mantenimiento del sistema de monitoreo	Manejo de los datos	Cierre de actividades
Objetivo del monitoreo	Instalación de los sensores	Proporcionar el suministro eléctrico	Ejecución de las mediciones	Interrupción del monitoreo
Selección de los parámetros a monitorear	Instalación de accesorios	Proporcionar líneas de comunicación	Almacenamiento de los datos	Retiro del sistema de monitoreo
Selección del equipo	Instalación de las unidades de lectura	Ejecución de planes mantenimiento para diferentes dispositivos	Proporcionar acceso a los datos	Almacenamiento del equipo de monitoreo
Establecer los puntos de medición	Instalación del software	Reparación y reemplazo de elementos descompuestos	Visualización	
Determinar el calendario de monitoreo	Interacción con los usuarios		Salida de datos	
Aprovechamiento de los datos			Interpretación de los datos	
Costos			Análisis de datos	
			Uso de los datos	

Tabla 2.1: Actividades fundamentales del monitoreo estructural (Branko, et. al., 2007)

El diseño de la red de sensores depende de la geometría y el tipo de estructura observada, ya que esto determina la manera de colocar los instrumentos y los resultados que se desean alcanzar con los parámetros seleccionados, de acuerdo con los puntos de interés. Es por ello que la instalación del equipo de monitoreo es una etapa delicada y debe ser planeada a detalle considerando el estado del sitio donde se instalará, así como los tiempos en que se efectuará.

En aquellas estructuras donde se planea un monitoreo permanente, es indispensable instalar el sistema de monitoreo en la etapa constructiva, por ello, se debe prestar singular atención a la planeación del montaje del equipo. Esto debido a que pudiera consumir tiempo importante en el avance de la obra causando retardos indeseables. También puede presentarse la situación en que los sensores requieran incrustarse dentro de elementos de concreto, en este caso se dispone de un periodo de tiempo muy corto entre la colocación del sensor, el colado del concreto y el fraguado del mismo. Esta es la razón por la cual resalta la importancia de un programa y calendario de actividades, ya que hay que sincronizar las acciones del monitoreo con las de la construcción y tomar en cuenta los posibles retrasos que pudieran presentarse, debido a las labores constructivas, por lo cual es recomendable que exista un cierto grado de flexibilidad en el manejo del tiempo. Una vez hecha la instalación, el sistema debe ser protegido, sobre todo si aun se realizan trabajos constructivos. Se deben tomar todas las precauciones necesarias ante

accidentes durante y después de la construcción que garanticen la integridad del equipo permanentemente.

La adquisición de información normalmente se realiza durante la etapa constructiva y la vida útil de una estructura. En el calendario de actividades se establecerán las fechas de realización de mediciones además de la frecuencia de adquisición de datos. Esto dependerá de la rapidez con la cual varían parámetros seleccionados y de la seguridad de la estructura. Es recomendable que la frecuencia de adquisición de datos sea razonablemente establecida, debido a que una frecuencia de adquisición muy alta representa costos elevados. Esto solamente es justificable en el caso de estructuras que puedan correr el riesgo de un colapso repentino, ya que deben ser monitoreadas continuamente con la máxima frecuencia de mediciones posible. Por lo cual se puede decir que la frecuencia de mediciones depende principalmente del comportamiento esperado de la estructura.

El manejo de los datos puede ser básico o avanzado. El manejo básico consiste en la ejecución de las mediciones (lectura de los sensores) almacenamiento de los datos (local o remoto) y el acceso a los datos. Los datos pueden ser recolectados manualmente, semi-automáticamente o automáticamente, en el sitio o remotamente, periódicamente o continuamente, estáticamente y dinámicamente. Estas opciones pueden ser combinadas de distintas formas. Por ejemplo, durante las pruebas realizadas a un puente es necesario realizar mediciones semi-automáticamente, en el sitio y periódicamente (después de cada aplicación de carga). Para un monitoreo a largo plazo, el desempeño máximo se obtiene realizando el proceso automáticamente y de forma remota (en gabinete). Las posibles combinaciones del proceso de recolección de datos se presentan esquemáticamente en la siguiente figura:

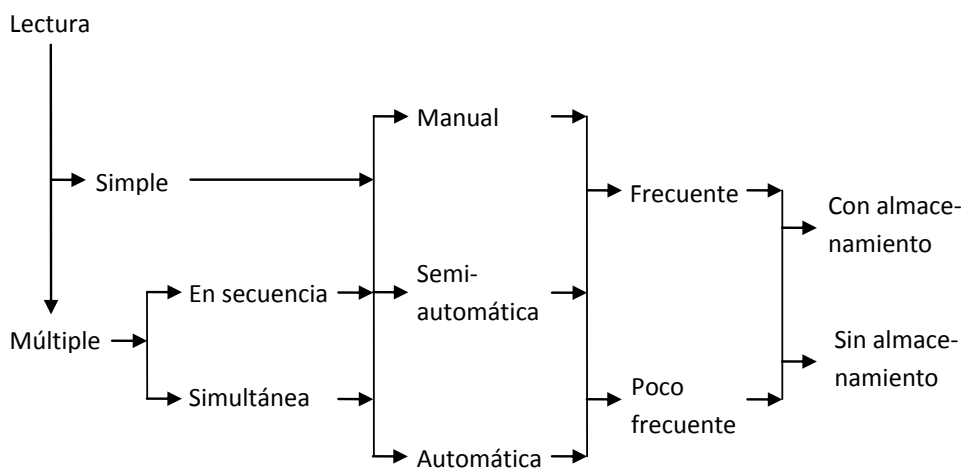


Figura 2.1: Métodos para recolectar datos (Branko, et. al., 2007)

Los datos pueden ser almacenados en forma de reportes, tablas, gráficas y diagramas con diferentes tipos de soporte como archivos electrónicos o versiones impresas en papel. El modo de almacenamiento de los datos garantiza que no se pierdan y hace posible que el acceso a cualquier dato seleccionado sea rápido. Las posibles formas de almacenamiento y acceso de los datos se presentan en la figura 2.2. Los programas de computadora que administran y almacenan la colección de datos, forman parte del sistema de monitoreo. De otra forma, el manejo de los datos puede ser difícil, demandante y costoso.

El manejo avanzado de los datos consiste en la visualización, interpretación, análisis, envío y uso de la información (generación de avisos y alarmas). Los datos conseguidos son de hecho, una gran cantidad de números (fechas y magnitudes de parámetros medidos) y han de ser transformados en información relacionada con el comportamiento de la estructura. Esta transformación depende de la estrategia de monitoreo y los algoritmos que son utilizados en la interpretación y análisis de los datos. Esto puede ser realizado manualmente, semi-automáticamente o automáticamente.

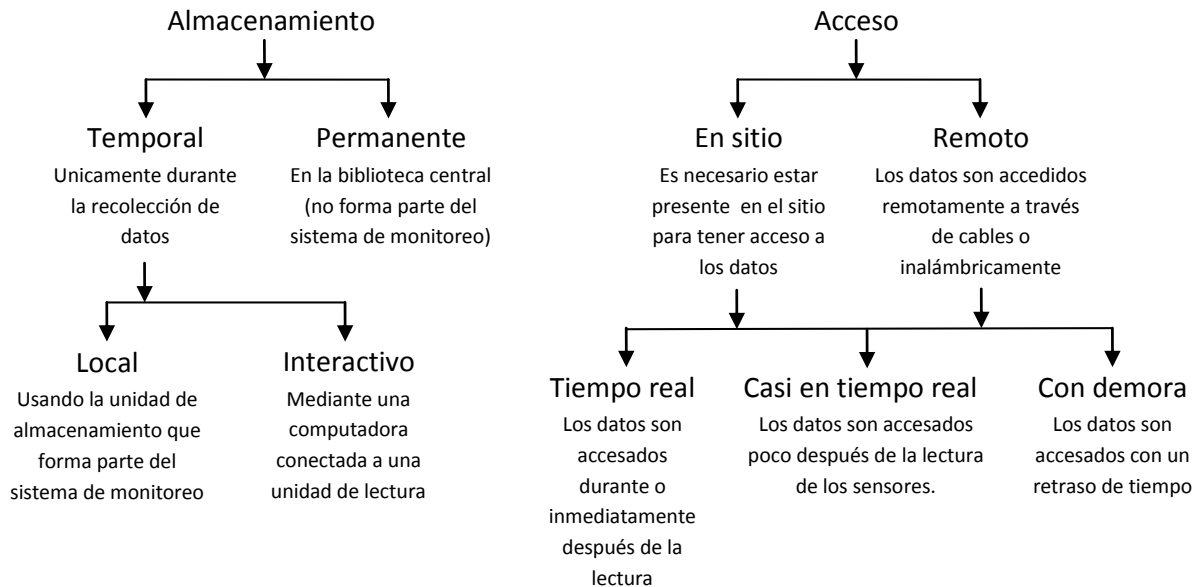


Figura 2.2: Posibles métodos de acceso a los datos (Branko, et. al., 2007)

El manejo manual de los datos consiste en la interpretación, visualización, envío y análisis de los datos. Se practica en casos donde la cantidad de los datos es limitada. El manejo semi-automático de los datos consiste en la combinación de acciones manuales y automáticas. Generalmente, el envío de datos se realiza de forma manual y el análisis, automáticamente, empleando los algoritmos y herramientas de cómputo adecuados. Se debe tener mucho cuidado a la hora de seleccionarlos, ya que deben ser compatibles con el sistema de control elegido.

El uso de estos recursos se aplica en casos en donde el análisis de la información se realiza en forma periódica. El manejo automático de la información es el más conveniente, ya que puede realizarse rápidamente e independientemente de la cantidad de los datos o la frecuencia del análisis. Y finalmente, con base en la información obtenida del análisis de los datos se pueden planificar las acciones que se deben realizar, como generar advertencias y detener el uso de un inmueble como medida de seguridad.

La gestión de la información debe ser planeada junto con la selección de la estrategia de monitoreo. Desafortunadamente, las decisiones tomadas no se pueden aplicar a todos los proyectos. No se pueden encontrar dos estructuras con las mismas características, por lo cual, la estrategia de monitoreo es diferente para cada estructura y con frecuencia es limitada por el presupuesto disponible en el proyecto. Desde el punto de vista del desempeño del equipo, lo mejor es el uso de poderosos sistemas de monitoreo, con muchos sensores instalados en cada parte de la estructura y programas de computadora que permitan operarlo en forma remota y

automática. Sin embargo, los costos de un sistema de monitoreo con estas particularidades, pueden ser elevados y excesivos. La experiencia de algunos especialistas en el monitoreo de estructuras, permite estimar que el presupuesto destinado para monitorear una estructura nueva, oscila entre un 0.5% y un 1.5% de su costo total. El aspecto económico es importante para el desarrollo de una estrategia óptima de monitoreo, ya que es necesario proporcionar buenas evaluaciones del comportamiento de la estructura con escasos recursos económicos.

2.2 Diferentes tipos de instrumentación en la ingeniería civil.

Existen varios tipos de monitoreo derivados de los distintos objetivos que se plantean, a partir de los cuales se puede identificar los parámetros que se desean monitorear (Branko, et. al., 2007). Por lo tanto, en la práctica es común hablar de instrumentación sísmica, geotécnica, topográfica, hidráulica, etc. Sin embargo, existe una clasificación más general, la cual abarca tres categorías, denominadas:

- Monitoreo estático.
- Monitoreo dinámico.
- Sistema de identificación y análisis modal.

También existe la posibilidad de combinar estos tipos de monitoreo. Esto obedece al tipo de estructura que se pretende analizar, la función que desempeña, los materiales que la constituyen, su importancia, entre otros aspectos. De igual manera, los parámetros que se desean monitorear dependen de otros factores como la magnitud de las cargas que se espera que soporte la estructura, las condiciones ambientales, la degradación de los elementos estructurales, etc. Algunos de los indicadores más empleados para ser monitoreados son el esfuerzo cortante promedio, la deformación, desplazamiento, agrietamiento, la curvatura de vigas, losas y cascarones, etc. Estos y otros índices del comportamiento estructural se pueden clasificar como parámetros mecánicos, físicos o químicos. La siguiente tabla, muestra algunos ejemplos de parámetros medibles.

Tipo	Parámetro
Mecánico	Esfuerzo, deformación, desplazamiento, agrietamiento, carga
Físico	Temperatura, humedad, presión de poro
Químico	Penetración de cloruros, sulfatos, carbonatos; oxidación, descomposición

Tabla 2.2: Parámetros comunes en la instrumentación de estructuras (Branko, et. al., 2007)

El uso por separado de sistemas de monitoreo y sensores, para cada parámetro mencionado sería costoso y complicado desde el punto de vista de la instalación y valoración de los datos. Por lo tanto es recomendable el uso de un número limitado de sistemas de monitoreo y sensores de diversos tipos en un mismo sitio.

2.3 Sensores y Transductores.

Los sensores y transductores son instrumentos de medida que forman parte de un sistema de medición, el cual se constituye por otros dispositivos que en conjunto permiten producir valores que reflejan las magnitudes de los parámetros medidos. Sin embargo, existe una diferencia entre estos dos dispositivos. De acuerdo con el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM, 2007), el concepto de sensor y transductor, se presenta a continuación:

Sensor: Elemento de un sistema de medición que es afectado directamente por el fenómeno, cuerpo o sustancia portador de la magnitud que será medida.

Transductor: Dispositivo empleado en mediciones, que hace corresponder una magnitud de entrada a una magnitud de salida, según una relación determinada.

El hecho de saber identificar estos términos de manera correcta en un sistema de medida es indispensable, ya que en muchas ocasiones se utilizan para nombrar diversos dispositivos de medición sin importar la diferencia. Por ejemplo, cuando nos bañamos, tocamos el agua para saber si está fría o caliente. En este caso la piel, es la parte sensorial y las terminales nerviosas son el transductor, el cual transmite las sensaciones detectadas por la piel en forma de impulsos eléctricos que viajan a través del sistema nervioso central hasta llegar al cerebro, el cual es el órgano encargado de interpretar las sensaciones.

En ocasiones, la diferencia no es tan sencilla de establecer. Por ejemplo, en un sistema para controlar la temperatura de un horno, la medición de la temperatura se realiza a través de un termopar, el cual es un transductor de temperatura que en ocasiones es mal llamado sensor de temperatura. El elemento sensible al cambio de temperatura lo conforman los metales que componen el termopar, los cuales, en este caso se encuentran integrados al transductor.

En conclusión, si se conocen las características físicas de un transductor y las restricciones que le impone el ambiente se puede minimizar la diferencia entre la percepción y la realidad, ya que el grado de confianza de una medición se incrementa cuando todos los factores de influencia son entendidos (Velasco, 2009).

2.3.1 Selección de sensores.

Un sensor puede involucrar diversos principios de operación, por lo cual, es elegido dependiendo de las características del transductor y las necesidades del operador. Los transductores más comunes son del tipo capacitivo, electromagnético inductivo piezoeléctrico y resistivo (Mendoza, 1997). Es por ello que al seleccionar un dispositivo, para una aplicación en particular hay que considerar varios factores:

1. El tipo de medición que se requiere, por ejemplo, la variable que se va a medir, su valor nominal, el rango de valores, la exactitud, velocidad de medición y confiabilidad requeridas, las condiciones ambientales en que se realiza la medición.

2. El tipo de salida que se requiere del sensor, lo cual determinara las condiciones de acondicionamiento de la señal, a fin de contar con las señales de salida idóneas para la medición.
3. Con base en lo anterior se pueden identificar algunos sensores, teniendo en cuenta el rango, exactitud, linealidad, velocidad de respuesta, confiabilidad, facilidad de mantenimiento, duración, requisitos de alimentación eléctrica, disponibilidad y costo (Bolton et. al, 2006).

La mayoría de los sensores disponibles en el mercado se fabrican con el aval de estrictas normas de calidad internacional. Sin embargo, es recomendable realizar pruebas de calibración, las cuales, además de validar las características de los instrumentos que menciona el fabricante, permiten conocer el funcionamiento de los mismos antes de utilizarlos en mediciones de campo, lo que es muy ventajoso si no se está familiarizado con el uso de los aparatos, ya que esta práctica permite visualizar y corregir las posibles contingencias que se pueden presentar a la hora de realizar una prueba en campo.

2.3.2 Algunos sensores comunes en la instrumentación de estructuras.

En esta sección se presentarán a algunos de los dispositivos que se utilizan comúnmente en campo, ya que es difícil hacer una recopilación de todos los aparatos que se emplean en la práctica y explicar la manera en que funcionan. Sin embargo, al comprender la manera en que operan estos artefactos, se podrán entender con mayor facilidad los fundamentos manejados por otros dispositivos tales como los inclinómetros, las celdas, de carga, los medidores de presión, de caudal, etc., los cuales operan de manera muy similar.

2.3.2.1 Acelerómetros.

Los acelerómetros son instrumentos que utilizan para conocer la magnitud de la aceleración a la que se son sometidos los cuerpos. Se suelen emplear para medir inclinación, distancia y velocidad; vibración en vehículos, maquinas, edificios, así como la actividad sísmica. Los transductores de aceleración son capaces de detectar incluso los movimientos más leves, desde la inclinación de un edificio hasta la más mínima vibración causada por un instrumento musical.

Por otro lado, siempre es recomendable que los aparatos sean adheridos a la superficie del objeto en estudio, ya que esto evita que sean desplazados del punto de medición, además que permite realizar lecturas más exactas. Con este propósito se pueden utilizar resinas especiales, pegamentos a base de silicón o dispositivos tales como tornillos, bases de acrílico, etc.

Los acelerómetros pueden ser clasificados dependiendo de la dirección en la cual se desea conocer la aceleración, por lo tanto se pueden catalogar como acelerómetros uniaxiales biaxiales y triaxiales. Otra forma de clasificarlos se da a través de las características que definen su funcionamiento en el instante en que miden la aceleración.

La forma en que trabajan los transductores de aceleración se puede ejemplificar fácilmente considerando un sistema masa-resorte, en el cual, un bloque conocido como masa sísmica o masa de prueba, es conectado a una base a través de un resorte, tal como lo muestra la siguiente figura:

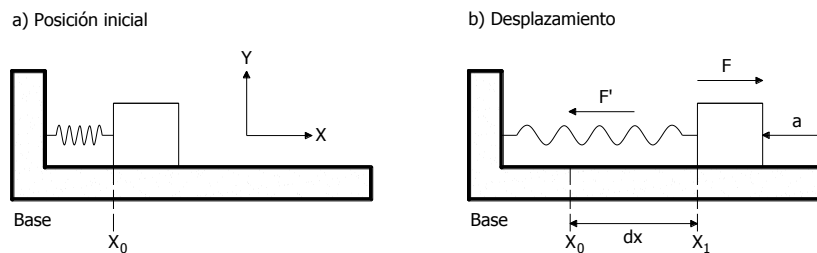


Figura 2.2: Configuración típica de un sistema masa-resorte (National Instruments).

En la figura 2.2a), se puede observar que tanto el bloque como el resorte se encuentran en reposo y posteriormente el bloque cambia de posición, como lo muestra la figura 2.2b). Al aplicar una fuerza F al bloque, éste se desplaza hacia la derecha y el resorte se extiende. Esta situación produce que el resorte aplique una fuerza de reacción F' . Al retirarse la fuerza F , el bloque se libera y se mueve al lado contrario. En ese instante, F' es proporcional a la masa del bloque y a la aceleración que este desarrolla durante su desplazamiento de acuerdo con la segunda ley de Newton, por lo cual:

$$F' = ma \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

m : masa en kg

a : aceleración en m/s^2

Por otro lado, si se considera que la fuerza que el resorte ejerce sobre el bloque es proporcional a la rigidez y elongación del mismo. La relación que existe entre estas variables se puede establecer con base en la ley de Hooke, entonces:

$$F' = kdx \quad \text{Ec. 2.2}$$

$$dx = x_1 - x_0 \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

K : Constante del resorte en N/m

dx : Extensión del resorte en m

Igualando la fuerza calculada con las ecuaciones 2.1, 2.2 e incluyendo la ecuación 2.3, se obtiene lo siguiente:

$$ma = k(x_1 - x_0) \quad \text{Ec. 2.4}$$

Despejando la aceleración:

$$a = \frac{k}{m}(x_1 - x_0) \quad \text{Ec. 2.5}$$

Este principio es aprovechado en diseño de una gran variedad de acelerómetros, ya que el transductor sólo se limita a efectuar la medición de un desplazamiento lineal. Los componentes de un acelerómetro son básicamente los mismos que se observaron en la figura 2.2, la única variante es el método empleado para medir el desplazamiento, en el cual se utilizan transductores que operan a base de elementos resistivos, campos electromagnéticos o cristales que producen piezoelectricidad. Por ejemplo, los acelerómetros piezoeléctricos se basan en una propiedad que sólo se encuentra en algunos cristales como el cuarzo. En este caso, dicho cristal se encuentra en contacto con una masa sísmica. Cuando ésta se encuentra en movimiento como producto de la aceleración, ejerce una fuerza de compresión o de tensión, sobre el cristal. Esto ocasiona un reacomodo de electrones y por lo tanto un desequilibrio en las cargas de los átomos del cristal. De esta manera, se produce una diferencia de potencial o voltaje, la cual es proporcional al desplazamiento de la masa. La unidad de voltaje es el Voltio y al medir su magnitud, se puede conocer la cantidad de desplazamiento y por lo tanto, la aceleración registrada en ese instante. Los elementos que componen este tipo de acelerómetro se pueden observar en la siguiente figura:

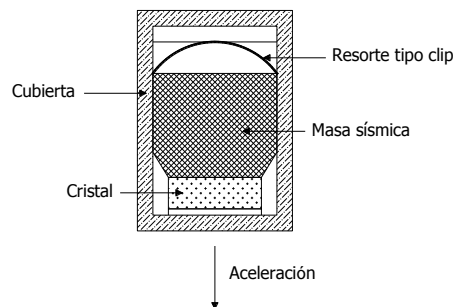


Figura 2.4: Acelerómetro piezoeléctrico (National Instruments).

La unidad de aceleración estándar es la aceleración de la gravedad "g" o bien 9.81m/s^2 , por lo cual, es común expresar el rango de medición de un acelerómetro en estas unidades. La mayoría de los acelerómetros que se encuentran comercialmente miden desde 2g en adelante y suelen usarse en pruebas de impacto, en aviones, automóviles, etc. Sin embargo, para aplicaciones relacionadas con el monitoreo de estructuras se acostumbra realizar pruebas de vibración ambiental para conocer sus propiedades dinámicas. Para tal propósito, las magnitudes de aceleración no son tan grandes, por lo tanto se pueden utilizar acelerómetros de 1g hasta 0.5g.

Por otro lado, es necesario contar con amplificadores de señal o con un sistema de captura diseñado para operar estos aparatos, ya que los voltajes de salida son relativamente pequeños, del orden de unos cuantos milivolts. De esta manera, se pueden apreciar estas variaciones y alcanzar el rango de medición deseado. Otra característica importante de estos dispositivos, es su frecuencia natural de vibración, la cual suele exceder los 5kHz. En general, se recomienda que los acelerómetros no sean utilizados para medir vibraciones con frecuencias cercanas a su frecuencia natural de vibración, ya que esto puede producir problemas de no linealidad en su respuesta. También hay que tomar en cuenta el rango medición, ya que por la resolución de los instrumentos y el ruido eléctrico que hay en las lecturas, no conviene utilizarlos en intervalos muy amplios. En el caso de edificios y puentes, las frecuencias que resultan de interés, tales como las que se encuentran asociadas a las primeras formas modales de vibración, generalmente no rebasan los 30 Hz, dada la rigidez de los mismos. Por lo cual, las mediciones pueden limitarse a este valor, mediante un filtrado pasa bajas.

2.3.2.2 Deformímetros.

Los deformímetros son instrumentos utilizados para medir la deformación producida por la aplicación de esfuerzos así como para determinar las propiedades mecánicas de los materiales empleados en elementos tales como piezas mecánicas de maquinaria o en vigas y columnas que forman parte de edificios y puentes. Entre los más comunes se encuentra el deformímetro de lámina, el cual se consta de una placa de metal delgado con un grabado en patrón de retícula, similar al que se utiliza en la elaboración de circuitos eléctricos, acoplada sobre una base delgada de resina como aislante eléctrico, tal como se muestra en la siguiente figura:

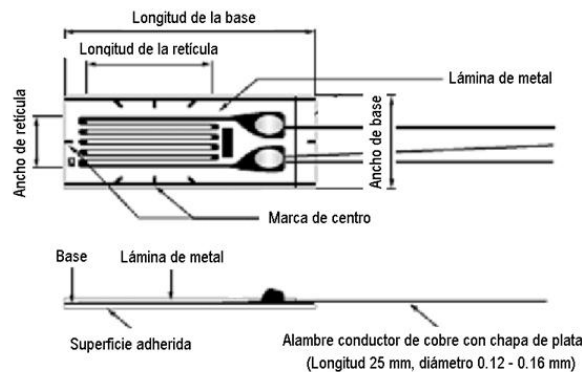


Figura 2.5: Elementos básicos de un deformímetro

El deformímetro es adherido al objeto que se va a medir con un adhesivo especial, de tal modo que si se presenta una deformación en el punto en estudio, esta se transmita a través de la base de resina hacia la placa metálica que conforma el elemento sensible. Para lograr una medición exacta, el deformímetro debe estar unido al objeto de interés, lo mejor posible, por lo se requiere que la superficie de aplicación este limpia, lisa y libre de humedad para que el pegamento surta el efecto deseado.

El principio de funcionamiento de un deformímetro se basa en el hecho de que algunos metales como el cobre, son buenos conductores de la corriente eléctrica, lo cual, se debe a que sus átomos ceden y aceptan electrones sin oponerse demasiado. Al grado de oposición que presenta un material al paso de la corriente eléctrica se le denomina resistencia eléctrica y se mide en Ohms. Los valores nominales de resistencia de estos dispositivos, comercialmente oscilan entre los 30 hasta los 3000 Ohms, siendo 120, 350 y 1000 Ohms los valores más comunes. Cuando la placa metálica que conforma el elemento sensor es deformada, como consecuencia de la aplicación de una fuerza de tensión o compresión, se incrementa o disminuye su resistencia. Suponiendo que la resistencia original del material en cuestión es R y la variación de la resistencia es ΔR , la relación que existe entre deformación y resistencia es:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_g \varepsilon \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

- K_g : Factor de calibración.
- ε : Deformación unitaria.

El factor de calibración K_s es un coeficiente que determina la sensibilidad de un deformímetro. Generalmente, el elemento resistente del deformímetro se elabora con aleaciones de cobre y níquel o níquel y cromo, ya que las propiedades de estos metales proporcionan un valor del factor de calibración de 2 aproximadamente. Sin embargo, este valor depende de los materiales utilizados por el fabricante, por lo cual, éste proporciona la magnitud de esta constante.

Otra situación que se presenta cuando ocurre la deformación es que la variación de la resistencia inicial es extremadamente pequeña. Para poder medir este cambio, se utiliza el puente de Wheatstone (figura 2.6), el cual consiste en un circuito mixto compuesto por cuatro elementos resistores, o bien, un circuito con elementos conectados en serie y en paralelo. Por ejemplo, los pares de resistencias formados por R_1 y R_3 , R_4 y R_2 , representan dos conjuntos de elementos conectados en serie, ya que cada componente se coloca uno a continuación del otro, en el sentido del flujo de la corriente de eléctrica (desde el polo negativo hacia al polo positivo de la fuente de alimentación). Como ésta alimenta a ambos pares de resistores simultáneamente, lo que se obtiene es una conexión de derivación o bien un circuito conectado en paralelo. De esta manera, se constituye un circuito mixto.

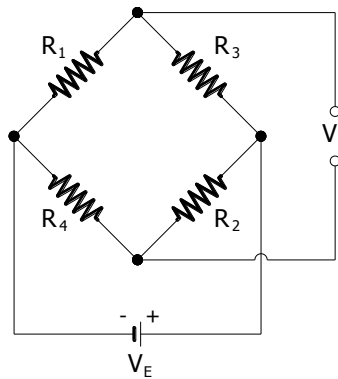


Figura 2.6: Puente de Wheatstone.

Las resistencias que conforman el puente de Wheatstone, transforman el incremento de resistencia en un cambio de voltaje de acuerdo con la ley de Ohm. Suponiendo que las resistencias tienen como valores R_1 , R_2 , R_3 y R_4 y que la diferencia de potencial en la entrada del puente es V_E , entonces, el voltaje de salida V_S se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$V_S = \frac{R_3 R_4 - R_1 R_2}{(R_4 + R_2)(R_1 + R_3)} V_E \quad \text{Ec. 2.7}$$

Si se considera que la resistencia R_4 es un sensor de deformación y cambia hasta un valor $R_4 + \Delta R$ debido al incremento de deformación. Entonces, la salida de voltaje es:

$$V_S = \frac{R_3(R_4 + \Delta R) - R_1 R_2}{(R_4 + \Delta R + R_2)(R_1 + R_3)} V_E \quad \text{Ec. 2.8}$$

Ahora, si $R_1=R_2=R_3=R_4$, la ecuación 2.8 se reescribe de la siguiente manera:

$$V_S = \frac{R^2 + R\Delta R - R^2}{(2R + \Delta R)2R} V_E \quad \text{Ec. 2.9}$$

En consecuencia el valor de R puede ser considerado extremadamente mayor que ΔR , por lo tanto:

$$V_S = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) V_E \quad \text{Ec. 2.10}$$

Sustituyendo la ecuación 2.6 en la ecuación 2.10 y despejando la deformación unitaria se obtiene lo siguiente:

$$\varepsilon = \frac{4V_S}{K_g V_E} \quad \text{Ec. 2.11}$$

De este modo se obtiene la deformación unitaria en términos de una salida de voltaje, la cual es proporcional a la variación de la resistencia. Esta microscópica salida de voltaje es amplificada y convertida en una señal digital mediante un convertidor analógico-digital.

Por otro lado, en un puente de Wheatstone, es común catalogar dos tipos de deformímetros, denominados deformímetros activos y pasivos. Los primeros, miden los esfuerzos que se desean conocer en el punto y dirección deseados. Los segundos, miden las deformaciones que no se desean medir tales como las ocasionadas por los cambios de temperatura. Para este efecto, se conectan en serie, un deformímetro activo y otro pasivo al puente de Wheatstone. El deformímetro pasivo, se adhiere a una muestra del mismo material, mientras ésta se encuentre la misma temperatura que el elemento en cuestión y no esté sometida a ningún otro esfuerzo, o en su defecto se instala cerca del punto de medición, pero, en una posición perpendicular a la dirección de la deformación, lo cual, prácticamente surte el mismo efecto.

Complementando lo anterior, también, se pueden mencionar tres formas distintas de acoplar los deformímetros al puente de Wheatstone. Por lo tanto, un deformímetro activo conectado a uno de los cuatro extremos o brazos del puente, representa un circuito de cuarto de puente; dos brazos con deformímetros activos constituyen un circuito de medio puente. Y una configuración que abarque los cuatro brazos con deformímetros activos conforma un circuito de puente completo. La figura 2.7 muestra algunos casos de aplicación.

En el caso a) se emplea una configuración de cuarto de puente en un voladizo, donde se tiene un deformímetro activo (1) y otro pasivo (3) para compensar la temperatura. El caso b) representa otra manera de compensar la temperatura en el mismo voladizo, para lo cual se coloca un deformímetro en dirección longitudinal (1) y el otro orientado transversalmente (3). En el caso c) se tiene una celda de carga, en la cual se colocan tres deformímetros activos en dirección longitudinal para compensar la temperatura (3) y otros tres en dirección transversal para considerar en la medición, las excentricidades en la aplicación de la fuerza (1). En el caso d) se emplean cuatro deformímetros, dos activos en la dirección longitudinal (1 y 2) y dos pasivos en la dirección transversal (3 y 4). En el caso e) se emplea una configuración de medio puente, donde hay dos deformímetros activos (1 y 2) y dos pasivos para compensación (3 y 4). En el caso f) se emplea una configuración de puente completo mediante cuatro deformímetros activos para detectar esfuerzos de torsión con sentidos opuestos, dos a dos. Estos arreglos con deformímetros se pueden utilizar también para medir presiones, cargas y aceleraciones mediante el uso de aditamentos especiales. También es importante cuidar que la fuerza aplicada, no deforme el material que compone el deformímetro más allá del 50% de su límite elástico, ya que esto permite garantizar el funcionamiento lineal del dispositivo.

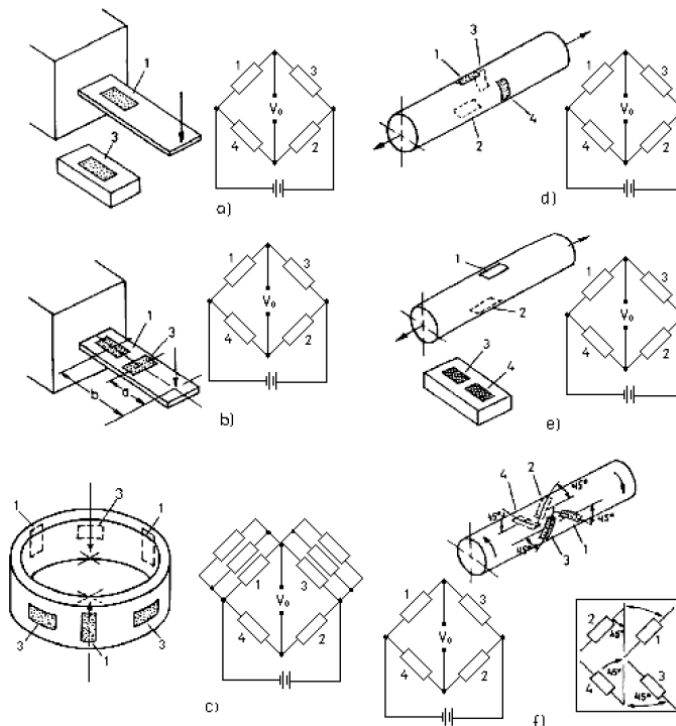


Figura 2.7: Diversas aplicaciones de los deformímetros para medir magnitudes mecánicas.

2.3.2.3 Transductores de desplazamiento.

El desplazamiento, se puede medir de diversas formas inclusive con deformímetros. De la gran gamma de dispositivos que se pueden utilizar, se encuentra el transformador diferencial variable lineal (LVDT) el cual es un dispositivo universal y se puede utilizar incluso como acelerómetro. La figura 2.8 muestra un LVDT convencional. Los desplazamientos que puede detectar son superiores a los que se pueden medir con deformímetros. Así los LVDT son adecuados para aplicaciones donde los desplazamientos son demasiado grandes como para ser medidos con deformímetros (Wolf et al., 2001). Sin embargo, cuando se emplean para medir pequeños desplazamientos la situación se complica, debido a que requieren de un punto de referencia para efectuar la medición y aditamentos de sujeción especiales, de acuerdo a su tamaño y forma. En cambio los deformímetros no tienen tantos inconvenientes, ya que sólo necesitan adherirse a la superficie del objeto en estudio, lo cual, facilita su instalación.

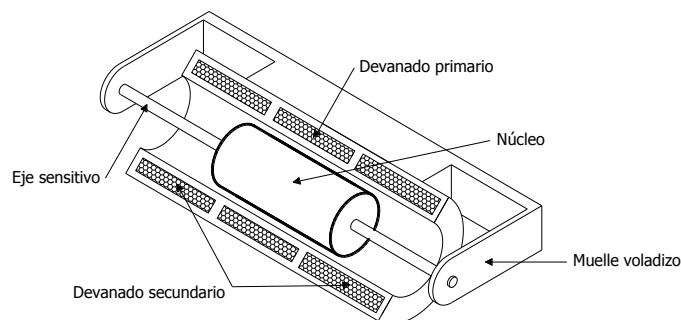


Figura 2.8: Transformador LVDT (National Instruments)

El LVDT mide el desplazamiento mediante el movimiento del núcleo ferromagnético contenido en su interior, el cual interactúa con el campo magnético que produce el devanado primario al ser alimentado con un voltaje. De esta forma se establece una diferencia de potencial en el núcleo por inducción electromagnética, lo cual le proporciona un campo magnético propio (figura 2.9).

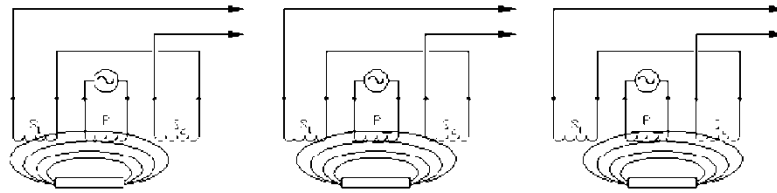


Figura 2.9: Interacción del núcleo con los devanados primario y secundario

Cuando el núcleo se encuentra en medio, el voltaje inducido en el devanado secundario es igual a cero. Sin embargo si este se mueve hacia la derecha o hacia la izquierda del devanado primario, se obtiene un voltaje de salida, el cual aumenta o disminuye dependiendo del sentido de la corriente de alimentación. El voltaje de salida es linealmente proporcional a la magnitud del desplazamiento. Entonces el desplazamiento medido se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$d = \frac{V_S}{sV_E} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde:

- d: Desplazamiento
- V_E : Voltaje de entrada
- V_S : Voltaje de salida
- s: Sensibilidad

La sensibilidad de un LVDT es un dato que proporciona el fabricante, por lo cual este parámetro depende del proveedor. En cambio, su resolución es independiente del modelo y marca utilizados, ya que sólo depende de la capacidad del sistema de captura utilizado, por lo cual, puede considerarse infinita.

2.3.2.4 Transductores de temperatura.

Una de las variables que se miden comúnmente en los procesos industriales, es la temperatura. Para tal efecto se utilizan transductores que operan bajo diversos principios de funcionamiento por lo cual se pueden encontrar detectores de temperatura resistivos, termopares y circuitos integrados específicos. Por ejemplo, el termistor es un dispositivo que mide la temperatura mediante un cambio de resistencia (figura 2.9). La resistencia de los materiales de los cuales se construyen decrece al aumentar la temperatura en un rango de -100 hasta +300 °C. La disminución de la resistencia involucra a las propiedades de los enlaces químicos de los semiconductores que constituyen al termistor. En estos materiales, los electrones de valencia se encuentran asegurados en enlaces covalentes a sus átomos respectivos. Cuando aumenta la temperatura, las vibraciones térmicas rompen los enlaces y liberan electrones. Como los electrones no están ligados a átomos específicos en la red, se suman a la corriente eléctrica que pasa a través de un semiconductor y el material parece tener menos resistencia.

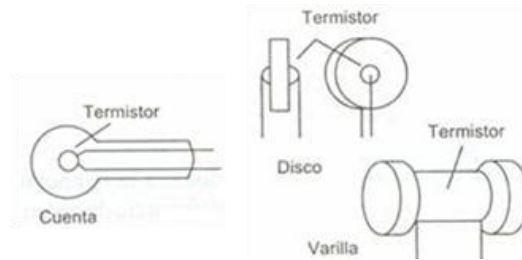


Figura 2.9: Diferentes tipos de termistores.

Este principio de funcionamiento es muy ventajoso ya que si el termistor se conecta a un puente de Wheatstone, el sistema de medición puede llegar a detectar cambios de temperatura tan pequeños como ± 0.005 °C. Sin embargo la variación de la resistencia no es lineal, por lo cual dicha respuesta puede ajustarse aproximadamente con la ecuación de Steinhart-Hart:

$$T = \frac{1}{A + B \ln R + C (\ln R)^3} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Donde:

- A, B y C: Constantes de ajuste de curva
- R: Resistencia del termistor en Ohms
- T: temperatura medida en K

Las constantes A, B y C se calculan seleccionando tres puntos que son datos proporcionados por el fabricante, por lo cual se obtienen tres ecuaciones que pueden resolverse simultáneamente. El resultado es una ecuación de ajuste que tiene una aproximación de ± 0.02 °C con la curvatura real (Wolf et al., 2001).

2.3.2.5 Anemómetros.

El viento es un fenómeno meteorológico que se caracteriza por el movimiento del aire como consecuencia del desplazamiento de las masas de gas que conforman la atmosfera; desde las zonas de alta presión hacia las zonas de baja presión. La presencia de las ráfagas de viento produce sollicitaciones en las estructuras tales como desplazamientos en edificios altos y en puentes, lo que en ocasiones puede dificultar el proceso constructivo o en casos extremos, poner en peligro la estabilidad de los mismos. Por otro lado, también, se pueden aprovechar para generar electricidad mediante el uso de generadores especiales o aerogeneradores. Para ello es indispensable medir la velocidad del viento y determinar la dirección en la cual se presenta con mayor intensidad.

La velocidad del aire, se mide con el anemómetro y su dirección con la veleta. Existen una gran variedad de modelos en el mercado y los hay, tanto fijos como portátiles. La figura 2.10 muestra la imagen de un anemómetro de molinete o tipo Robinson. Este, es uno de los más utilizados en mediciones de campo, por su simplicidad constructiva y su constitución robusta, ya que esto le permite soportar corrientes de aire muy fuertes.



Figura 2.10: Anemómetro tipo Robinson.

Su principio de funcionamiento es muy básico. La forma de las cazoletas que conforman el molinete, está diseñada de tal modo, que su resistencia aerodinámica sea diferente tanto en la parte cóncava y como en la convexa. Cuando el aire incide en la superficie cóncava de alguna de las cazoletas, la oposición al paso del mismo es tal, que se transmite gran parte de la fuerza del viento al eje rotatorio del molinete. El momento mecánico producido entre las cazoletas y el eje rotatorio hace que el molinete gire con una determinada velocidad angular, la cual es proporcional a la velocidad del viento. Por lo tanto, esta última, se puede conocer mediante la siguiente expresión:

$$v = r\omega \quad \text{Ec. 2.14}$$

Donde:

v: Velocidad del viento en m/s

r: Radio medido desde centro de las cazoletas al eje rotatorio en m

ω : Velocidad angular en rad/s

La velocidad angular puede obtenerse de diversas formas, ya sea mediante dinamos tacométricas, sensores de efecto Hall y sensores ópticos. En el caso de los anemómetros tipo Robinson, es común utilizar una dinamo tacométrica o generador eléctrico de corriente continua y medir el voltaje suministrado por la acción del viento. La siguiente figura muestra esquemáticamente, el principio de operación de un generador eléctrico de corriente continua:

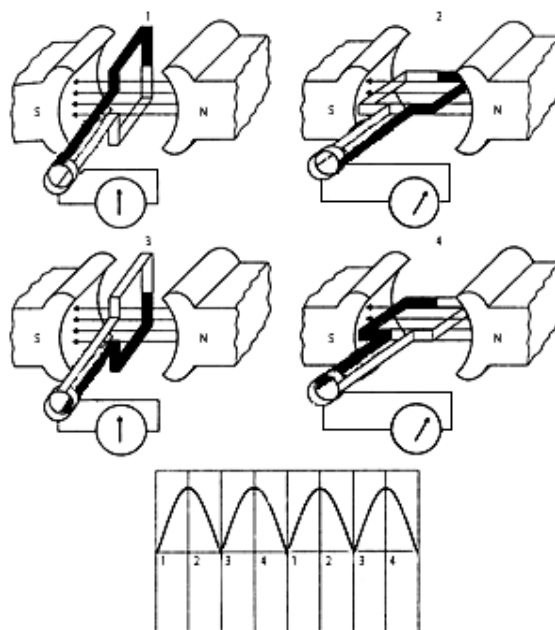


Figura 2.11: Principio de funcionamiento de un generador eléctrico de corriente continua.

El voltaje a medir, se obtiene cuando un elemento del generador denominado armadura gira en el interior de un campo magnético producido por imanes permanentes. En un instante, la armadura forma un ángulo de 90° o 270° con las líneas del campo magnético, por lo tanto, la diferencia de potencial es nula (posición 1 y 3). En contraste el valor máximo se alcanza cuando ésta, forma un ángulo de 180° o 360° (posición 2 y 4). Mientras que en ángulos intermedios se generan voltajes de menor magnitud. Al medir secuencialmente estas variaciones se puede observar una gráfica como la que se muestra al final de la figura 2.11. En la cual, se puede apreciar que el voltaje obtenido, es positivo. Si la armadura girara en el sentido contrario las manecillas del reloj, se obtendría un voltaje negativo. Esta es una característica propia de las dinamos tacométricas, ya que en otras aplicaciones, además de ayudar a determinar la velocidad, permiten conocer el sentido de giro. Sin embargo, esto último no es necesario, ya que las cazoletas están diseñadas de tal modo, que su rotación se da en un sólo sentido.

De lo anterior, se puede concluir que el voltaje generado, depende de la velocidad angular que alcanza la armadura al girar, del ángulo que forma en relación a las líneas de acción del campo magnético y de la intensidad del mismo. La siguiente ecuación muestra la relación que existe entre las variables mencionadas:

$$V_g = cB\omega \quad Ec \ 2.15$$

Donde:

- V_g : Voltaje generado
- c : Constante de proporcionalidad en $V \cdot s/T$
- B : Intensidad del campo magnético en Teslas
- ω : Velocidad angular en rad/s

La constante de proporcionalidad c , depende de algunos detalles constructivos del generador tales como el diámetro y la longitud de la armadura. Por lo tanto, este dato suele ser proporcionado por el fabricante, al igual que la intensidad del campo magnético. Al tomar en cuenta lo antepuesto y considerando que el radio de giro de las cazoletas no cambia. Se despeja la velocidad angular de la ecuación 2.15 y se sustituye en la ecuación 2.14. Por lo tanto, la velocidad del viento puede obtenerse a través de la siguiente expresión:

$$v = kV_g \quad Ec \ 2.16$$

Donde k concentra los valores de las constantes representados en las ecuaciones 2.14 y 2.15. El valor de dicha constante se almacena en el sistema de captura del anemómetro y por lo tanto, al multiplicarla por el voltaje medido y haciendo las conversiones pertinentes, se puede conocer la velocidad del viento, ya sea en m/s , en km/hr o en nudos (si se realizan mediciones en el mar).

Por otro lado, para conocer la dirección del viento, la veleta cuenta con mecanismo a base de un potenciómetro. En este caso, la veleta se alinea en la dirección norte y el potenciómetro se alimenta con un voltaje fijo. De este modo, la tensión máxima registrada corresponde a la dirección norte, y a medida que la veleta gira, el valor de voltaje decrece hasta un valor mínimo, el cual se fija para una posición cercana a los 360° . La mayoría de los sistemas de captura comerciales, permiten obtener rumbos en un rango de 0 a 360° y con una resolución de 1° , ya que en realidad no se requiere gran exactitud, dadas las variaciones de las corrientes de aire.

2.3.2.6 Cuerdas vibrantes.

La ventaja de los sensores de cuerda vibrante sobre los tipos más convencionales es que estos miden principalmente una frecuencia en lugar de un voltaje. Las frecuencias se pueden transmitir a través cables largos (más de 2000 m) sin la degradación apreciable de la señal causada por variaciones en la resistencia del cable que puede presentarse por penetración del agua, de fluctuaciones de temperatura, de resistencia de contacto o de salida a tierra. Lo cual satisface idealmente las mediciones a largo plazo en ambientes adversos (Geokon, 2005). La siguiente figura muestra los elementos básicos que integran una cuerda vibrante.

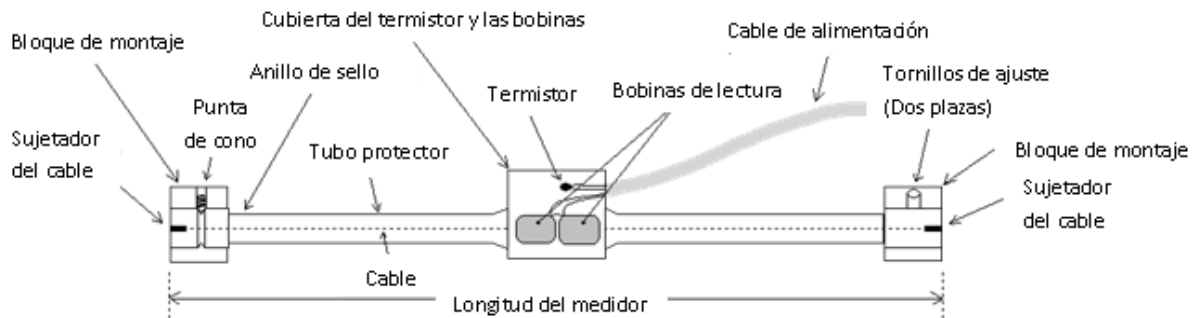


Figura 2.12: Cuerda vibrante, marca Geokon, modelo 4000.

Una de las dos bobinas localizadas al centro del medidor es alimentada con un voltaje variable, lo cual produce un campo electromagnético que se intensifica y atenúa; atrayendo y liberando el cable de acero, haciendo que este vibre. Mientras tanto, la bobina restante, sirve como medio para medir la frecuencia de una señal de voltaje alterna. Esta es generada, debido a la interacción de dicha bobina con el campo magnético que adquiere el cable por inducción electromagnética. La magnitud de la señal es independiente del voltaje de alimentación, ya que está asociada la amplitud de las vibraciones del cable. Por lo tanto, la frecuencia sólo depende de la densidad lineal y la fuerza de tensión ejercida en el cable.

Cuando un cable vibrante llega a deformarse, se modifican sus dimensiones alterando la magnitud de la tensión y en consecuencia, también la frecuencia natural de vibración. Esta relación fundamental se utiliza en una variedad de configuraciones de dispositivos para la medir tensión, carga, fuerza, presión o inclinación. La relación entre la frecuencia y la deformación es descrita a continuación:

La frecuencia natural de vibración un cable se relaciona a la tensión, longitud y la masa del mismo por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{2L_w} \sqrt{\frac{F}{m}} \quad \text{Ec. 2.17}$$

Donde:

- L_w : Longitud del cable en pulgadas
- F : Tensión en el cable medida en libras
- m : Masa del cable por unidad de longitud

La masa del cable se puede expresar de la siguiente manera:

$$m = \frac{W}{L_w g} \quad \text{Ec. 2.18}$$

Donde:

- W: Peso L_w por pulgada de cable
- g: Aceleración de la gravedad
- m: Masa del cable por unidad de longitud

Mientras, el peso se obtiene como:

$$W = \rho a L_w \quad \text{Ec. 2.19}$$

Donde:

- ρ : Densidad del cable
- a: Area de la sección transversal del cable

Combinando las ecuaciones 2.17, 2.18 y 2.19 se tiene lo siguiente:

$$f = \frac{1}{2L_w} \sqrt{\frac{Fg}{\rho a}} \quad \text{Ec. 2.20}$$

La tensión puede expresarse en términos de la deformación del cable, por lo cual:

$$F = \varepsilon_w E a \quad \text{Ec. 2.21}$$

Donde:

- ε_w : Deformación unitaria
- E: Módulo de elasticidad del cable

Con base en lo anterior, la frecuencia se puede calcular sustituyendo la ecuación 2.21 en la ecuación 2.20 de la siguiente manera:

$$f = \frac{1}{2L_w} \sqrt{\frac{\varepsilon_w E g}{\rho}} \quad \text{Ec. 2.22}$$

Al despejar la deformación unitaria de la ecuación 2.22

$$\varepsilon_w = \frac{4\rho(fL_w)^2}{Eg} \quad \text{Ec. 2.23}$$

Por otro lado, Hay que tomar en cuenta que tanto el cable de acero como el tubo protector son del mismo material, por lo cual, ambos elementos son sometidos a la misma deformación, entonces:

$$\varepsilon_w L_w = \varepsilon L_g \quad Ec. 2.24$$

Donde:

ε : Deformación unitaria del tubo protector.

L_g : Longitud del tubo protector.

Despejando la deformación unitaria del tubo protector de la cuerda vibrante y sustituyendo la ecuación 2.23, se obtiene lo siguiente:

$$\varepsilon = \frac{4\rho f^2 L_w^3}{2Eg L_g} \quad Ec. 2.25$$

Para el modelo 4000 de Geokon, los valores de las constantes proporcionados por el fabricante son los siguientes:

$$\begin{aligned} L_g &= 5.875 \text{ in} & g &= 386 \text{ lb/in}^2 \\ L_w &= 6.25 \text{ in} & \rho &= 0.283 \text{ lb/in}^3 \\ E &= 3 \times 10^7 \text{ psi} \end{aligned}$$

Finalmente, al sustituir valores, se tiene:

$$\varepsilon = (4.0623 \times 10^{-3}) f^2 \quad Ec. 2.26$$

De acuerdo con la ecuación 2.26, se puede determinar la deformación unitaria en el punto seleccionado, solo basta con conocer la frecuencia de vibración de la cuerda, la cual, es proporcionada por el sistema de captura empleado.

CAPÍTULO 3.

LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA INSTRUMENTACIÓN.

Hoy en día, la mayoría de los métodos tradicionales de monitoreo han implicado el uso de cables para comunicar los instrumentos con los sistemas de adquisición de datos. Esta práctica en ocasiones llega a ser costosa y problemática, ya que las longitudes de los cables utilizados pueden restringir el desempeño de los sensores e inclusive dificultar su instalación. Ante esta problemática, lo ideal es el uso de sensores inalámbricos. Sin embargo, su viabilidad aún se encuentra en fase de prueba, dadas las limitaciones que presentan por el uso de baterías, la reciente necesidad de normas que estandaricen su fabricación y el establecimiento de protocolos e interfaces de radiocomunicación (Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX, HFSS, etc.) que permitan su operación, debido al potencial incremento de posibles interferencias por parte de otros dispositivos que también los utilizan (Ramos, 2011).

Una alternativa para transmitir múltiples señales y altas densidades de información, que ha resultado muy exitosa en el campo de las telecomunicaciones, es el uso de la fibra óptica. Su incursión en el desarrollo de sistemas de adquisición de datos para el monitoreo estructural ha adquirido una gran aceptación, por lo cual su uso se ha extendido a la elaboración de diversos aparatos de medición. Por otro lado, el empleo de receptores de GPS ha permitido la incorporación de elementos semi-inalámbricos que forman parte de los sistemas de captura, tales como algunos registradores de datos, los cuales pueden sincronizarse mediante el uso del reloj interno del GPS, reduciendo las longitudes de cables que utilizan los sensores y abarcando grandes trayectos. Mientras tanto, del ámbito industrial se han incorporado algunas aplicaciones tecnológicas, como los sensores láser, cuya utilidad se basa en verificar dimensiones en procesos de fabricación automatizados y control de calidad. Las ventajas que ofrecen estos dispositivos se pueden aprovechar para medir grandes extensiones de terreno en levantamientos topográficos, realizar revisiones estructurales o coordinar maniobras constructivas. A continuación se comentan algunos aspectos relevantes de estas tecnologías

3.1 La fibra óptica.

Es un filamento de cristal o plástico compuesto por óxido de silicio y germanio, delgado, similar a un cabello, cuyo diámetro varía entre 125 y 500 milésimas de milímetro. Su funcionamiento se basa en la ley de Snell y el principio de la reflexión interna. Por lo tanto, al transmitir un haz de luz a través de su núcleo, este se refleja y se propaga por toda su longitud de tal modo que este no atraviese el revestimiento que lo cubre (figura 3.1). Esto se logra cubriendo la fibra con un material cuyo índice de refracción sea menor que el del núcleo o bien, procurando que el ángulo de incidencia sea superior al ángulo límite (figura 3.2).

En un sistema basado en fibra óptica, existe un transmisor que se encarga de transformar una señal analógica en energía luminosa mediante LED'S (diodos emisores de luz) o rayos láser. La señal luminosa se propaga a través de un conjunto formado por varias fibras que se concentran en un sólo cable. Posteriormente, la señal emitida por el transmisor llega al otro extremo, donde se encuentra un tercer componente al que se le denomina detector óptico o receptor, el cual se encarga de revertir el proceso, obteniéndose así, una señal similar a la original.

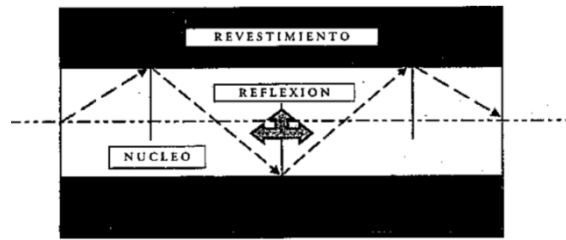


Figura 3.1: Condiciones de reflexión en una fibra óptica (López ,2005)

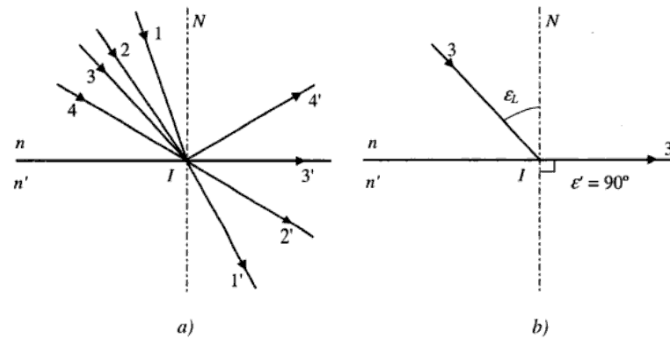


Figura 3.2: a) Trayectoria de los rayos cuando $n > n'$ b) Angulo límite ϵ_L , cuando $\epsilon' = 90^\circ$ (Soteras, et al., 2004)

Este medio de transmisión es muy versátil, ya que los impulsos luminosos no son afectados por las interferencias causadas por la radiación aleatoria del ambiente. Además, no se conducen señales eléctricas, por lo tanto, las pérdidas son menores y se puede de transmitir información por varios kilómetros, lo cual, no se logra tan fácil con los métodos convencionales que emplean conductores de cobre. Por esta razón, la fibra óptica es aprovechada en para la fabricación de sistemas de monitoreo e incluso en el desarrollo de sensores, los cuales, tienen una alta resolución y capacidades de medición. Además, son inmunes a la interferencia ocasionada por las ondas de radio, la temperatura y el electromagnetismo (Ogaja et al., 2007).

El principio de operación de estos dispositivos consiste en transformar un cambio en la magnitud a medir en una variable diferente cuantificable. El elemento sensitivo está conformado por fibra óptica, la cual, es afectada por la variación del parámetro monitoreado. Esto a su vez ocasiona que se modifiquen las propiedades de la luz que guía. Tales cambios pueden involucrar, intensidad, fase, amplitud, frecuencia, longitud de onda, estado de polarización o una combinación de estos (Branko, et al., 2007). Existe una gran variedad de sensores que se basan en diversas tecnologías que permiten aprovechar estas variantes mediante el uso de sistemas demoduladores apropiados. Entre los más comunes se encuentran los interferómetros Fabry-Perot, las fibras ranuradas de Bragg, de dispersión de Raman, dispersión de Brillouin, etc. Las figuras 3.3 y 3.4 muestran algunos ejemplos de estos dispositivos. Otra forma de clasificarlos, es haciendo referencia al entorno en el que la luz es modificada, ya sea en el interior o fuera del elemento sensor, por lo cual, se les denomina como intrínsecos o extrínsecos. También pueden ser clasificados como puntuales, casi-distribuidos y distribuidos, dependiendo del rango de sensibilidad. La tabla 3.1 muestra algunas características de los sensores de fibra óptica:

	Sensores	Parámetros	Respuesta lineal	Resolución	Rango	Método de modulación	Intrínseco/ extrínseco
Puntuales	Fabry-Perot	Deformación ¹	Sí	0.01% de la longitud del sensor ³	10 000 $\mu\epsilon$	Fase	Ambos
	De gran longitud	Desplazamiento	Sí	0.2% de la longitud del sensor ⁴	50 m	Fase	Intrínseco
Casi-distribuidos	Fibras ranuradas de Bragg	Deformación ²	Sí	1 $\mu\epsilon$	5000 $\mu\epsilon$	Longitud de onda	Intrínseco
Distribuidos	Raman/Rayleigh	Temperatura/ deformación	No	0.1 °C/0.5 m	8 km	Intensidad	Intrínseco
	Brillouin	Temperatura/ deformación	No	0.2 °C/0.5 m	30-150 km	Intensidad	Intrínseco

1. Pueden configurarse para medir desplazamiento, presión y temperatura.
2. Pueden configurarse para medir desplazamiento, presión, temperatura, aceleración, inclinación, etc.
3. Resolución, hasta 0.1 $\mu\epsilon$.
4. Resolución, hasta 0.2 $\mu\epsilon$.

Tabla 3.1 Características típicas de los sensores de fibra óptica

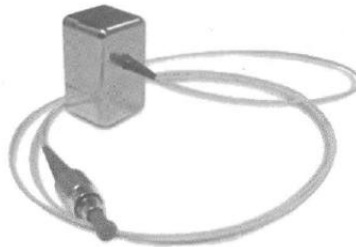


Figura 3.3: Acelerómetro uniaxial de fibra ranurada de Bragg (Branko, et al., 2007)



Figura 3.4: Sensores interferométricos Fabry-Perot, para medir esfuerzo, presión y temperatura (Branko, et al., 2007)

3.2 El GPS.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) se inició en 1958 como un proyecto denominado Sistema Satelital de Navegación Naval (NNSS), el cual fue desarrollado para que la marina de los Estados Unidos pudiera conocer la posición de sus embarcaciones en todo momento y en cualquier lugar del mundo (Wolf Paul, et al). Por lo cual, su uso comercial tuvo sus inicios a partir del año de 1993. Consiste en una constelación de 24 satélites, de los cuales, 21 se denominan primarios y los 3 restantes son de reserva. Estos dispositivos, orbitan circularmente a una altura media de 20,200 km de la superficie de la Tierra, completando su recorrido cada 12 horas. Las

órbitas de los satélites forman una red que envuelve la esfera terrestre, de forma que se puedan observar 5 satélites desde cualquier punto teórico de su superficie. De este modo y dependiendo de la orografía, el receptor GPS puede recibir y procesar las señales emitidas por al menos 3 satélites (figura 3.5).

Los datos transmitidos proporcionan una posición tridimensional de alta precisión, de forma permanente y en cualquier región del planeta, la cual, puede ser decodificada por un receptor de GPS, obteniéndose información relevante, tal como las coordenadas geográficas de un punto expresadas en latitud, longitud, altitud; rumbos y rutas marítimas o terrestres; así como la velocidad de vehículos en movimiento, tales como barcos, aviones o automóviles, entre otros.

Durante la década pasada ha aumentado el número de investigadores que ha comprobado la factibilidad del uso de la tecnología del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el monitoreo del comportamiento dinámico de construcciones altas tales como edificios, torres y puentes ante la presencia de terremotos, los efectos del viento o el tráfico vehicular (figura 3.6).

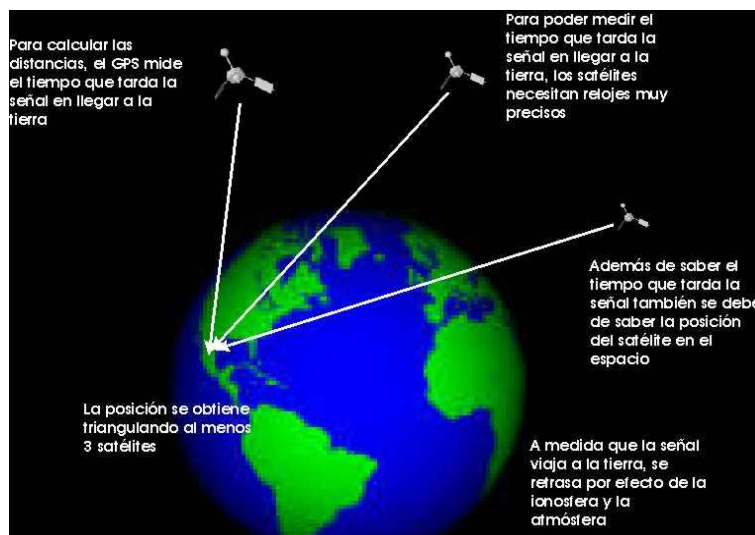


Figura 3.5: Esquema del funcionamiento del GPS (www.mendibike.net)

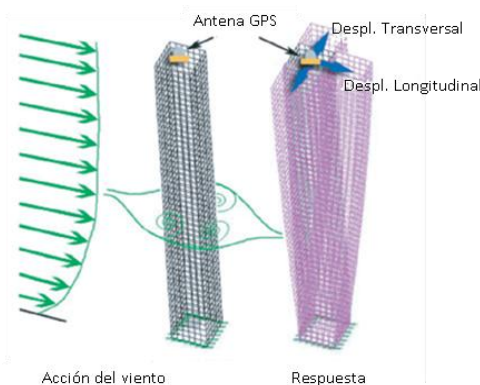


Figura 3.6: Esquema de la deformación inducida por la acción del viento en un edificio monitoreado con GPS (kijewski-Correa y Kareem 2003)

Históricamente, los acelerómetros han sido utilizados para el monitoreo de desplazamientos en estructuras mediante la doble integración numérica de los datos obtenidos. (e.g. Celebi 1993,1994). Los acelerómetros pueden registrar hasta 1KHz o frecuencias mayores (Chan. et al., 2006). Sin embargo, resultados de los desplazamientos se obtienen con una desviación indeseable y no pueden observarse en tiempo real. A diferencia de los acelerómetros, con el GPS se adquieren desplazamientos en tiempo real, pero con frecuencias de captura de datos muy inferiores. La mayoría de los receptores de GPS que se encuentran en el mercado, manejan tasas de muestreo del orden de 20 Hz. Sin embargo, algunos fabricantes han desarrollado sistemas que alcanzan tasas de muestreo mayores, del orden de 50 a 100 Hz. Es por ello, que las características complementarias de los dos sistemas han motivado el desarrollo de acelerómetros con GPS integrado, para el monitoreo estructural (Ogaja Clement, et al., 2007). De manera similar, se han integrado otras tecnologías tales como la fibra óptica y los pseudolitos (pseudo-satélites). Estos últimos, ofrecen ciertas ventajas, tales como brindar la capacidad de implementar sistemas de posicionamiento propio, independientes del GPS, lo cual, puede ser útil en situaciones donde las señales están bloqueadas (interferencia con otras señales, conflictos bélicos), o simplemente no existen (exploración de otros planetas), etc. (Eriksson R.).

3.3 El escáner digital.

El escáner láser es una de las tecnologías más recientes, empleadas en la elaboración de levantamientos topográficos. Su aplicación ha demostrado que las tareas de campo se reducen considerablemente hasta una quinta parte del tiempo necesario para su ejecución en comparación con los métodos tradicionales de acuerdo con la cantidad de actividades a realizar y la topografía del lugar (Leica Geosystems, 2007). Es un aparato motorizado semejante a una estación total, el cual emite un rayo láser, que puede realizar un barrido horizontal de 360° y otro vertical de 270° (figura 3.7). Cuando este incide sobre un obstáculo, se refleja; la radiación reflejada es detectada por un sensor de luz instalado en el escáner. Conociendo la velocidad de con la cual viaja el haz de luz emitido por el láser y determinando el tiempo que tarda en regresar al punto de origen, se puede calcular la distancia que hay entre la posición del escáner y el punto de medición y establecer las coordenadas cartesianas de un punto en cuestión.

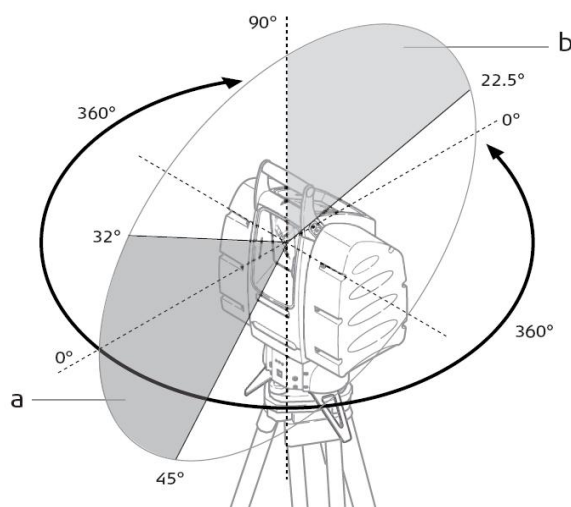


Figura 3.7: Escáner laser HDS ScanStation 2 (Leica Geosystems, 2007)

Este principio de operación también lo domina la estación total, sin embargo, la diferencia radica en que el escáner digital es capaz de capturar no solo uno, si no, varios puntos, con una separación de hasta 1 mm y una de velocidad de 50,000 puntos/s, los cuales permiten generar una imagen tridimensional del sitio a través de la superposición de una nube de puntos, tal como lo muestra la siguiente figura:

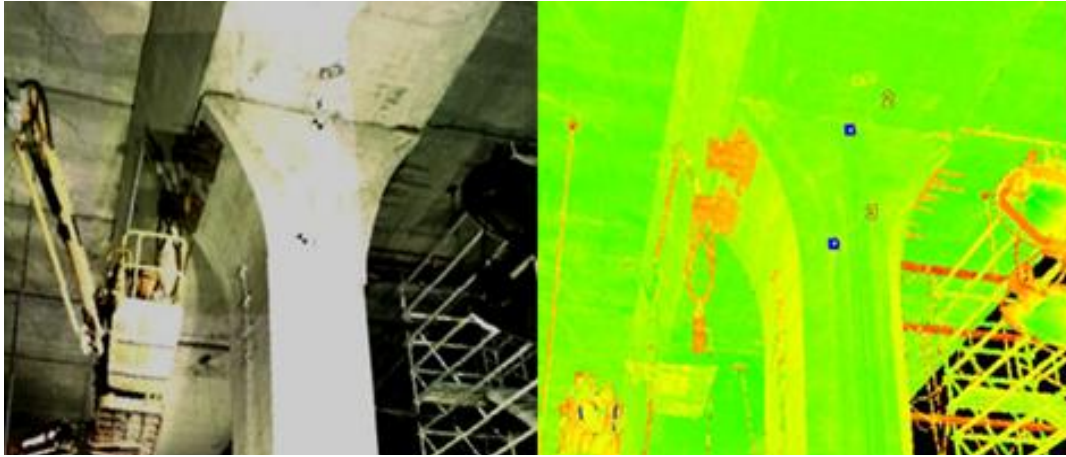


Figura 3.8: Comparación entre una imagen normal y un escaneo (II-UNAM, 2010)

Las marcas de color negro, que aparecen en la columna; en la imagen del lado izquierdo, representan algunos puntos de control localizados en regiones estratégicas de una columna del Viaducto Bicentenario, cuyo diseño fue revisado mediante una prueba de carga lateral. La imagen del lado derecho representa un escaneo previo a la aplicación de la carga. En este caso, la desventaja del uso de la nube de puntos radica en que el escaneo demora demasiado tiempo (30 min.) comparado con la duración de cada etapa de la prueba (5 min. por cada incremento de carga), por lo cual, es más práctico determinar las coordenadas de algunos puntos antes, durante y después de la aplicación de la carga y calcular posteriormente, el desplazamiento relativo de los mismos.

El uso de este aparato no es recomendado para realizar pruebas de carga dinámica en estructuras, o localizar puntos de control que se encuentren a más de 300 m. Sin embargo, puede ser utilizado en pruebas donde la carga es aplicada cuasi-estáticamente o bien, para realizar mediciones en lugares riesgosos en levantamientos topográficos. Así como en el diseño de sistemas de tubería; documentar recintos arqueológicos, edificios históricos e inclusive recrear accidentes y escenarios para análisis forenses.

CAPÍTULO 4.

LA INSTRUMENTACIÓN DE OBRAS CIVILES EN MÉXICO.

La instrumentación de edificios en México, inicia en el año de 1950 con la instalación de transductores de desplazamiento en la Torre Latino Americana, en una primera etapa y posteriormente con la incorporación de algunos acelerógrafos (Alcántara et al., 2005). Después del sismo de San Marcos ocurrido en 1957, cuya magnitud fue de 7.5 en la escala de Richter y que derribó el monumento conocido como el Ángel de la Independencia, los ingenieros mexicanos reconocieron la necesidad de medir las ondas sísmicas generadas por temblores fuertes desde su origen, para estudiar sus efectos en el suelo y especialmente en las estructuras vulnerables a los daños que producen.

El resultado de los registros sísmicos obtenidos a partir de la segunda mitad del siglo XX en nuestro país fue una referencia para establecer los coeficientes sísmicos propuestos en las normas de construcción del Distrito Federal, los cuales, son fundamentales para el diseño sismo-resistente de edificios en la actualidad. Desafortunadamente esto no motivó el interés para instrumentar edificios a pesar de que la idea fue promovida por grandes personalidades de la Ingeniería civil como el Dr. Leonardo Zeevaert, así como por el Instituto de Ingeniería de la UNAM a través del Ing. Jorge Prince. La cantidad de edificios instrumentados en el país era prácticamente nula cuando ocurrieron los sismos de septiembre de 1985, por ello, se perdió la oportunidad de realizar evaluaciones estructurales cuantitativas en las construcciones de las poblaciones afectadas por el sismo de Manzanillo, el cual, resultó ser de gran intensidad y magnitud. A partir de estos acontecimientos, se han realizado grandes esfuerzos por lograr la expansión y modernización de la red acelerográfica mexicana a fin de caracterizar adecuadamente la respuesta sísmica en diversos sitios del país. De la información recabada, se han abierto diversas líneas de investigación, de las cuales, se han desarrollado algunos trabajos, tales como la elaboración de mapas de riesgo sísmico, la microzonificación de áreas de terreno blando donde se han desarrollado importantes asentamientos urbanos y la creación de un Atlas de riesgos sísmicos.

Actualmente, el número de edificios instrumentados en se reduce a menos de 30 en todo el país debido a lo elevado de los costo que implica el realización de estos trabajos (Alcántara et al., 2005). Sin embargo, el uso de instrumentación temporal para la realización de pruebas en campo ha comenzado a ganar terreno. Algunas instituciones tales como la Comisión Federal de Electricidad han solicitado al II-UNAM la realización de pruebas de vibración ambiental para la elaboración de estudios que permitan determinar la condición estructural de algunos de sus edificios. Por otra parte, el Gobierno del Distrito Federal a través del Comité Técnico que apoyó el desarrollo del proyecto del Distribuidor vial de San Antonio solicitó la elaboración de diversas pruebas para verificar los parámetros de diseño empleados en la construcción de las pilas que conforman la subestructura. Para este propósito, se llevaron a cabo, ensayos de carga con camiones de volteo y de tracción con grúa, de los cuales se midió la vibración del ambiente y los desplazamientos inducidos a las columnas. La figura 4.1 muestra algunos de los resultados obtenidos. Inclusive se tiene en mente la puesta en marcha de algunas pruebas para auxiliar el proceso constructivo de la línea 12 del metro en algunos puntos específicos. Lo cual, representa un panorama prometedor para la práctica del monitoreo estructural en nuestro país.

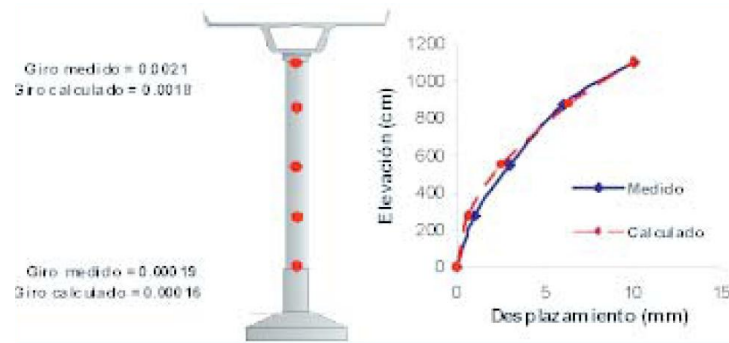


Figura 4.1: Deformación medida y calculada en el eje A15 para la prueba de tracción con grúa (CT, 2005)

4.1 Algunos ejemplos de obras civiles instrumentadas en México.

La mayoría de las obras civiles que conforman la infraestructura de nuestro país y particularmente en la ciudad de México, se ven afectadas en gran parte por la propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo, por lo cual, el mayor porcentaje de los esfuerzos para instrumentar edificios se encamina a estudiar su respuesta sísmica (Alcántara et al., 1991; Meli et al., 1994). La gran mayoría se localiza en el Distrito Federal, por lo tanto, el II-UNAM ha instrumentado nueve estructuras de las cuales, cinco son edificios, un monumento histórico, una red de conducción de agua potable, un puente vehicular y un relleno sanitario, tal como lo indica la siguiente tabla:

Edificio	Puntos de Medición	Características
Córdoba	13	Edificio de concreto reforzado de 18 niveles
Juárez	5	Edificio de concreto reforzado de 12 niveles
Jalapa	14	Edificio de concreto reforzado de 14 niveles
Sistema Cutzamala	3	Tubería de abastecimiento de agua a la ciudad de México
Catedral	6	Monumento Colonial (Catedral Metropolitana de la ciudad de México)
Puente Impulsora	5	Puente Vehicular de concreto prefabricado
SIS	24	Edificio de concreto reforzado (Cd. de Acapulco) 18 niveles
Relleno Sanitario	5	Macroelda de un relleno sanitario en la zona de Texcoco
Telecomm	29	Torre de telecomunicaciones, edificio de concreto reforzado de 18 niveles

Tabla 4.1: Estructuras instrumentados por el Instituto de Ingeniería en México (Alcántara, et al., 2005)

Los primeros cinco edificios que aparecen en la tabla son de concreto reforzado, cuatro de ellos localizados en la ciudad de México (Córdoba, Juárez, Jalapa y Telecomm) y uno en la ciudad de Acapulco (SIS). Todos ellos cuentan con instrumentación sísmica permanente dotada por una red de acelerómetros triaxiales colocados en forma similar. Adicionalmente a los edificios que aparecen en la tabla 4.1 se han añadido otras construcciones, entre las cuales se pueden mencionar el puente Chiapas y el puente San Cristóbal que se localizan en el estado de Chiapas; la Torre del Centro Cultural Universitario de Tlatelolco y el Palacio Nacional, en el Distrito federal (aunque este último ya se encontraba instrumentado desde el año de 1994, se le han

incorporado más dispositivos últimamente). Y finalmente, un tramo del Viaducto Bicentenario, el cual fue inaugurado recientemente en el Estado de México. A continuación, se citan algunos ejemplos de construcciones dotadas con instrumentación sísmica, así como con otros tipos de instrumentación:

4.1.1 Edificio Jalapa.

El edificio se localiza en una zona de suelo blando de la ciudad de México, en donde el espesor del suelo arcilloso es de 30 m y los depósitos profundos se encuentran a 38.5m. Está compuesto por una estructura de concreto reforzado con catorce niveles, un apéndice y un cuerpo anexo de tres niveles, los cuales están unidos en la planta del sótano y separados de los niveles restantes por una junta constructiva de 15 cm. Cuenta con una instrumentación sísmica la cual fue colocada durante el mes de octubre y noviembre de 1992.

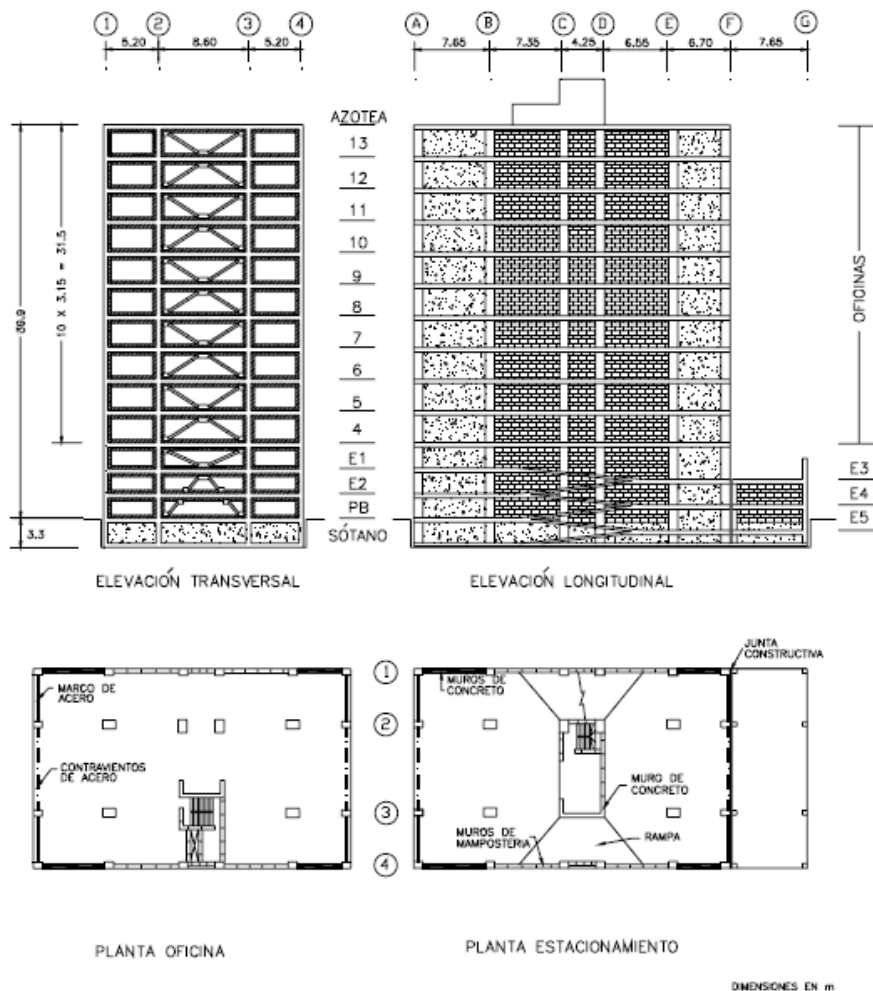


Figura 4.2: Plantas y elevaciones del edificio Jalapa.

Se seleccionaron un total de 14 puntos de observación donde se colocaron acelerógrafos triaxiales, de los cuales, dos se colocaron en pozos profundos a 20 y 45 m, uno al nivel del terreno, cuatro en el sótano, dos en el nivel 5, dos en el nivel 10 y tres en la azotea (Meli et al, 1998). La figura 4.3 muestra la localización de la instrumentación colocada en el edificio Jalapa, la cual tuvo que ser retirada por solicitud del propietario en el año 2006.

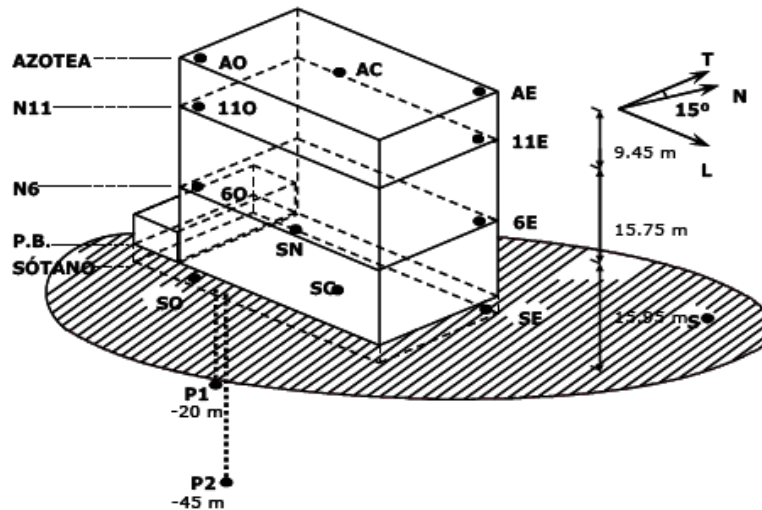


Figura 4.3: Instrumentación del edificio Jalapa.

4.1.2 Catedral metropolitana.

La Catedral Metropolitana es un monumento colonial histórico localizado en el centro de la ciudad de México, el cual ha sufrido los hundimientos diferenciales de la ciudad presentando un desnivel de 2.4 m. En 1997, durante el proceso de rehabilitación se decidió instrumentarla para conocer su comportamiento tanto durante el proceso de nivelación como ante la ocurrencia de temblores. A la fecha se han registrado cerca de 16 sismos y la información que han arrojado ha servido para la toma de decisiones correctivas que han llevado al monumento a condiciones de seguridad aceptables al disminuir el desnivel a 1m. La figura 4.4 muestra la localización de la red acelerográfica que está integrada por seis acelerógrafos triaxiales, cinco colocados en la estructura y uno de referencia fuera de la misma.

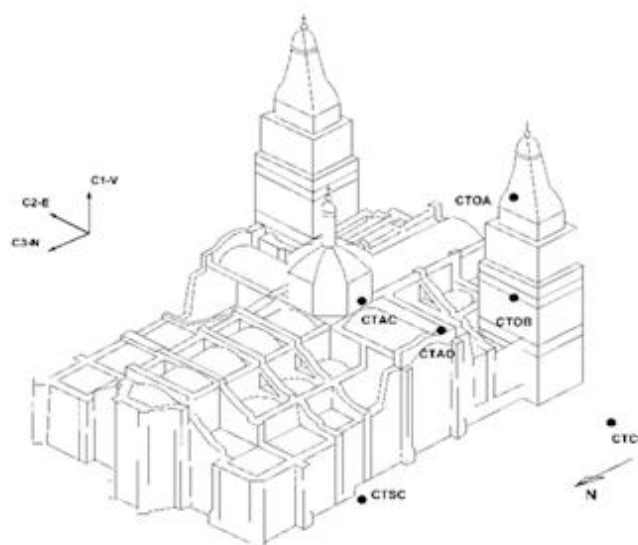


Figura 4.4: Instrumentación acelerográfica de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México

4.1.3 Centro Cultural Universitario Tlatelolco.

El centro cultural Universitario Tlatelolco (CCUT) se localiza al norte de la ciudad de México colindando con la Plaza de las tres culturas que forma parte del conjunto Nonoalco-Tlatelolco. En un principio, este recinto fue destinado para formar parte de las oficinas de la Secretaría de Relaciones Exteriores y posteriormente fue donado a la UNAM, por lo cual, en la actualidad es la sede de una exposición permanente en honor del movimiento estudiantil de 1968. Está conformado por una torre de 22 niveles y por tres edificios de un nivel que tienen un sótano en común.

La historia de movimientos verticales que ha sufrido el conjunto desde su construcción, señala que el conjunto del CCUT se comporta como un cuerpo casi rígido, en donde los hundimientos menores se presentan en los edificios más bajos de la zona, mientras que los hundimientos máximos se localizan en el lado sur de la torre. La variación de los movimientos verticales concentrados en la esquina sur oeste ha variado de 2.18 a 39.7 cm desde el año de 1965 hasta el 2006.

Las actividades para instrumentar el CCUT se iniciaron en el mes de mayo del 2008 para conocer la evolución de las labores de rehabilitación de la estructura de la torre, las cuales concluyeron en diciembre del mismo año. La instrumentación está conformada por 3 antenas receptoras de GPS que miden el desplazamiento de la torre en tiempo real y 28 acelerómetros de 2g (6 triaxiales y 10 uniaxiales) localizados en diversos puntos de la estructura, los cuerpos bajos, el terreno y el subsuelo La figura 4.5 muestra la localización de los sensores.

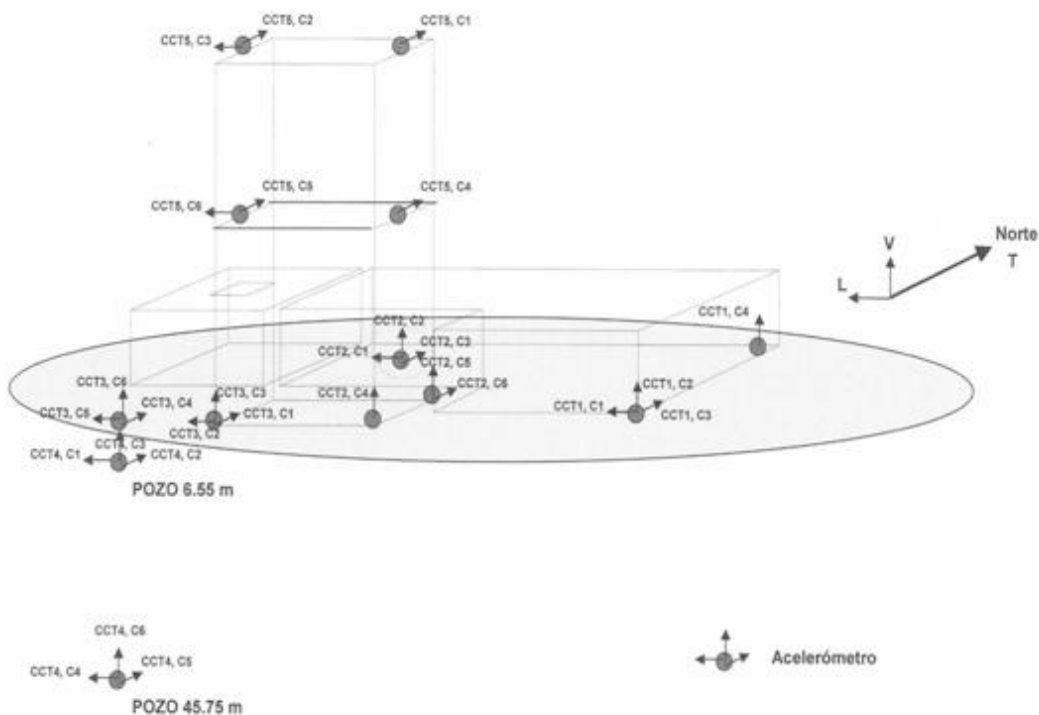


Figura 4.5: Distribución de los sensores instalados en el CCUT

Para registrar las aceleraciones se cuenta con un sistema conformado por cinco registradores, marca Kinematics modelo k2, autónomos de alta resolución de 19 bits con rango dinámico de 120 dB y de bajo consumo de energía. Entre sus principales características destaca su capacidad para registrar tanto la aceleración de las vibraciones ambientales como la de sismos intensos, en manera independiente o con umbrales de activación seleccionables. Los instrumentos almacenan sus funciones en circuitos de memoria internos que pueden ser actualizados de forma remota mediante una conexión directa a una computadora o a través de un modem inalámbrico. Además tiene una capacidad de almacenamiento y transferencia de datos que no requiere de la presencia del usuario en el sitio. Cada registrador cuenta con una señal de tiempo controlada través del GPS con la finalidad de obtener un registro sincronizado que permite conocer con precisión el movimiento relativo de todos los puntos de medición.

4.1.4 Puente impulsora.

El puente Impulsora está ubicado al noreste de la Ciudad de México en el límite con el estado de México, en el municipio de Netzahualcóyotl. Se utiliza para cruzar la línea B del metro. Fue construido a base de traveses de concreto, unas apoyadas en una serie de columnas (traveses de apoyo TA), y otras libremente apoyadas sobre las anteriores (traveses centrales TC), las cuales permiten mitigar el daño producido por los asentamientos diferenciales entre uno y otro apoyo. Las traveses son preesforzadas mediante torones de acero de alta resistencia. La longitud del puente es de 405m, las traveses centrales tienen una longitud de 49 m en el claro central y 17 m en su anchura máxima, lugar donde se encuentran dos carriles de tránsito continuo, dos bahías de ascenso y descenso de pasaje y dos accesos peatonales a la estación del metro ubicada debajo del puente.

La instrumentación de la superestructura está integrada por dos acelerógrafos de seis canales conectados a dos sensores triaxiales, instalados en el interior de las traveses centrales, un sensor triaxial de superficie y un sensor triaxial de pozo profundo. Uno de los acelerógrafos controla el inicio de operación de un registrador modelo CR9000 que adquiere 53 señales entre deformímetros y medidores de desplazamiento LVDT (figura 4.6). La instrumentación es monitoreada remotamente por medio de una línea telefónica convencional.

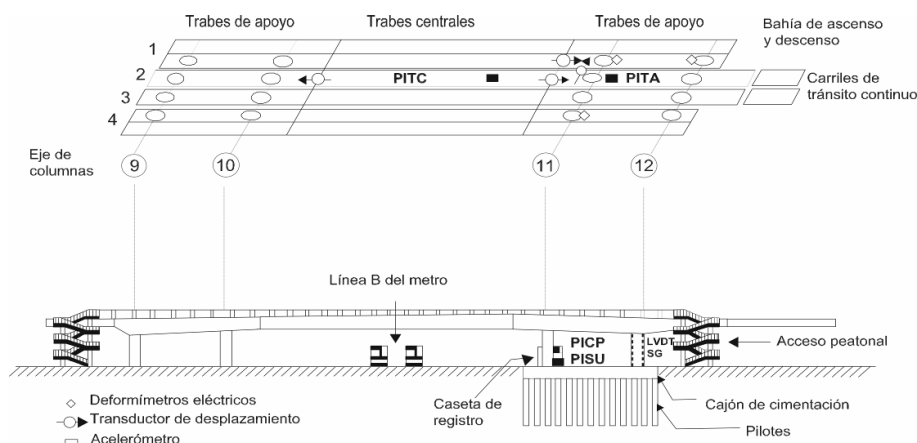


Figura 4.6: Instrumentación sísmica de un puente vehicular.

4.1.5 Puente Chiapas.

Debido a que algunos requisitos previstos en el diseño y construcción de la superestructura del puente Chiapas no se cumplieron plenamente y considerando su importancia y características únicas, se decidió realizar una revisión del diseño original, la cual, dictaminó la necesidad de implementar una red de instrumentación y monitoreo del puente durante el lanzamiento de la superestructura (Gómez et al, 2003b; Gómez et al, 2004; Gómez et al, 2004b). El sistema de instrumentación fue diseñado especialmente para complementar los resultados del modelo matemático utilizado en el diseño y preservar la integridad de la superestructura del puente proporcionando avisos cuando alguno de los parámetros medidos excede los límites de seguridad admisibles. Con tal motivo, fue necesario configurar el sistema para registrar el historial de temperaturas y esfuerzos presentes en el puente mediante el uso de transductores de temperatura, deformímetros, anemómetros y LVDT's. Adicionalmente se incluyó un arreglo móvil de dos acelerómetros orientados en la dirección vertical para medir las vibraciones producidas durante cada ciclo de lanzado. Las siguientes figuras muestran el procedimiento de lanzado y la distribución de los sensores en la superestructura del puente Chiapas:



Figura 4.7: Superestructura del puente Chiapas durante su lanzamiento (Monitor, 2008).

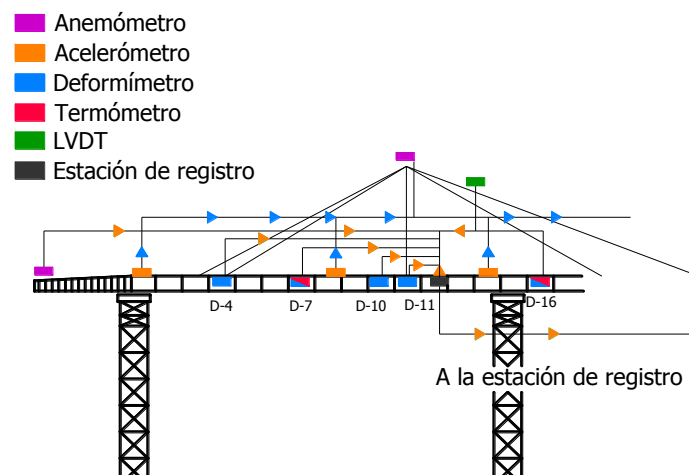


Figura 4.8: Localización de los sensores a lo largo del cantiléver de la superestructura del puente Chiapas (Monitor, 2008)

CAPÍTULO 5.

INSTRUMENTACIÓN DE UNA ESTRUCTURA CON GEOMETRÍA ESPECIAL.

En la actualidad, existe una gran diversidad de construcciones con características poco usuales, que brindan soluciones a problemas genéricos. Un ejemplo de ello, son los puentes. Existen desde el inicio de las civilizaciones y los métodos constructivos que se emplean en su elaboración son una referencia de la evolución del pensamiento humano a través del tiempo. Mantenerlos en funcionamiento es un gran reto que hoy en día puede superarse fácilmente mediante el uso de las herramientas adecuadas.

5.1 El caso de un puente con trayectoria curva.

El puente San Cristóbal representa una obra de infraestructura con una geometría poco común, la cual describe una curva horizontal que libra una barranca de 200 metros de profundidad con una curvatura de $2^{\circ} 45'$ y una inclinación longitudinal y transversal de 10% y 15% respectivamente (Monitor 2008).



Figura 5.1: Puente San Cristóbal, tres semanas antes de la apertura (Monitor, 2008)

La construcción del puente San Cristóbal fue el último obstáculo para terminar la autopista de cuota Tuxtla Gutiérrez - San Cristóbal de las Casas, de 59 km de longitud. Este tramo carretero beneficia directamente a los Municipios de Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, Zinacatlán y San Cristóbal de las Casas debido al impulso de actividades económicas tales como la ganadera, agricultura, el turismo y la industria en esta zona (SCT 2006).

5.1.1 Descripción de la superestructura.

La superestructura consiste en una caja continua compuesta de acero ortotrópico de grado 50, de altura constante, que contiene de tres claros: uno central de 178 metros y dos laterales de 73 metros, con una longitud total de 324 metros y un peso estimado en 2500 toneladas (figura 5.2). El sistema constructivo utilizado para su fabricación fue el método de lanzamiento incrementado desde ambos lados del barranco. La mitad de la superestructura fue lanzada cuesta arriba y la

otra mitad, cuesta abajo. Cada cantiléver consta de 14 segmentos de acero: los primeros cinco son ortotrópicos, o bien, una combinación de acero y concreto (figura 5.3 a), mientras que los segmentos restantes constan de una losa de concreto postensado de 30 cm de espesor, formando una sección compuesta con pernos de corte que unen la interfaz entre las bridas superior de la viga de cajón abierto y la losa de concreto (figura 5.3 b).

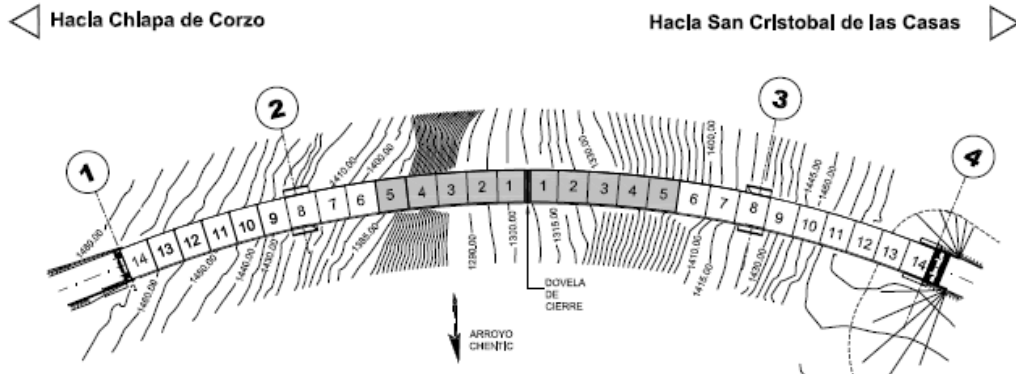
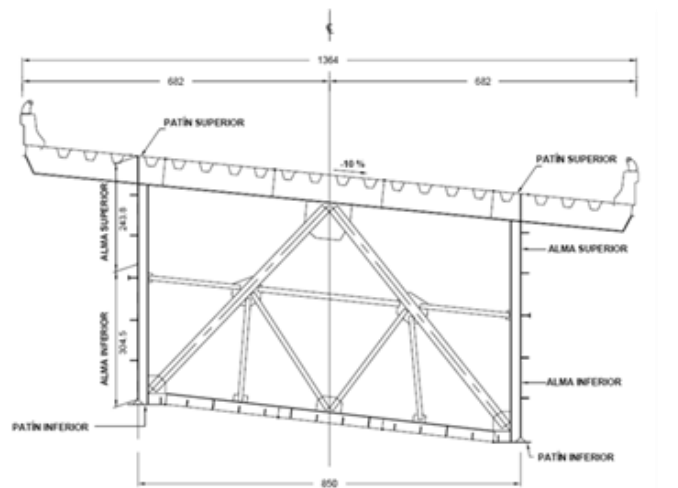
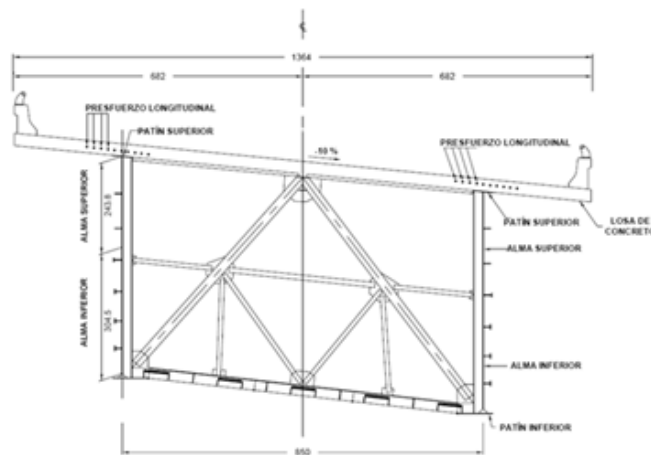


Figura 5.2: Vista en planta del puente San Cristóbal.



a) Sección con losa ortotrópica



b) Sección con losa de concreto postensado

Figura 5.3: Secciones transversales de la superestructura del puente San Cristóbal.

Además, en el interior de cada dovela se cuenta con 19 piezas aproximadamente, las cuales brindan rigidez adicional a la estructura. En la figura 5.4 se pueden observar los diferentes elementos que conforman una dovela tipo, la única diferencia es el número de marcos transversales que las conforman, ya que las dovelas 8 y 14 de ambos márgenes cuentan con 5 marcos transversales (Bennetts, 2008).

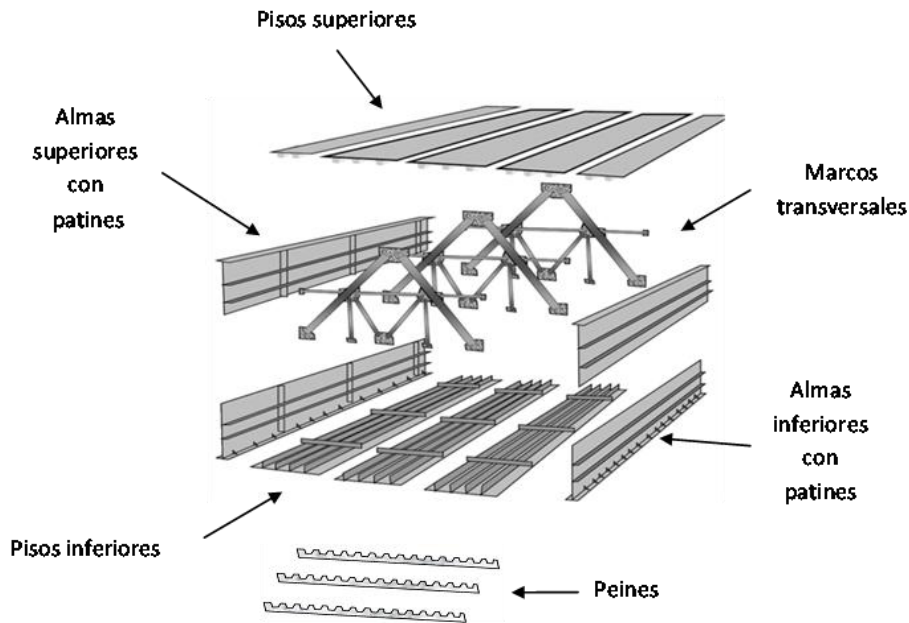


Figura 5.4 Componentes de una dovela tipo (Bennetts, 2008)

El acero que se utiliza para la fabricación de los marcos es ASTM A-709 grado 36. Las uniones de todos los elementos metálicos se hicieron por medio de soldadura de diversos tipos: SAW, SMAW y FCAW. El peso aproximado por dovela es de alrededor de 60 ton, sin contar con las obras complementarias como losa de calzada y parapeto. El ancho de la calzada abarca 13.6 m, en la cual se alojaron dos carriles de 3.65 m, dos acotamientos de 2.50 m y dos guarniciones laterales de 55 cm, por lo cual, el peso total de la superestructura se estima aproximadamente en 1,720 ton (SCT 2006).

5.1.2 Descripción de la subestructura.

La subestructura está conformada por 2 estribos y 2 pilas. El primer apoyo es el estribo 1 ubicado en la margen derecha del puente, el segundo apoyo es la pila número 2, misma que también está en la margen de derecha. En la margen izquierda y continuando con el tercer apoyo se encuentra la pila número 3 y para finalizar, el cuarto apoyo lo conforma el estribo 4 (Bennetts, 2008). La figura 5.5 muestra la ubicación de los elementos que conforman la subestructura.

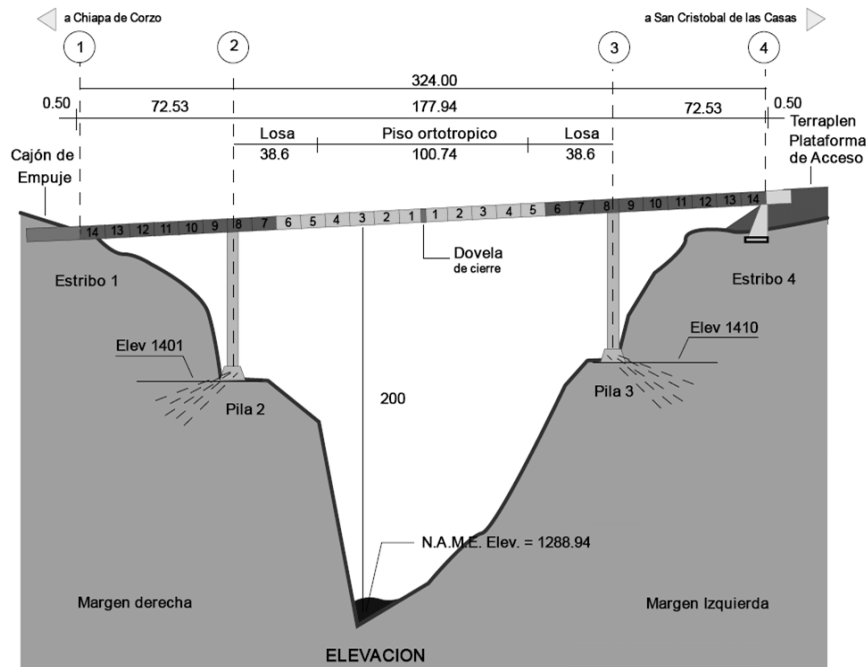


Figura 5.5: Vista en elevación del Puente San Cristóbal.

5.2 Monitoreo estructural.

Durante la construcción, la mitad de la superestructura del puente colapso. Lo cual ocurrió después de que las actividades de lanzamiento fueron terminadas, justo antes de colocar la dovela de cierre de 2 m de longitud, en el centro del puente (figura 5.6). Para la reconstrucción de la mitad de la superestructura que colapso, se propuso la instalación de un sistema de monitoreo, el cual comprendió ambos extremos del puente.



Figura 5.6: Colapso de la mitad del puente San Cristóbal (Notimex, 2004)

Los datos obtenidos abarcaron el proceso de lanzamiento de las nuevas dovelas, por lo cual las capturas se efectuaban cada vez que este era llevado a cabo. Al culminar el proceso de lanzamiento, los registros se realizaron diariamente y en forma aleatoria a partir del 10 de mayo de 2006 (fecha de colocación de la dovela central).

A finales del mes de marzo de 2007 las capturas se realizaron hora por hora y se implementaron dos horarios de captura, uno a las 8:00 y el otro a las 20:00 hrs. Esto con base en la disponibilidad de tiempo del personal que realiza las mediciones y con la finalidad de obtener datos libres de lecturas erróneas, ya que algunos instrumentos presentaban algunas anomalías en su funcionamiento durante el transcurso del día.

5.2.1 Descripción de la instrumentación.

La instrumentación implementada para monitorear la respuesta de la estructura asociada a esfuerzos, desplazamientos y temperatura, comprende 36 deformímetros con resistencia de ± 350 Ohms (marca Vishay), 6 inclinómetros bidireccionales (marca Applied Geomechanics) y 98 cuerdas vibrantes (marca Geokon, modelo 4000) que a su vez cuentan con transductores de temperatura. Las siguientes figuras muestran la presentación física de los dispositivos mencionados.

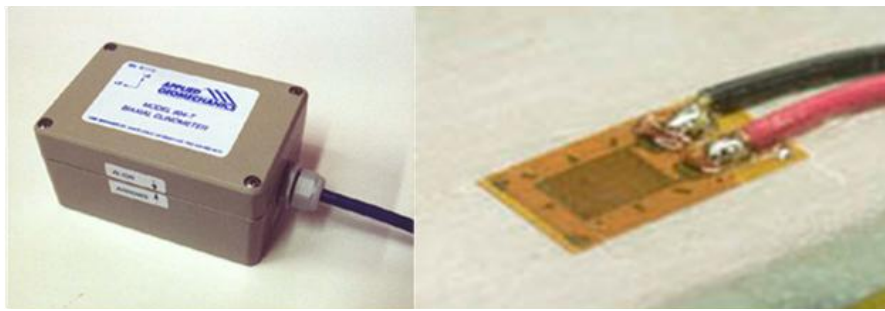


Figura 5.7: De izquierda a derecha, inclinómetro bidireccional (Applied Geomechanics) y deformímetro (Vishay)



Figura 5.8: Cuerda vibrante (Geokon)

Los deformímetros fueron distribuidos a lo largo de la superestructura del puente y orientados en la dirección longitudinal (L), en las dovelas DC, D4, D8 y D11 de ambos márgenes (figura 5.9), para medir deformaciones de manera conjunta con las cuerdas vibrantes durante la elaboración de pruebas de carga vehicular, ya que estas no son aptas para realizar mediciones en condiciones dinámicas.

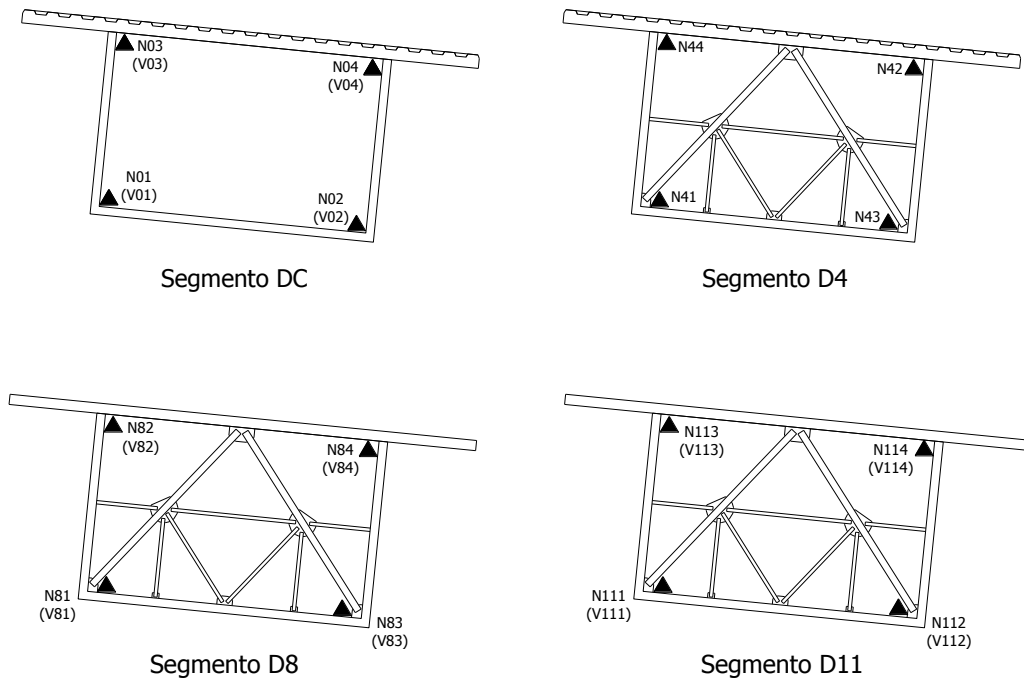


Figura 5.9: Secciones instrumentadas con deformímetros

Los inclinómetros bidireccionales se instalaron en el lecho superior de los segmentos D1, D6 y D8 en ambos lados del puente (figura 5.10), con el objetivo de medir los giros en las direcciones longitudinal y transversal (L y T) del claro central. Y vigilar que las deflexiones no excedan los límites permisibles durante el proceso de lanzamiento de las dovelas.

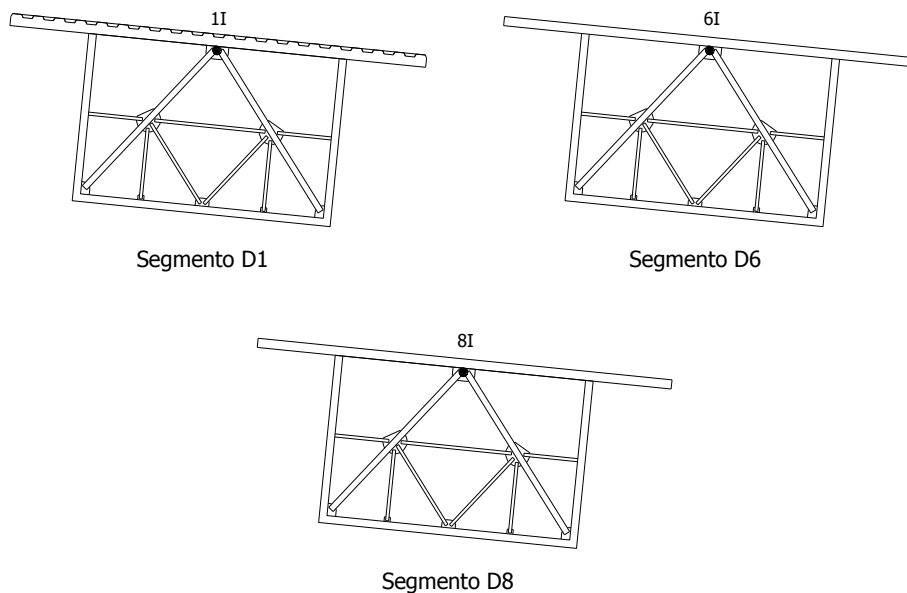


Figura 5.10: Distribución de los inclinómetros bidireccionales

Las cuerdas vibrantes abarcaron la dirección longitudinal (L) de los segmentos D8 y D4 de ambos extremos y el segmento de cierre DC del claro central durante la etapa de reconstrucción, debido a que se determinó que en estos puntos se presentaban las magnitudes de esfuerzo más significativas con base en el análisis del modelo de elementos finitos del puente. Esto incluyó la

colocación de cuerdas vibrantes en la zona de transición de los segmentos D5 y D6 (cambio de piso ortotrópico a losa de concreto) de ambos márgenes, para conocer los desplazamientos relativos en esta zona (Bennetts, 2008).

Posteriormente se instrumentaron los claros adyacentes al claro central para la realización de pruebas de carga tanto dinámicas como estáticas, lo cual implicó que se añadieran más sensores en las dovelas D8 y en los segmentos D11. De esta forma, quedó conformando el sistema de monitoreo permanente del puente, el cual estuvo operando hasta finales del mes de marzo de 2009. La siguiente figura muestra la distribución esquemática de las cuerdas vibrantes en las secciones transversales del puente.

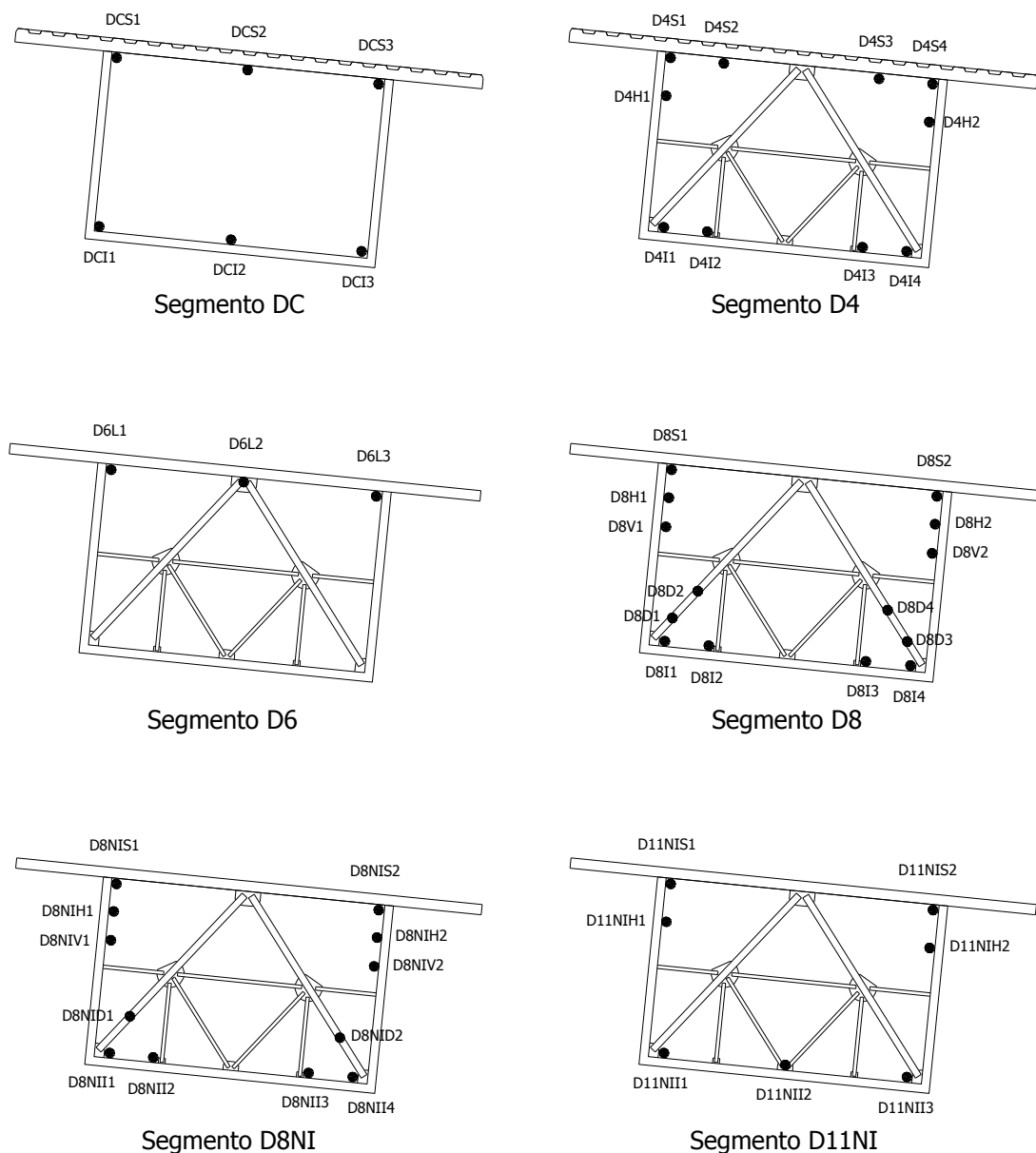


Figura 5.11: Secciones instrumentadas con cuerdas vibrantes

5.2.2 Sistema de adquisición de datos.

Para la extracción de la información proveniente de los sensores, el sistema de monitoreo cuenta con 8 multiplexores marca Geokon, modelo MUX 8032 y 2 registradores. El primero es el modelo 8020 (Micro 10, Geokon), mientras que el segundo es un sistema ensamblado Compact Field Point (National Instruments). La siguiente figura muestra los dispositivos mencionados:



Figura 5.12: De izquierda a derecha, multiplexor modelo MUX 8032, registrador 8020 Micro 10 (ambos, marca Geokon) y sistema Field Point (National Instruments)

Cada multiplexor tiene una capacidad de 16 canales y se encarga de recibir las señales de las cuerdas vibrantes que se le son asignadas. De esta forma, la información canalizada por los Multiplexores, es recibida por el registrador Micro 10. La tabla 5.1 muestra la cantidad de sensores conectados a cada multiplexor.

Lado	Dovela	Multiplexor	Cuerdas v.
Tuxtla Gutiérrez	D11NI	M1	7
	D8NI	M2	12
	D8	M3	14
	D6	M2	3
	D4	M4	10
	DC	M4	6
San Cristóbal	D4	M5	10
	D6	M5	3
	D8	M7	14
	D8NI	M6	12
	D11NI	M8	7

Tabla 5.1: Número de unidades manejadas por cada multiplexor (Rodríguez, 2008)

Por otro lado, el sistema Field Point tiene instalados 16 canales para medir voltaje y 16 canales para medir deformación. De los cuales, se emplearon 12 canales de voltaje para los inclinómetros, ya que cada uno cuenta con un sensor de temperatura adicional. Mientras tanto, de los 36 deformímetros instalados en el puente, sólo se utilizaron 16 para el monitoreo permanente de la estructura (4 en la dovela de cierre, 2 en las dovelas D4 de ambos márgenes y 4 en cada dovela D8). La conexión de estos dispositivos con el registrador, se realizó en forma directa, por lo cual, no hubo la necesidad de utilizar multiplexores. La ubicación de los elementos que conforman el sistema de captura se muestra a continuación:

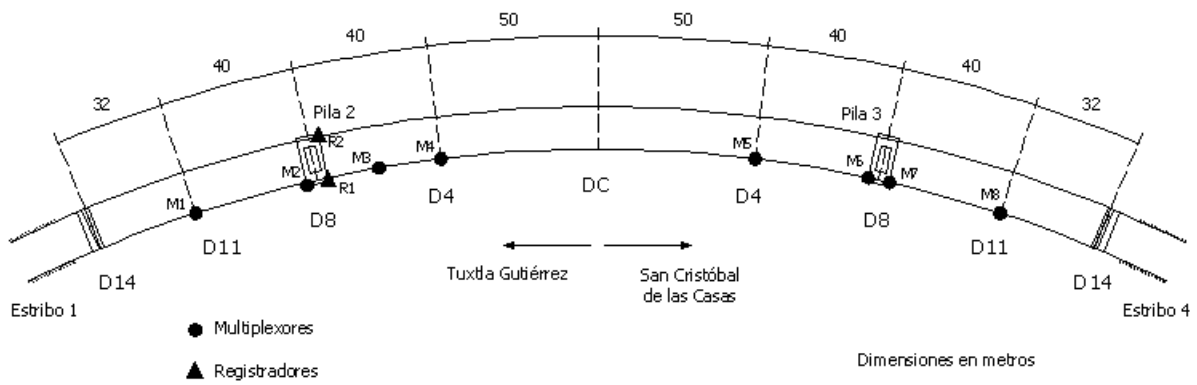


Figura 5.13: Ubicación de los componentes del sistema de captura permanente.

Tanto el registrador Micro 10 (R1), como el sistema Field Point (R2), se encargaron de capturar los valores de microdeformación unitaria, inclinación y temperatura a cada hora. Como se mencionó en la sección 5.2, se establecieron horarios de captura adicionales, a las 8:00 y a las 20:00 horas. Al principio, las mediciones fueron realizadas en forma manual con un registrador portátil modelo GK-403 marca Geokon y posteriormente en forma automática a través del registrador Micro 10.

5.2.3 Gestión de datos.

A continuación se explicará la forma en que se obtienen y procesan los datos descargados del registrador que manipula las cuerdas vibrantes. En este caso sólo se procesarán los valores de microdeformación obtenidos a las 8:00 y 20:00 hrs.

5.2.3.1 Procesamiento de los datos.

En la sección 2.3.2.6 se dieron a conocer los principios del funcionamiento de las cuerdas vibrantes. Particularmente, algunos aspectos relativos al modelo 4000 de Geokon. Por lo tanto, para calcular la deformación unitaria, se empleará la ecuación 2.26, entonces:

$$\varepsilon = (4.0623 \times 10^{-3})f^2 \quad \text{Ec. 5.1}$$

Tomando en cuenta que el registrador empleado es el modelo GK-403. La información que despliega, es el periodo de vibración de la cuerda multiplicado por un factor de 1×10^6 . Entonces la relación entre el periodo y la frecuencia es:

$$f = \frac{1 \times 10^6}{T} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Al sustituir la ecuación 5.2 en la ecuación 5.1 se obtiene la siguiente expresión:

$$\varepsilon = (4.0623 \times 10^9)T^{-2} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Una vez obtenidas las deformaciones unitarias se procede a calcular los esfuerzos, mediante la Ley de Hooke, por lo tanto:

$$\sigma = \mu \varepsilon E \quad \text{Ec. 5.4}$$

Solo basta conocer el modulo de elasticidad del acero estructural grado 50, el cual se considera igual a $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ (Bennetts, 2008). Al sustituir valores en la ecuación 5.4, se obtiene:

$$\sigma = 2.1 \varepsilon \quad \text{Ec. 5.5}$$

Con la expresión anterior se calcularon los esfuerzos registrados por los 92 sensores de cuerda vibrante instalados en las diferentes dovelas del puente. Como se mencionó anteriormente, los otros 6 se emplearon para medir el desplazamiento relativo en la zona de transición ubicada entre las dovelas D5 y D6 en ambos extremos del claro central. Para obtener los desplazamientos relativos en términos de la deformación unitaria medida por la cuerda vibrante se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta L = \mu \varepsilon L \quad \text{Ec. 5.6}$$

En este caso L es la longitud del cable vibrante expresada en milímetros, por lo tanto la ecuación 5.3 puede escribirse en los siguientes términos:

$$\delta = (159 \times 10^{-6}) \varepsilon \quad \text{Ec. 5.7}$$

Mientras tanto, para medir los valores de temperatura, el registrador hace las lecturas en forma directa con base en la siguiente ecuación:

$$T = \frac{1}{A + B(\text{Ln}R) + C(\text{Ln}R)^3} - 273.2 \quad \text{Ec. 5.8}$$

Donde:

T: Temperatura en °C

LnR: Logaritmo natural de la resistencia del termistor, medida en Ohms

A, B y C: Coeficientes calculados para un rango de operación de -50 a 150 °C

Sustituyendo los coeficientes A, B y C proporcionados por el fabricante:

$$T = \frac{1}{1.4051 \times 10^{-3} + 2.369 \times 10^{-4}(\text{Ln}R) + 1.019 \times 10^{-7}(\text{Ln}R)^3} - 273.2 \quad \text{Ec. 5.9}$$

Finalmente, los registradores cuentan con una interfaz que permite extraer la información y almacenarla en una computadora portátil, por lo tanto se pueden obtener archivos con formato ASCII, o bien en formato de hoja de cálculo de Excel. Ambos contienen la fecha, la hora, las microdeformaciones y las temperaturas de cada cuerda vibrante. Para el cálculo de los esfuerzos y los desplazamientos relativos, la información se almacenó en archivos con formato de hoja de cálculo y se emplearon las ecuaciones descritas anteriormente.

5.2.3.2 Interpretación de los datos.

Para facilitar la interpretación de los datos, lo más recomendable es elaborar gráficas con los valores obtenidos y los que se derivan de los mismos. Esto con el fin de poder identificar posibles errores en las mediciones de los instrumentos o en su defecto errores en el procesamiento de los datos. En este caso y con fines de poder visualizar los resultados, los sensores se separan por dovela graficando la información recolectada en los lechos inferiores (I), superiores (S) y en los costados de cada sección transversal, en la dirección horizontal (H) y vertical (V) de acuerdo con la nomenclatura propuesta para la identificación de los aparatos. Vale la pena aclarar que sólo las dovelas D8 cuentan con sensores en las diagonales de contraventeo (D), mientras que los demás, tienen sus apoyos soldados a las placas de acero que componen cada dovela (figura 5.4). En los apéndices A, B, C y D se muestran las gráficas obtenidas con la información, tal cual fue extraída, tanto a las 8:00 como a las 20:00 hrs. A modo de ejemplo, se muestran los incrementos de esfuerzos relativos al día 10 de mayo de 2006 y las temperaturas medidas en la dovela central a las 8:00 hrs., a partir del mes de abril de 2007 hasta finales del mes de marzo de 2009.

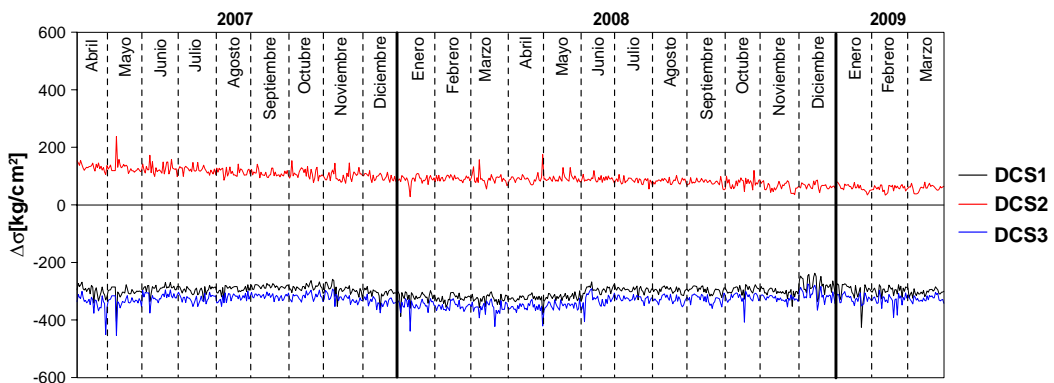


Figura 5.14: Incrementos de esfuerzo medidos en el lecho superior de la dovela central

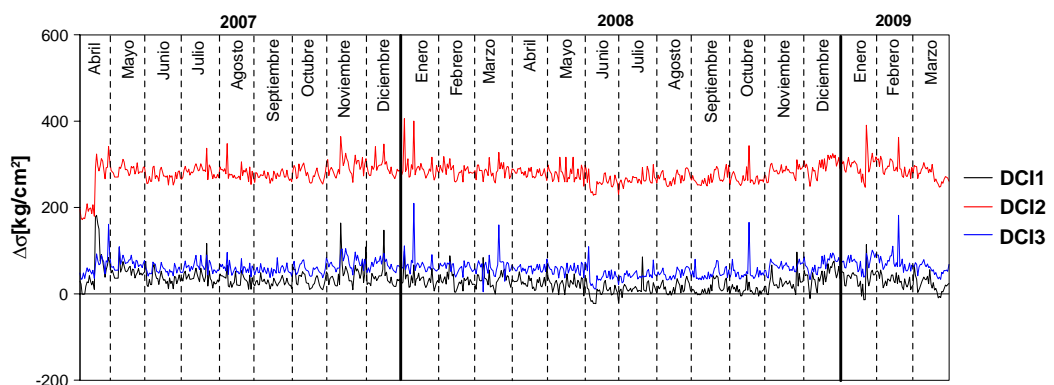


Figura 5.15: Incrementos de esfuerzo medidos en el lecho inferior de la dovela central

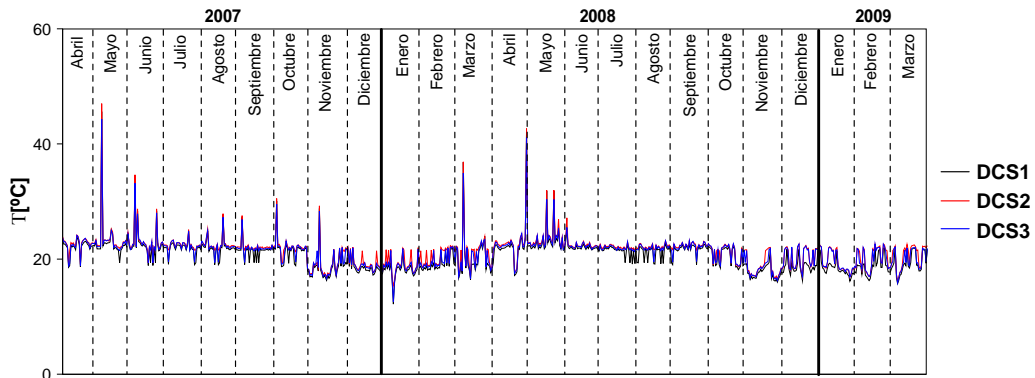


Figura 5.16: Temperaturas medidas en el lecho superior de la dovela central

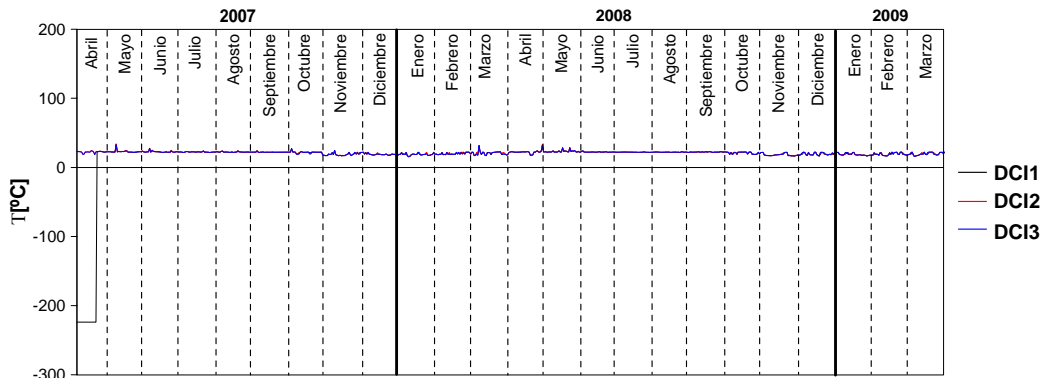


Figura 5.17 Temperaturas medidas en el lecho inferior de la dovela central

En las figuras 5.14 y 5.15 se pueden observar a simple vista, algunos problemas con los datos medidos, a principios del mes de abril de 2007. Tanto el sensor DCS2 como el DCI2 registraron mediciones superiores a las que proporcionan los dispositivos que los acompañan, los cuales muestran tendencias similares en la información que proporcionan. Por otro lado, los incrementos de esfuerzo registrados por el sensor DCI2 tuvieron un aumento súbito en su magnitud, la cual, en un principio se encontraba cerca de los 200 kg/cm² y posteriormente se registraron valores cercanos a los 300 kg/cm², conservando esta tendencia hasta el final de las mediciones. Mientras que las temperaturas medidas por el termistor DCI1, en un principio adquieren valores superiores a los -200 °C y posteriormente disminuyen observándose mediciones similares a las de los demás termistores.

La información relativa a los dispositivos que se encuentran en las demás dovelas presenta algunas situaciones similares a los que se observaron anteriormente. En la siguiente sección se comentaran algunas de las acciones tomadas en la corrección de la información recabada por los sensores. La gran mayoría de estas actividades se basan en el uso del sentido común y en la experiencia personal. Por lo cual no siempre es bueno contar con programas de computadora que realicen esta tarea en forma automática, ya que algunos de estos se basan en la aplicación de filtros que pueden llegar a discriminar información valiosa si el dispositivo de medición sufre algún desajuste. Lo ideal es auxiliarse en estos, para graficar la información y facilitar la inspección visual de los datos proporcionados por los sistemas de captura.

5.2.3.3 Corrección de los datos.

Para poder realizar la corrección de los datos, se establecieron algunas hipótesis a cerca del comportamiento estructural del puente y las condiciones de esfuerzo y temperatura que se esperan. Esto con la finalidad de tener un marco de referencia para la toma de decisiones:

- El puente se idealiza como una viga continua, por lo cual se presentan esfuerzos de compresión en el lecho superior y de tensión en el lecho inferior de cada dovela, excepto en las dovelas D8, donde esta relación se invierte.
- Los sensores ubicados en sitios similares (lecho superior inferior, etc.) en cada dovela tienden a realizar mediciones similares.
- Dada la simetría del puente se puede esperar que los aparatos colocados en una dovela muestren registros semejantes a su similar de la margen opuesta.
- La temperatura ambiente en el Estado de Chiapas oscila entre los 15 °C y los 36 °C.

Adicionalmente, se cuenta con los datos almacenados hora tras hora por el registrador 8020 (Micro 10), ya que permitirán observar si la falla representa algo temporal como el ruido eléctrico (interferencias o señales de origen eléctrico que no son deseadas), o bien, si esta situación trascendió en las mediciones posteriores. En el caso del sensor DCI2 primero se observaron el día y la hora en la cual se presentó el incremento esfuerzo que produjo el desfaseamiento que se observa en la grafica de la figura 5.15. La siguiente tabla muestra los valores correspondientes al día 13 y 14 de abril de 2007

Canal		61			Canal		61		
Fecha	Hora	DCI2			Fecha	Hora	DCI2		
		μE	Δσ [kg/cm ²]	Diferencia			μE	Δσ [kg/cm ²]	Diferencia
10/05/2006	22:23	3643	-	-	-	-	-	-	
13/04/2007	00:00	3740	202.776	202.776	14/04/2007	00:00	3793	314.265	-0.336
13/04/2007	01:00	3739	200.991	-1.785	14/04/2007	01:00	3795	319.725	5.46
13/04/2007	02:00	3734	191.079	-9.912	14/04/2007	02:00	3793	314.937	-4.788
13/04/2007	03:00	3732	186.816	-4.263	14/04/2007	03:00	3796	322.014	7.077
13/04/2007	04:00	3731	184.527	-2.289	14/04/2007	04:00	3794	316.911	-5.103
13/04/2007	05:00	3731	184.422	-0.105	14/04/2007	05:00	3791	311.199	-5.712
13/04/2007	06:00	3734	190.155	5.733	14/04/2007	06:00	3786	301.119	-10.08
13/04/2007	07:00	3730	181.713	-8.442	14/04/2007	07:00	3786	300.363	-0.756
13/04/2007	08:00	3728	179.319	-2.394	14/04/2007	08:00	3782	290.976	-9.387
13/04/2007	09:00	3720	162.603	-16.716	14/04/2007	09:00	3775	277.326	-13.65
13/04/2007	10:00	3721	163.527	0.924	14/04/2007	10:00	3769	263.592	-13.734
13/04/2007	11:00	3719	160.125	-3.402	14/04/2007	11:00	3764	254.037	-9.555
13/04/2007	12:00	3719	159.348	-0.777	14/04/2007	12:00	3767	260.946	6.909
13/04/2007	13:00	3720	162.414	3.066	14/04/2007	13:00	3769	265.461	4.515
13/04/2007	14:00	3726	173.523	11	14/04/2007	14:00	3775	277.242	11.781
13/04/2007	15:00	3773	273.924	100.401	14/04/2007	15:00	3782	291.837	14.595
13/04/2007	16:00	3781	289.779	15.855	14/04/2007	16:00	3787	301.371	9.534
13/04/2007	17:00	3785	297.633	7.854	14/04/2007	17:00	3788	303.513	2.142
13/04/2007	18:00	3799	327.390	29.757	14/04/2007	18:00	3786	300.951	-2.562
13/04/2007	19:00	3789	306.936	-20.454	14/04/2007	19:00	3786	300.951	0
13/04/2007	20:00	3790	307.944	1.008	14/04/2007	20:00	3788	304.626	3.675
13/04/2007	21:00	3794	316.575	8.631	14/04/2007	21:00	3791	311.283	6.657
13/04/2007	22:00	3793	314.265	-2.31	14/04/2007	22:00	3790	308.700	-2.583
13/04/2007	23:00	3793	314.601	0.336	14/04/2007	23:00	3796	322.203	10.92

Tabla 5.2: Incrementos de esfuerzo medidos cada hora por el sensor DCI2

Al observar los datos de la tabla se puede notar que al calcular diferencia entre los incrementos de esfuerzo medidos a las 14:00 y 13:00 hrs del día 13 de abril, el valor que se obtiene es de 100.401 kg/cm^2 . Dicho aumento se mantiene prácticamente constante hasta el final de las mediciones (marzo de 2009), por lo cual, en la gráfica se observan valores cercanos a los 300 kg/cm^2 . Esto significa que el sensor pudo haber sufrido un desperfecto, por ejemplo. Los tornillos que sujetan el tubo protector de la cuerda vibrante pueden desacomodarse si los impactos producidos por el paso de los coches flexionan las placas de acero, o bien, si se ajustan mal a la hora de colocarlos, pueden alterar las mediciones si ejercen demasiada presión. Otra razón probable, es que el sistema de captura dejó de registrar las lecturas correctamente por problemas de impedancia (variaciones de la relación entre voltaje y corriente eléctrica, medidas). Como el sistema no se puede revisarse físicamente, esto puede solucionarse compensando dicho esfuerzo o bien restar su magnitud de los valores de las mediciones subsecuentes. Esto implica que esta operación debe realizarse también para los valores obtenidos a las 20:00 hrs, ya que como podrá observarse parcialmente en la tabla 5.2, este incremento también afectó a las demás mediciones. La siguiente figura muestra los resultados logrados al compensar las mediciones.

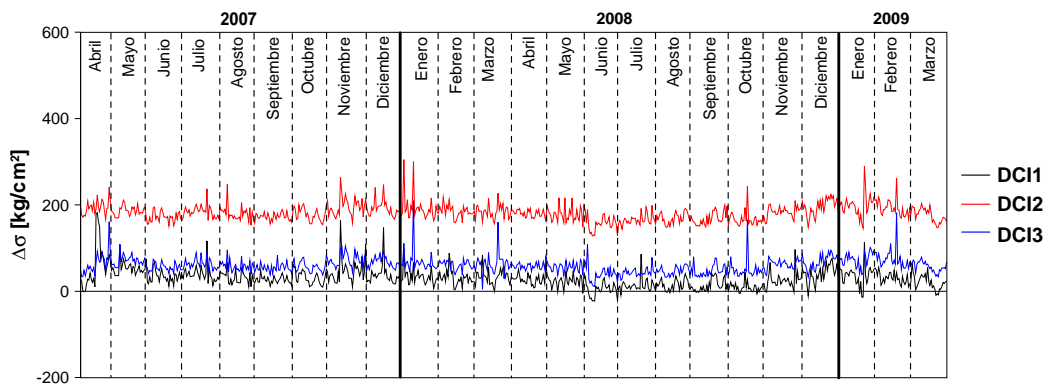


Figura 5.18: Incrementos de esfuerzo corregidos en el lecho inferior de la dovela central

Sin embargo, en la figura 5.18 se puede apreciar que las cuerdas vibrantes DCI1 y DCI3 muestran lecturas similares en contraste con el sensor DCI2, el cual proporciona valores superiores a los que se midieron con los demás dispositivos. Esta misma situación se presentó en el lecho superior con el sensor DCS2. La primera impresión, permite suponer que el mismo problema se presentó antes del periodo en estudio, ya que los dispositivos restantes aportaron mediciones similares y es poco probable que dos sensores fallen de la misma manera. Para averiguar si los datos estaban erróneos o no, se revisan nuevamente los registros realizados hora por hora entre el día 10 de mayo de 2006 y el día 31 de marzo de 2007.

En el caso del sensor DCI2, se halló una diferencia de 134.40 kg/cm^2 entre las mediciones registradas los días 11 y 12 de Mayo de 2006, lo cual confirmó la hipótesis. La tabla 5.6 muestra algunas de las lecturas observadas durante la inspección. Al restar este valor de las mediciones se observaron los resultados que se muestran en la figura 5.19:

Canal		61			Canal		61		
Fecha	Hora	DCI2			Fecha	Hora	DCI2		
		$\mu\epsilon$	$\Delta\sigma$ [kg/cm ²]	Diferencia			$\mu\epsilon$	$\Delta\sigma$ [kg/cm ²]	Diferencia
10/05/2006	22:23	3643	-	-	13/05/2006	18:22	3784	296.10	14.70
11/05/2006	00:29	3652	18.90	18.90	13/05/2006	21:11	3777	281.40	-14.70
11/05/2006	08:53	3670	56.70	37.80	13/05/2006	21:37	3881	499.80	218.40
11/05/2006	12:02	3675	67.20	10.50	13/05/2006	21:53	3826	384.30	-115.50
11/05/2006	12:23	3727	176.40	109.20	13/05/2006	22:09	3776	279.30	-105.00
11/05/2006	12:47	3676	69.30	-107.10	13/05/2006	22:24	3781	289.80	10.50
11/05/2006	13:11	3675	67.20	-2.10	13/05/2006	22:40	3779	285.60	-4.20
11/05/2006	13:24	3718	157.50	90.30	26/05/2006	09:11	3733	189.00	-96.60
11/05/2006	13:35	3718	157.50	0.00	26/05/2006	16:53	3743	210.00	21.00
11/05/2006	13:42	3680	77.70	-79.80	27/05/2006	09:33	3739	201.60	-8.40
11/05/2006	13:52	3676	69.30	-8.40	28/05/2006	08:43	3741	205.80	4.20
11/05/2006	13:59	3671	58.80	-10.50	28/05/2006	20:33	3742	207.90	2.10
11/05/2006	14:08	3673	63.00	4.20	29/05/2006	08:47	3737	197.40	-10.50
11/05/2006	14:31	3670	56.70	-6.30	29/05/2006	16:02	3751	226.80	29.40
11/05/2006	16:02	3661	37.80	-18.90	30/05/2006	08:43	3747	218.40	-8.40
12/05/2006	08:07	3725	172.20	134.40	30/05/2006	14:02	3758	241.50	23.10
12/05/2006	11:38	3720	161.70	-10.50	31/05/2006	08:36	3762	249.90	8.40
12/05/2006	14:23	3725	172.20	10.50	31/05/2006	14:05	3779	285.60	35.70
13/05/2006	10:12	3755	235.20	63.00	31/05/2006	20:27	3773	273.00	-12.60
13/05/2006	13:54	3777	281.40	46.20	01/06/2006	08:35	3772	270.90	-2.10

Tabla 5.3: Incrementos de esfuerzo observados durante la segunda inspección

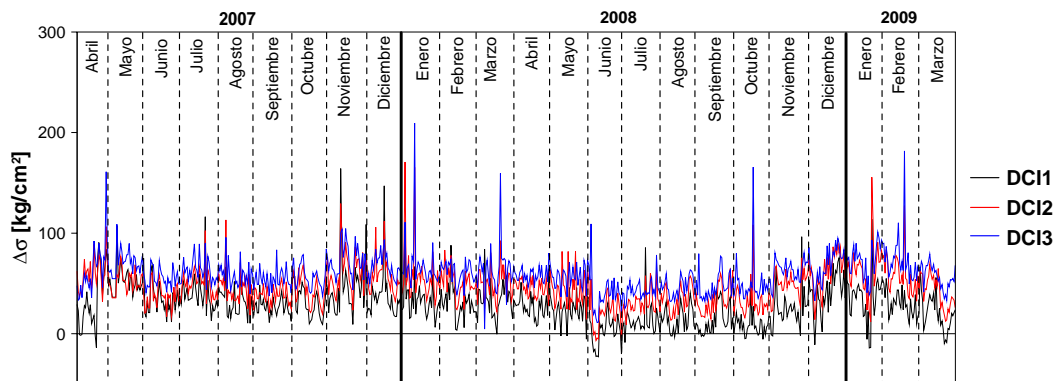


Figura 5.19: Segunda corrección de los incrementos de esfuerzo medidos en el lecho inferior de la dovela central

En el caso del sensor DCS2 los registros no mostraron una tendencia tan clara como la que se observa en la tabla 5.3, debido a que no se observaron anomalías en las mediciones. El aparato registraba deformaciones mayores al valor inicial, por lo cual, a la hora de calcular el incremento de esfuerzo se obtienen valores positivos desde el principio. Esto indica que la dovela estuvo trabajando en tensión en ese punto, en vez de hacerlo en compresión, como lo muestra la tabla 5.4, lo cual, no concuerda con las hipótesis elaboradas al inicio de esta sección, por lo tanto se descartará la información que proporcionada por este instrumento para los análisis posteriores.

Canal		62			Canal		62		
Fecha	Hora	DCS2			Fecha	Hora	DCS2		
		με	Δσ [kg/cm ²]	Diferencia			με	Δσ [kg/cm ²]	Diferencia
10/05/2006	22:23	3392	-	-	13/05/2006	18:22	3370	-46.20	-46.20
11/05/2006	00:29	3382	-21.00	-21.00	13/05/2006	21:11	3342	-105.00	-58.80
11/05/2006	08:53	3406	29.40	50.40	13/05/2006	21:37	3339	-111.30	-6.30
11/05/2006	12:02	3461	144.90	115.50	13/05/2006	21:53	3338	-113.40	-2.10
11/05/2006	12:23	3461	144.90	0.00	13/05/2006	22:09	3337	-115.50	-2.10
11/05/2006	12:47	3451	123.90	-21.00	13/05/2006	22:24	3336	-117.60	-2.10
11/05/2006	13:11	3468	159.60	35.70	13/05/2006	22:40	3335	-119.70	-2.10
11/05/2006	13:24	3469	161.70	2.10	26/05/2006	09:11	3484	193.20	312.90
11/05/2006	13:35	3472	168.00	6.30	26/05/2006	16:53	3470	163.80	-29.40
11/05/2006	13:42	3476	176.40	8.40	27/05/2006	09:33	3452	126.00	-37.80
11/05/2006	13:52	3480	184.80	8.40	28/05/2006	08:43	3422	63.00	-63.00
11/05/2006	13:59	3481	186.90	2.10	28/05/2006	20:33	3428	75.60	12.60
11/05/2006	14:08	3480	184.80	-2.10	29/05/2006	08:47	3426	71.40	-4.20
11/05/2006	14:31	3471	165.90	-18.90	29/05/2006	16:02	3470	163.80	92.40
11/05/2006	16:02	3418	54.60	-111.30	30/05/2006	08:43	3433	86.10	-77.70
12/05/2006	08:07	3398	12.60	-42.00	30/05/2006	14:02	3474	172.20	86.10
12/05/2006	11:38	3468	159.60	147.00	31/05/2006	08:36	3418	54.60	-117.60
12/05/2006	14:23	3444	109.20	-50.40	31/05/2006	14:05	3457	136.50	81.90
13/05/2006	10:12	3362	-63.00	-172.20	31/05/2006	20:27	3429	77.70	-58.80
13/05/2006	13:54	3392	0.00	63.00	01/06/2006	08:35	3417	52.5	-25.2

Tabla 5.4: Incrementos de esfuerzo observados para el sensor DCS2

Las temperaturas se corrigieron realizando una inspección de los datos, similar a la mostrada con la tabla 5.2. El error en la medición del sensor DCI1, se presentó después del día 22 de marzo de 2007 a las 10:18 hrs, en ese entonces, la temperatura registrada fue de 21 °C. Posteriormente el sistema de captura falló, por lo cual, sus lecturas fueron de -224 °C hasta el día 17 de abril de 2007 a las 14:00 hrs; instante en el que se registraron 31.89 °C. En este caso la corrección consistió en eliminar las lecturas de -224 °C y sustituirlas por del valor de 21 °C. Por otro lado también se pueden apreciar que algunos valores de temperatura son superiores a los 40 °C tanto en el lecho superior como en el inferior de la dovela central, lo cual es incorrecto ya que a las 8:00 am, las temperaturas oscilan entre los 17 y los 24 °C, en el lecho inferior alcanzando valores ligeramente mayores en el lecho superior. En este caso se sustituyó el valor erróneo por el registro del día anterior. Al hacer estos ajustes se obtiene el resultado que muestra en las siguientes figuras:

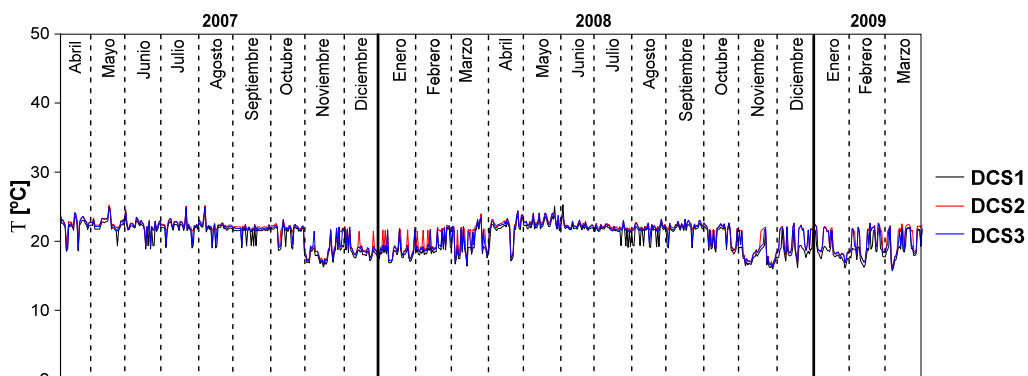


Figura 5.20: Temperaturas corregidas en el lecho superior de la dovela central

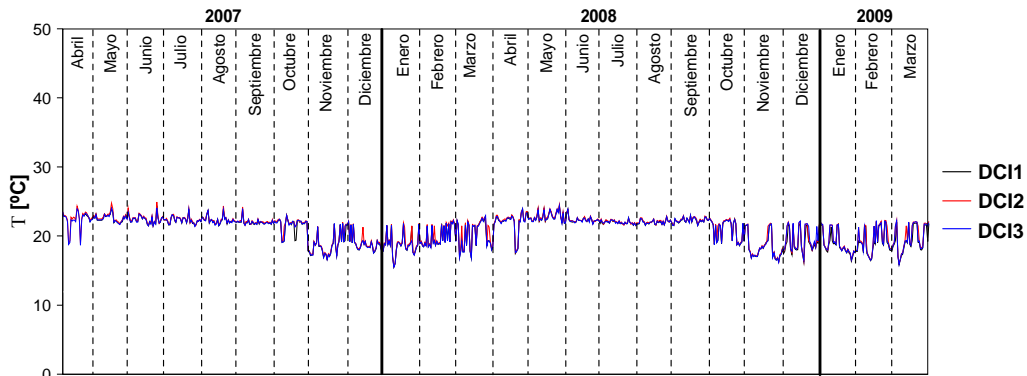


Figura 5.21: Temperaturas corregidas en el lecho inferior de la dovela central

El procedimiento mostrado para corregir las lecturas de las cuerdas vibrantes de la dovela central se aplicó en forma similar para depurar los datos recabados con los sensores de las demás dovelas. Al observar las gráficas de incrementos de esfuerzo, se identificaron tres tipos de problemas:

- Desfasamientos: Que trascienden en las capturas de las 8:00 y 20:00 hrs. (apéndices A y B; figuras A.7, A.10, A.19, A.29, A.36, B.2, B.7, B.10, B.19, B.29 y B.36).
- Incrementos repentinos: Sólo ocurrieron a las 8:00 hrs. a partir del mes de diciembre de 2008, en el punto H2 de las dovelas D4, D8 y D11 (apéndice A; figuras A.5, A.13, A.14, A.23, A.25, A.26 y A.33).
- Valores excesivos: Algunos dispositivos midieron valores cuya magnitud difiere demasiado comparada con la dimensión de los registros obtenidos con sensores ubicados en posiciones similares (apéndices A y B; figura A.3, A.15, A.18, A.20, A.30 y B.36).

En el caso de las temperaturas, los inconvenientes observados consisten en que la mayoría de los aparatos registraron mediciones del orden de 30 hasta 40 °C durante la mañana, cuando la temperatura en esa etapa del día, ronda entre los 17 y los 24 °C, excepto para los termistores ubicados en el lecho superior de cada dovela, donde los registros se aproximan a los 30 °C. En casos más extremos se encontraban mediciones que alcanzaban los 70 °C, tanto a las 8:00 como a las 20 hrs. (apéndices C y D; figuras C.29 y D.29). Por otro lado, fueron pocos los sensores cuyos registros fueron eliminados (D4I1 D8V2 D8NIV2, lado Tuxtla Gutiérrez), ya que sólo mostraban temperaturas negativas en ambos horarios de captura (apéndice C; figuras C.7, C.15, C.25).

Las tablas que se muestran a continuación (5.5 a 5.10), contienen los valores de esfuerzo, desplazamiento y temperatura promedio alcanzados durante el monitoreo. Las celdas que aparecen en color naranja contienen los valores que no concuerdan con las hipótesis planteadas o simplemente se desconoce su veracidad. Por lo tanto, su información se descarta para los análisis que se elaboran en la siguiente sección.

Es importante tener un control de los sensores cuya información fue corregida o en su defecto, no aportan datos congruentes, ya que será necesario rectificar esta situación al revisar los dispositivos en campo. Los valores promedio de las mediciones realizadas aportan una idea de la tendencia de los registros que se deben obtener, lo cual facilita las cosas, ya que es difícil hacerlo sólo observando gráficas.

Dovela	Punto	$\Delta\sigma_{prom}$ [Kg/cm ²]	Desv. est. [Kg/cm ²]	T _{prom} [°C]	Desv. est. [°C]
DC	DCS1	-300.98	18.86	20.40	2.09
	DCS2	90.83	24.42	21.23	1.97
	DCS3	-331.61	20.46	20.97	1.99
	DCI1	28.23	20.47	20.80	1.95
	DCI2	46.62	20.11	21.03	1.94
	DCI3	59.63	18.16	20.90	1.95

Tabla 5.5: Valores promedio medidos en la dovela central a las 8:00 hrs.

Dovela	Punto	$\Delta\sigma_{prom}$ [Kg/cm ²]	Desv. est. [Kg/cm ²]	T _{prom} [°C]	Desv. est. [°C]
DC	DCS1	-362.83	40.14	28.51	4.04
	DCS2	124.05	26.81	29.16	4.19
	DCS3	-404.54	46.01	29.36	4.15
	DCI1	27.13	22.28	25.84	2.78
	DCI2	98.02	22.03	25.67	2.64
	DCI3	46.55	16.40	25.98	2.63

Tabla 5.6: Valores promedio medidos en la dovela central a las 20:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	δ_{prom} [mm]	Desv. est. [mm]	T _{prom} [°C]	Desv. est. [°C]	δ_{prom} [mm]	Desv. est. [mm]	T _{prom} [°C]	Desv. est. [°C]
D6	D6L1	-0.1068	0.0183	23.92	2.02	-0.1858	0.0166	23.71	1.92
	D6L2	-0.1628	0.0232	24.29	1.98	-0.0652	0.0209	23.37	1.83
	D6L3	-0.0982	0.0251	24.24	1.85	-0.0663	0.0102	22.74	0.96

Tabla 5.7: Valores promedio medidos en la dovela seis a las 8:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	δ_{prom} [mm]	Desv. est. [mm]	T _{prom} [°C]	Desv. est. [°C]	δ_{prom} [mm]	Desv. est. [mm]	T _{prom} [°C]	Desv. est. [°C]
D6	D6L1	-0.0993	0.0179	26.35	2.49	-0.1781	0.0162	26.89	2.55
	D6L2	-0.1600	0.0232	26.45	2.46	-0.0656	0.0208	26.89	2.56
	D6L3	-0.0930	0.0250	26.52	2.23	-0.0579	0.0083	23.47	1.43

Tabla 5.8: Valores promedio medidos en la dovela seis a las 20:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	$\Delta\sigma_{prom}$ [Kg/cm ²]	Desv. est. [Kg/cm ²]	T _{prom} [°C]	Desv. est. [°C]	$\Delta\sigma_{prom}$ [Kg/cm ²]	Desv. est. [Kg/cm ²]	T _{prom} [°C]	Desv. est. [°C]
D4	D4S1	-56.12	23.16	20.69	2.06	-64.82	20.35	19.71	1.99
	D4S2	-133.47	27.09	20.98	2.03	3.34	22.34	20.30	2.11
	D4S3	-17.19	27.40	20.97	2.03	-143.63	22.18	20.46	2.10
	D4S4	-154.84	26.10	20.82	2.01	-150.33	23.33	20.30	2.07
	D4H1	-57.15	11.48	21.76	1.83	-287.35	15.66	20.92	1.99
	D4H2	-97.44	19.75	21.76	1.71	-187.00	18.47	21.08	1.95
	D4I1	122.23	41.03	-	-	-147.94	19.96	20.96	1.96
	D4I2	24.86	18.52	21.28	1.88	211.17	13.43	21.14	1.93
	D4I3	111.07	28.74	21.23	1.94	233.32	12.76	21.17	1.92
D4I4	270.00	60.30	21.12	2.04	187.13	13.59	21.00	1.94	
D8	D8S1	117.31	23.58	24.21	2.09	-16.50	21.17	24.01	1.98
	D8S2	185.60	15.66	23.75	1.91	190.29	26.64	23.86	1.95
	D8H1	-35.44	17.18	22.21	1.70	-7.06	16.08	21.82	1.84
	D8H2	-11.70	18.91	22.51	1.58	188.68	26.82	22.12	1.75
	D8V1	49.98	4.28	22.12	1.74	-50.77	8.88	21.75	1.85
	D8V2	58.73	6.61	-	-	87.36	10.39	22.02	1.76
	D8D1	-332.27	22.96	22.50	1.65	68.78	18.77	22.15	1.74
	D8D2	-243.64	20.42	22.54	1.64	-8.83	18.70	22.20	1.71
	D8D3	-157.02	13.38	22.46	1.65	-485.98	31.00	22.19	1.72
	D8D4	-575.61	12.94	22.48	1.65	-432.56	27.60	22.26	1.70
	D8I1	-377.69	11.71	21.91	1.80	-236.40	14.82	21.56	1.86
	D8I2	-187.40	10.63	22.27	1.70	-142.21	7.33	21.96	1.76
	D8I3	-269.06	8.20	22.33	1.68	-130.94	9.32	22.21	1.69
D8I4	-201.85	32.87	22.09	1.73	-153.74	14.91	21.93	1.73	
D8NI	D8NIS1	249.05	21.93	24.08	2.04	97.00	34.88	24.22	2.00
	D8NIS2	186.64	13.44	23.67	1.88	177.81	52.85	23.46	1.81
	D8NIH1	49.63	15.69	22.46	1.63	200.21	22.52	22.19	1.74
	D8NIH2	-10.16	12.66	22.73	1.59	155.06	25.60	22.23	1.70
	D8NIV1	-62.78	4.12	22.28	1.69	11.01	10.99	22.07	1.76
	D8NIV2	-35.93	6.65	-	-	85.96	10.93	22.24	1.70
	D8NID1	-52.50	12.02	22.59	1.64	342.68	25.78	22.13	1.73
	D8NID2	146.78	15.52	22.38	1.65	28.88	24.42	22.05	1.74
	D8NII1	-228.48	19.81	22.03	1.81	-202.30	10.98	21.73	1.82
	D8NII2	-188.54	9.21	22.60	1.65	-175.07	14.33	22.15	1.71
	D8NII3	-200.59	12.40	22.52	1.64	-260.00	10.17	22.28	1.66
D8NII4	-182.93	13.05	22.06	1.72	-52.48	16.55	22.12	1.69	
D11NI	D11NIS1	-351.81	61.09	24.12	2.03	-266.99	43.56	23.65	1.98
	D11NIS2	-225.14	46.95	23.39	1.71	-313.41	44.86	23.29	1.90
	D11NIH1	-208.11	48.12	22.49	1.59	-312.89	67.46	22.02	1.77
	D11NIH2	232.24	86.66	22.72	1.48	-77.65	14.93	22.28	1.69
	D11NII1	217.90	12.29	21.86	1.72	-39.96	11.00	21.59	1.83
	D11NII2	-183.49	13.26	22.01	1.69	-170.21	11.35	21.82	1.77
	D11NII3	266.03	12.15	21.85	1.74	-140.84	11.70	21.49	1.82

Tabla 5.9: Valores promedio medidos en las dovelas restantes a las 8:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	$\Delta\sigma_{prom}$ [Kg/cm ²]	Desv. est. [Kg/cm ²]	T _{prom} [°C]	Desv. est. [°C]	$\Delta\sigma_{prom}$ [Kg/cm ²]	Desv. est. [Kg/cm ²]	T _{prom} [°C]	Desv. est. [°C]
D4	D4S1	-127.64	45.49	28.87	4.13	-154.47	47.79	29.63	4.31
	D4S2	-203.11	43.44	29.22	4.17	-84.91	50.10	30.51	4.49
	D4S3	-87.73	42.10	29.10	4.02	-227.37	47.08	30.80	4.50
	D4S4	-243.13	46.13	29.52	4.10	-242.61	51.49	29.86	4.29
	D4H1	-24.69	15.31	26.02	2.57	-262.73	15.00	26.29	2.72
	D4H2	-85.75	12.97	25.75	2.56	-161.33	12.55	26.16	2.69
	D4I1	146.68	55.12	-	-	-107.36	22.71	25.97	2.53
	D4I2	37.94	23.69	25.33	2.38	208.03	14.00	26.08	2.49
	D4I3	111.22	28.56	25.21	2.34	230.86	13.88	25.97	2.45
D4I4	271.81	59.24	25.29	2.80	172.65	18.61	25.99	2.38	
D8	D8S1	128.36	24.28	26.66	2.51	9.29	18.22	26.43	2.42
	D8S2	185.84	14.96	26.42	2.46	205.46	29.13	26.79	2.51
	D8H1	-36.67	17.29	25.33	2.27	-16.41	14.93	25.34	2.26
	D8H2	-15.27	14.16	25.50	2.22	176.90	25.83	25.61	2.24
	D8V1	44.09	4.78	25.23	2.26	-64.89	10.44	25.46	2.26
	D8V2	55.08	4.89	-	-	81.25	9.97	25.72	2.24
	D8D1	-346.85	18.79	25.30	2.18	46.52	23.43	26.06	2.25
	D8D2	-258.40	17.40	25.42	2.18	-29.84	22.11	26.08	2.24
	D8D3	-144.93	14.83	25.26	2.11	-483.19	32.85	26.02	2.21
	D8D4	-563.96	15.63	25.34	2.12	-428.86	29.26	26.02	2.20
	D8I1	-371.07	28.62	24.72	2.09	-214.53	15.38	24.42	1.92
	D8I2	-174.69	9.77	24.61	1.95	-137.42	8.21	24.47	1.86
	D8I3	-257.68	11.03	24.62	1.92	-125.08	10.75	24.76	1.91
D8I4	-203.68	34.05	24.74	1.93	-162.53	21.81	24.87	1.90	
D8NI	D8NIS1	253.78	21.37	26.64	2.53	116.94	40.56	26.85	2.43
	D8NIS2	184.49	13.02	26.14	2.36	183.80	56.98	26.75	2.46
	D8NIH1	49.01	15.05	25.33	2.25	188.60	22.45	25.90	2.31
	D8NIH2	-15.77	10.64	25.35	2.21	140.71	27.47	25.78	2.25
	D8NIV1	-67.18	4.74	25.25	2.26	3.80	11.76	25.75	2.28
	D8NIV2	-38.58	6.82	-	-	79.11	10.98	25.87	2.23
	D8NID1	-58.17	9.83	25.53	2.21	378.62	26.66	26.17	2.26
	D8NID2	159.81	18.25	25.21	2.13	38.98	41.74	26.11	2.23
	D8NII1	-227.71	22.90	24.92	2.28	-200.65	15.60	24.61	1.93
	D8NII2	-176.31	11.78	24.99	2.04	-177.37	15.18	24.84	1.97
	D8NII3	-190.92	11.61	24.90	2.00	-253.90	11.61	25.00	1.98
	D8NII4	-185.65	14.95	24.81	1.96	-66.02	26.02	25.29	1.99
D11NI	D11NIS1	-321.27	60.23	26.71	2.59	-241.70	40.92	26.45	2.44
	D11NIS2	-208.60	49.53	26.03	2.37	-296.01	41.64	26.46	2.47
	D11NIH1	-182.51	43.26	24.96	2.15	-299.54	60.72	25.47	2.25
	D11NIH2	183.12	37.90	24.86	2.15	-84.96	13.59	25.82	2.26
	D11NII1	224.11	13.14	24.81	2.16	-36.33	12.29	25.16	2.29
	D11NII2	-177.25	14.30	24.74	2.12	-179.25	14.02	25.33	2.20
	D11NII3	265.36	12.54	24.72	2.10	-139.24	18.65	25.19	2.16

Tabla 5.10: Valores promedio medidos en las dovelas restantes a las 20:00 hrs.

A continuación, se presentan una serie de tablas similares a las anteriores, las cuales contienen la relación de los sensores cuyos datos fueron rectificadas. Esto lo indican las celdas marcadas con una "X". Las celdas color naranja y marcadas con una "X", hacen referencia a los dispositivos cuya información fue corregida y que a pesar de ello resultó incongruente con las hipótesis establecidas. Por último, las celdas color amarillo, hacen referencia a los sensores que se corrigieron en el horario complementario. Por ejemplo, aquellos cuyas lecturas no fueron corregidas en el horario de las 8:00 hrs., pero sí hubo la necesidad de hacerlo en las capturas correspondientes al horario de las 20:00 hrs. y viceversa.

Dovela	Punto	$\Delta\sigma$ [Kg/cm ²]	T [°C]
DC	DCS1		X
	DCS2		X
	DCS3		X
	DCI1		X
	DCI2	X	X
	DCI3		X

Tabla 5.11: Sensores corregidos en la dovela central a las 8:00 hrs.

Dovela	Punto	$\Delta\sigma$ [Kg/cm ²]	T [°C]
DC	DCS1		
	DCS2		
	DCS3		
	DCI1		X
	DCI2	X	
	DCI3		

Tabla 5.12: Sensores corregidos en la dovela central a las 20:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez		San Cristóbal	
Dovela	Punto	δ [mm]	T [°C]	δ [mm]	T [°C]
D6	D6L1				
	D6L2			X	
	D6L3		X		X

Tabla 5.13: Sensores corregidos en la dovela seis a las 8:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez		San Cristóbal	
Dovela	Punto	δ [mm]	T [°C]	δ [mm]	T [°C]
D6	D6L1				
	D6L2			X	
	D6L3		X		X

Tabla 5.14: Sensores corregidos en la dovela seis a las 20:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez		San Cristóbal	
Dovela	Punto	$\Delta\sigma$ [Kg/cm ²]	T [°C]	$\Delta\sigma$ [Kg/cm ²]	T [°C]
D4	D4S1		X		X
	D4S2		X		X
	D4S3		X		X
	D4S4		X		X
	D4H1		X		X
	D4H2	X	X	X	X
	D4I1	X			X
	D4I2		X		X
	D4I3		X		X
	D4I4		X		X
D8	D8S1			X	
	D8S2				
	D8H1		X		X
	D8H2	X	X	X	X
	D8V1		X		X
	D8V2				X
	D8D1		X		X
	D8D2		X		X
	D8D3		X		X
	D8D4		X		X
	D8I1	X	X		X
	D8I2		X		X
	D8I3		X		X
	D8I4	X	X		X
D8NI	D8NIS1				
	D8NIS2				
	D8NIH1	X	X		X
	D8NIH2	X	X	X	X
	D8NIV1		X		X
	D8NIV2	X			X
	D8NID1		X	X	X
	D8NID2		X	X	X
	D8NII1	X	X	X	X
	D8NII2		X	X	X
	D8NII3		X		X
	D8NII4	X	X	X	X
D11NI	D11NIS1				
	D11NIS2				
	D11NIH1		X		X
	D11NIH2	X	X	X	X
	D11NII1	X	X		X
	D11NII2	X	X		X
	D11NII3		X	X	X

Tabla 5.15: Sensores corregidos en las dovelas restantes a las 8:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez		San Cristóbal	
Dovela	Punto	$\Delta\sigma$ [Kg/cm ²]	T [°C]	$\Delta\sigma$ [Kg/cm ²]	T [°C]
D4	D4S1				X
	D4S2				
	D4S3				
	D4S4				
	D4H1				
	D4H2				
	D4I1	X			
	D4I2				
	D4I3				
	D4I4			X	
D8	D8S1			X	
	D8S2				
	D8H1				
	D8H2				
	D8V1				X
	D8V2				
	D8D1				
	D8D2				
	D8D3				
	D8D4				
	D8I1	X			
	D8I2				
	D8I3				
	D8I4	X			
D8NI	D8NIS1				
	D8NIS2				
	D8NIH1				
	D8NIH2				
	D8NIV1				
	D8NIV2				
	D8NID1				
	D8NID2				
	D8NII1	X	X	X	
	D8NII2			X	
	D8NII3				
	D8NII4	X		X	
D11NI	D11NIS1				
	D11NIS2				
	D11NIH1	X			
	D11NIH2			X	
	D11NII1	X			X
	D11NII2	X	X	X	
	D11NII3			X	

Tabla 5.16: Sensores corregidos en las dovelas restantes a las 20:00 hrs.

Con las tablas anteriores se pueden obtener algunos datos estadísticos empleando el número de elementos que involucran. Cada celda marcada indica el estado de las correcciones realizadas. La interpretación de las mismas se resume a continuación:

Significado	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	Complemento
Tipo de celda	X	X		

Tabla 5.17: Simbología empleada en la elaboración de datos estadísticos.

Esfuerzos corregidos					
Hora	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	Complemento	Total
8:00	17	8	15	1	41
20:00	12	4	20	5	41

Tabla 5.18: Valores estadísticos de las correcciones de esfuerzo

Desplazamientos relativos corregidos					
Hora	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	Complemento	Total
8:00	1	0	1	0	2
20:00	1	0	1	0	2

Tabla 5.19: Valores estadísticos de las correcciones de desplazamiento relativo

Temperaturas corregidas					
Hora	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	Complemento	Total
8:00	80	0	3	0	83
20:00	9	0	3	71	83

Tabla 5.20: Valores estadísticos de las correcciones de temperatura

Con estos datos se puede conocer el porcentaje de eficiencia del sistema en la captura de los parámetros medidos, mediante la siguiente ecuación:

$$\%E = \frac{N_s - n_{se}}{N_s} \times 100 \quad \text{Ec. 5.10}$$

Donde:

N_s : Número de sensores utilizados por parámetro.

n_{se} : Número de sensores con lecturas erróneas.

Las tablas que se muestran a continuación concentran la información obtenida con los cálculos realizados:

Incremento de esfuerzo					
Hora	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	n _{se}	%E
8:00	17	8	15	40	56.52
20:00	12	4	20	36	60.87

Tabla 5.21: Porcentajes de eficiencia en las mediciones de esfuerzo

Desplazamiento relativo					
Hora	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	n _{se}	%E
8:00	1	0	1	2	66.67
20:00	1	0	1	2	66.67

Tabla 5.22: Porcentajes de eficiencia en las mediciones de desplazamiento relativo

Temperatura					
Hora	Con éxito	Sin éxito	Sin corrección	n _{se}	%E
8:00	80	0	3	83	15.30
20:00	9	0	3	12	87.76

Tabla 5.23: Porcentajes de eficiencia en las mediciones de temperatura

Como se mencionó en la sección 5.2. Los horarios de captura (8:00 y 20:00 hrs.) se establecieron con la finalidad de reducir los errores que se presentaron en las mediciones realizadas hora por hora desde el inicio del monitoreo; con idea de que esta situación solo fuese algo circunstancial como sucede en la mayoría de los casos, ya que ningún sistema de monitoreo es perfecto. En la práctica esto es muy válido ya que equivale a aplicar una especie de filtro a las lecturas, dado el carácter aleatorio de los valores medidos y que la respuesta de los sistemas de captura puede ser afectada por el entorno.

Las estadísticas en este caso indican que de los 41 sensores que presentaron errores al medir los incrementos de esfuerzo. Se dejan de corregir 5 dispositivos a las 20:00 y uno a las 8:00 hrs. (tabla 5.18). En cuanto a las lecturas de desplazamiento relativo, se detectan problemas únicamente en 2 dispositivos independientemente del horario de captura (tabla 5.19). Mientras que en las mediciones de temperatura existen 83 casos de instrumentos con errores a las 8:00 hrs., de los cuales 71 resultan ser algo transitorio, ya que a las 20:00 hrs. sólo se aprecian 12 situaciones de este tipo (tabla 5.20). Lo anterior revela que la información obtenida a las 20:00 hrs. es la que presenta menos errores. Esto indica que el sistema es inestable, debido a problemas de impedancia que se pueden presentar tanto en las cuerdas vibrantes como en el sistema de captura. Para descartar esta posibilidad, en el apéndice I se expone la metodología a seguir para comprobar el correcto funcionamiento de los instrumentos.

Técnicamente, alrededor del 40% de los dispositivos de cuerda vibrante requieren correcciones en sus mediciones. Lo cual resulta poco práctico, ya que la mayoría de las correcciones deben aplicarse en ambos horarios de captura. El trabajo en este aspecto se realiza al doble y es muy demandante, ya que se carecen de medios automatizados que ayuden a realizar las

correcciones. Ante tal situación lo más recomendable es revisar y validar únicamente la información capturada hora por hora en lugar de hacerlo en horarios separados.

5.2.4 Análisis de la información.

En este apartado se utilizarán los datos obtenidos anteriormente para determinar si los esfuerzos estimados en el diseño del puente son inferiores a los límites permitidos, de acuerdo con las especificaciones del proyecto. Así como las condiciones en las que se encuentra la zona de transición mediante el análisis de los desplazamientos relativos máximos medidos en esta región de la superestructura.

5.2.4.1 Revisión de niveles de esfuerzo.

La metodología de análisis para determinar el estado actual de esfuerzos o deformaciones aproximado al que se encuentra sometido el puente San Cristóbal consiste en determinar el estado inicial de esfuerzos obtenido del análisis realizado por el diseñador bajo la condición: carga muerta de servicio (CMS) más peso propio (PP), a la cual se le añaden los incrementos de esfuerzo ($\Delta\sigma_M$). Además, se tomará en cuenta que el puente fue sometido a un proceso de postensado para mejorar el comportamiento estructural de la losa de concreto. El procedimiento para el cálculo del estado actual de los esfuerzos se realiza de la siguiente manera para las diferentes secciones instrumentadas:

1. Patines superiores de las dovelas D6 a D14 en ambos márgenes (losa de concreto postensada). A los esfuerzos iniciales calculados por el análisis ($\sigma_{(CMS + PP + Postensado)}$), se les añaden los incrementos de esfuerzo medidos por el monitoreo ($\Delta\sigma_M$), obteniéndose de manera aproximada los esfuerzos totales actuantes ($\sigma_{(CMS + PP + Postensado)} + \Delta\sigma_M$).
2. Patines superiores de la dovela DC y las dovelas D1 a D5 en ambos márgenes (losa ortotrópica). A los esfuerzos calculados por el análisis ($\sigma_{(CMS + PP)}$) se les agregan los incrementos de esfuerzo provenientes del monitoreo. De esta forma se calculan aproximadamente los esfuerzos actuantes ($\sigma_{(CMS + PP)} + \Delta\sigma_M$).
3. Patines inferiores de todo el puente. Para el cálculo de los esfuerzos de los patines inferiores comprendidos entre las dovelas D6 y D14 de ambos márgenes, rigurosamente se debe agregar el incremento o decremento del esfuerzo ocasionado por el postensado, pero debido a que el efecto del postensado no es significativo, se desprecia su efecto y solo se consideran los esfuerzos ocasionados por las condiciones CMS + PP obtenidos por el análisis y el $\Delta\sigma_M$ determinado por el monitoreo del puente. Para el cálculo de los niveles de esfuerzo de las secciones restantes, se procederá de la misma forma (Bennetts, 2008).

De acuerdo al procedimiento descrito, se muestran a continuación los valores de esfuerzo iniciales proporcionados por el proyectista en kg/cm^2 .

Lado	Lecho	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	DC
Tuxtla Gutiérrez	Superior	-130	-535	-890	-725	-880	-985	-695	-985	-965	-885	-685	-485	-665	-760	-780
	Inferior	295	387.5	355	0	-405	-660	-810	-665	-435	-45	295	525	720	830	870
San Cristóbal	Superior	-760	-665	-485	-685	-885	-965	-985	-695	-985	-880	-725	-890	-535	-130	-780
	Inferior	830	720	525	295	-45	-435	-665	-810	-660	-400	0	350	387.5	295	870

Tabla 5.24: Esfuerzos iniciales promedio, por dovela (Bennetts, 2008)

Para conocer si los esfuerzos actuantes se encuentran cercanos al límite permisible, se calcula el porcentaje de esfuerzo alcanzado de a cuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\% \sigma_{perm} = \frac{\sigma_{(CMS+PP)} + \Delta \sigma_M}{0.55 f_y} \quad Ec. 5.11$$

$$\% \sigma_{perm} = \frac{\sigma_{(CMS+PP+Postensado)} + \Delta \sigma_M}{0.55 f_y} \quad Ec. 5.12$$

Donde el esfuerzo permisible es $0.55 f_y$, por lo tanto para el acero estructural de grado A50, el límite de fluencia es, $f_y=3520 \text{ kg/cm}^2$, entonces, $0.55 f_y=1936 \text{ kg/cm}^2$. De a cuerdo con lo comentado anteriormente, las siguientes tablas resumen los resultados de los cálculos realizados:

Dovela	Punto	σ_i [Kg/cm ²]	$\Delta \sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\sigma_i + \Delta \sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\% \sigma_{perm}$ [Kg/cm ²]
DC	DCS1	-780.00	-300.98	-1080.98	55.84
	DCS2	-	-	-	-
	DCS3	-780.00	-331.61	-1111.61	57.42
	DCI1	870.00	28.23	898.23	46.40
	DCI2	870.00	46.62	916.62	47.35
	DCI3	870.00	59.63	929.63	48.02

Tabla 5.25: Porcentajes de esfuerzo alcanzado en la dovela central a las 8:00 hrs.

Dovela	Punto	σ_i [Kg/cm ²]	$\Delta \sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\sigma_i + \Delta \sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\% \sigma_{perm}$ [Kg/cm ²]
DC	DCS1	-780.00	-362.83	-1142.83	59.03
	DCS2	-	-	-	-
	DCS3	-780.00	-404.54	-1184.54	61.18
	DCI1	870.00	27.13	897.13	46.34
	DCI2	870.00	98.02	968.02	50.00
	DCI3	870.00	46.55	916.55	47.34

Tabla 5.26: Porcentajes de esfuerzo alcanzado en la dovela central a las 20:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	σ_i [Kg/cm ²]	$\Delta\sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\sigma_i+\Delta\sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\% \sigma_{Perm}$ [Kg/cm ²]	σ_i [Kg/cm ²]	$\Delta\sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\sigma_i+\Delta\sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\% \sigma_{Perm}$ [Kg/cm ²]
D4	D4S1	-685.00	-56.12	-741.12	38.28	-725.00	-64.82	-789.82	40.80
	D4S2	-685.00	-133.47	-818.47	42.28	-	-	-	-
	D4S3	-685.00	-17.19	-702.19	36.27	-725.00	-143.63	-868.63	44.87
	D4S4	-685.00	-154.84	-839.84	43.38	-725.00	-150.33	-875.33	45.21
	D4I1	295.00	122.23	417.23	21.55	-	-	-	-
	D4I2	-	-	-	-	0.00	211.17	211.17	10.91
	D4I3	295.00	111.07	406.07	20.97	0.00	233.32	233.32	12.05
	D4I4	295.00	270.00	565.00	29.18	0.00	187.13	187.13	9.67
D8	D8S1	-695.00	117.31	-577.69	29.84	-	-	-	-
	D8S2	-695.00	185.60	-509.40	26.31	-985.00	190.29	-794.71	41.05
	D8I1	-810.00	-377.69	-1187.69	61.35	-665.00	-236.40	-901.40	46.56
	D8I2	-810.00	-187.40	-997.40	51.52	-665.00	-142.21	-807.21	41.69
	D8I3	-810.00	-269.06	-1079.06	55.74	-665.00	-130.94	-795.94	41.11
	D8I4	-810.00	-201.85	-1011.85	52.26	-665.00	-153.74	-818.74	42.29
D8NI	D8NIS1	-695.00	249.05	-445.95	23.03	-985.00	97.00	-888.00	45.87
	D8NIS2	-695.00	186.64	-508.36	26.26	-985.00	177.81	-807.19	41.69
	D8NII1	-810.00	-228.48	-1038.48	53.64	-665.00	-202.30	-867.30	44.80
	D8NII2	-810.00	-188.54	-998.54	51.58	-665.00	-175.07	-840.07	43.39
	D8NII3	-810.00	-200.59	-1010.59	52.20	-665.00	-260.00	-925.00	47.78
	D8NII4	-810.00	-182.93	-992.93	51.29	-665.00	-52.48	-717.48	37.06
D11NI	D11NIS1	-725.00	-351.81	-1076.81	55.62	685.00	-266.99	418.01	21.59
	D11NIS2	-725.00	-225.14	-950.14	49.08	685.00	-313.41	371.59	19.19
	D11NII1	0.00	217.90	217.90	11.25	-	-	-	-
	D11NII2	-	-	-	-	-	-	-	-
	D11NII3	0.00	266.03	266.03	13.74	-	-	-	-

Tabla 5.27: Porcentajes de esfuerzo alcanzado en las dovelas restantes a las 8:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	σ_i [Kg/cm ²]	$\Delta\sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\sigma_i+\Delta\sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\% \sigma_{Perm}$ [Kg/cm ²]	σ_i [Kg/cm ²]	$\Delta\sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\sigma_i+\Delta\sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\% \sigma_{Perm}$ [Kg/cm ²]
D4	D4S1	-685.00	-127.64	-812.64	41.98	-725.00	-154.47	-879.47	45.43
	D4S2	-685.00	-203.11	-888.11	45.87	-	-	-	-
	D4S3	-685.00	-87.73	-772.73	39.91	-725.00	-227.37	-952.37	49.19
	D4S4	-685.00	-243.13	-928.13	47.94	-725.00	-242.61	-967.61	49.98
	D4I1	295.00	146.68	441.68	22.81	-	-	-	-
	D4I2	-	-	-	-	0.00	208.03	208.03	10.75
	D4I3	295.00	111.22	406.22	20.98	0.00	230.86	230.86	11.92
	D4I4	295.00	271.81	566.81	29.28	0.00	172.65	172.65	8.92
D8	D8S1	-695.00	128.36	-566.64	29.27	-	-	-	-
	D8S2	-695.00	185.84	-509.16	26.30	-985.00	205.46	-779.54	40.27
	D8I1	-810.00	-371.07	-1181.07	61.01	-665.00	-214.53	-879.53	45.43
	D8I2	-810.00	-174.69	-984.69	50.86	-665.00	-137.42	-802.42	41.45
	D8I3	-810.00	-257.68	-1067.68	55.15	-665.00	-125.08	-790.08	40.81
	D8I4	-810.00	-203.68	-1013.68	52.36	-665.00	-162.53	-827.53	42.74

Tabla 5.28a: Porcentajes de esfuerzo alcanzado en las dovelas restantes a las 20:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez				San Cristóbal			
Dovela	Punto	σ_i [Kg/cm ²]	$\Delta\sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\sigma_i+\Delta\sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\% \sigma_{Perm}$ [Kg/cm ²]	σ_i [Kg/cm ²]	$\Delta\sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\sigma_i+\Delta\sigma_M$ [Kg/cm ²]	$\% \sigma_{Perm}$ [Kg/cm ²]
D8NI	D8NIS1	-695.00	253.78	-441.22	22.79	-985.00	116.94	-868.06	44.84
	D8NIS2	-695.00	184.49	-510.51	26.37	-985.00	183.80	-801.20	41.38
	D8NII1	-810.00	-227.71	-1037.71	53.60	-665.00	-200.65	-865.65	44.71
	D8NII2	-810.00	-176.31	-986.31	50.95	-665.00	-177.37	-842.37	43.51
	D8NII3	-810.00	-190.92	-1000.92	51.70	-665.00	-253.90	-918.90	47.46
	D8NII4	-810.00	-185.65	-995.65	51.43	-665.00	-66.02	-731.02	37.76
D11NI	D11NIS1	-725.00	-321.27	-1046.27	54.04	685.00	-241.70	443.30	22.90
	D11NIS2	-725.00	-208.60	-933.60	48.22	685.00	-296.01	388.99	20.09
	D11NII1	0.00	224.11	224.11	11.58	-	-	-	-
	D11NII2	-	-	-	-	-	-	-	-
	D11NII3	0.00	265.36	265.36	13.71	-	-	-	-

Tabla 5.28b: Porcentajes de esfuerzo alcanzado en las dovelas restantes a las 20:00 hrs.

De las tablas anteriores se puede apreciar que el porcentaje de esfuerzo máximo alcanzado en la superestructura es del orden del 60% del valor permitido y que además, se encuentra en la interfaz de las dovelas D8 de ambos márgenes con las pilas, así como en las dovelas ubicadas al centro de cada uno de los tres claros (DC y D11 de ambos márgenes). Por otro lado, al complementar lo observado con los porcentajes presentados en las ubicaciones restantes (D4 de ambos márgenes) se puede asegurar que el desempeño global de la estructura es aceptable al notar en estas, valores que oscilan entre el 10% y el 50% del esfuerzo permisible. Esto indica que las placas de acero que componen las distintas secciones del puente, se encuentran sometidas a valores de esfuerzo cuya magnitud se encuentra dentro del rango elástico, lo cual garantiza que las deformaciones que se producen en condiciones de servicio puedan ser recuperadas, promoviendo de esta forma, la longevidad de la superestructura.

5.2.4.2 Revisión de desplazamientos relativos.

Para determinar la calidad de los elementos estructurales que se utilizaron en la construcción de la zona de transición, el II-UNAM realizó varios estudios en el laboratorio (Sánchez R., 2005). Se realizaron diferentes pruebas a los distintos tipos de materiales, conexiones y conectores que conforman las dovelas, tales como pruebas de flexión simple a placas de acero grado A50 con espesores de 12.7 mm y 19 mm; a las conexiones placa-conector y a los conectores tipo perno Nelson auto-soldables de 19 mm de diámetro por 20.5 cm de longitud, las cuales también incluyeron ensayos de resistencia al esfuerzo cortante entre las conexiones y las placas. De toda la gama de pruebas realizadas, se determinó el valor del esfuerzo cortante que produce la falla en los pernos, así como las condiciones de esfuerzo más críticas que se pueden presentar en la unión entre el perno y la placa como lo muestra la figura 5.22.

Para la estimación del desplazamiento permisible (δ_p) en la zona de transición, se emplearán los resultados de las pruebas experimentales realizadas por el II-UNAM (Sánchez R., 2005). Específicamente la curva carga-desplazamiento (figura 5.23) obtenida del ensaye realizado a la conexión entre el perno y la placa base, la cual fue sometida a esfuerzo cortante, con relación al

valor permisible en los pernos ($Z_r=7,312$ kg), el cual gobierna el diseño, de a cuerdo con las normas AASTHO-2002.

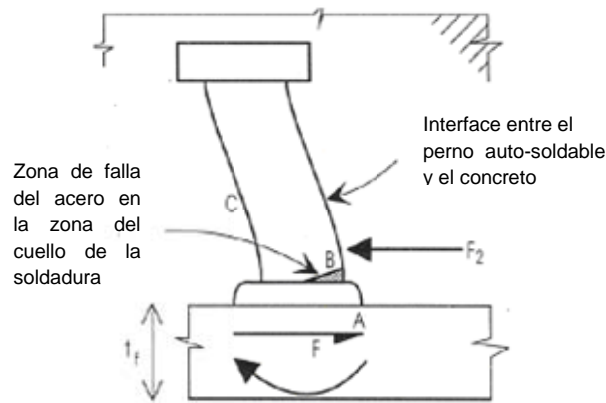


Figura 5.22: Falla del perno por fatiga (Oehlers y Bradford, 1995)

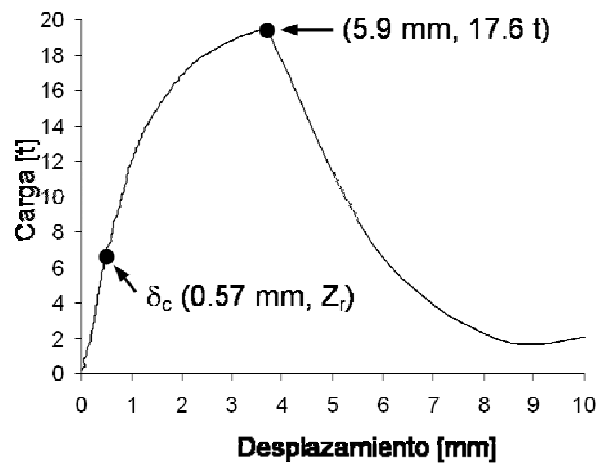


Figura 5.23: Curva carga-desplazamiento de la conexión entre perno y placa base, sometida a esfuerzo cortante (Bennetts, 2008).

Como se puede observar en la figura 5.23, el valor obtenido del desplazamiento permisible es $\delta_p=0.57$ mm, el cual se utilizará para comparar los desplazamientos registrados por el monitoreo en la zona de transición. Al dividir los valores máximos medidos entre el valor permisible se obtiene el porcentaje de desplazamiento alcanzado de a cuerdo con la siguiente expresión:

$$\% \delta_{perm} = \frac{\delta_{m\acute{o}x}}{\delta_p} \times 100 \quad Ec. 5.13$$

Donde:

δ_p : Desplazamiento permitido

$\delta_{m\acute{o}x}$: Desplazamiento máximo medido

Las siguientes tablas muestran el resultado de los cálculos realizados:

Lado		Tuxtla Gutiérrez		San Cristóbal	
Dovela	Punto	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	% δ_{perm}	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	% δ_{perm}
D6	D6L1	-0.142	24.91	-0.224	39.30
	D6L2	-0.196	34.39	-0.095	16.67
	D6L3	-0.141	24.74	-0.084	14.74

Tabla 5.29: Porcentajes de desplazamiento relativo máximo, registrados a las 8:00 hrs.

Lado		Tuxtla Gutiérrez		San Cristóbal	
Dovela	Punto	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	% δ_{perm}	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	% δ_{perm}
D6	D6L1	-0.139	24.39	-0.218	38.25
	D6L2	-0.196	34.39	-0.095	16.67
	D6L3	-0.135	23.68	-0.080	14.04

Tabla 5.30: Porcentajes de desplazamiento relativo máximo, registrados a las 20:00 hrs.

Al observar en las tablas 5.29 y 5.30, los desplazamientos máximos medidos por las cuerdas vibrantes de la dovela seis de la margen derecha, como los obtenidos en su similar de la margen izquierda, se pueden apreciar valores muy similares en cada una de estas. Sin embargo, al comparar ambos extremos, los datos difieren en magnitud, a pesar de la simetría del puente. Esto se debe a que la mitad correspondiente al lado San Cristóbal fue reforzada tras el colapso del resto de la superestructura, por lo cual se pueden observar cantidades de desplazamiento relativo menores a las registradas en el lado Tuxtla Gutiérrez.

Los valores máximos registrados por el sensor D6L1 del lado San Cristóbal se descartan, ya que resultan ser excesivos comparados con los datos aportados por los sensores D6L2 y D6L3. Al revisar la información obtenida con este dispositivo y con el resto de las cuerdas vibrantes no se encontraron indicios que pudieran conducir a una posible rectificación de las mediciones, con excepción del sensor D6L3 del lado San Cristóbal, el cual, se dañó y sólo se consideraron los datos que registró a partir del mes de diciembre de 2008. Las gráficas mostradas a continuación muestran las mediciones tomadas a las 8:00 hrs.

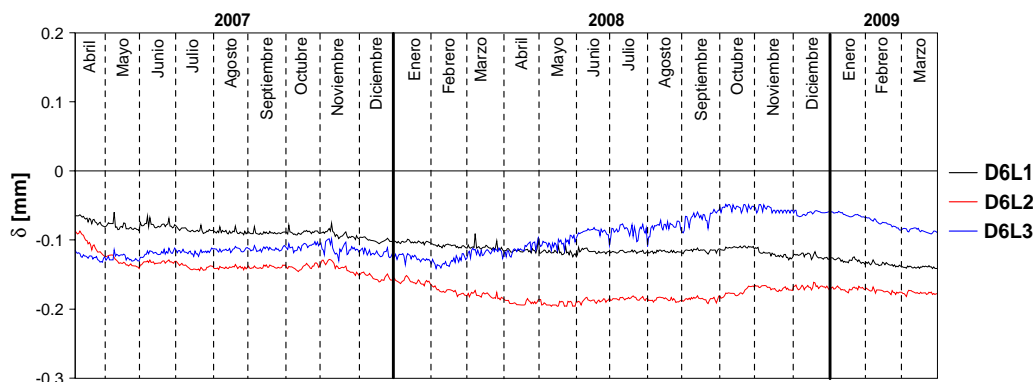


Figura 5.24: Desplazamiento relativo medido en la zona de transición, lado Tuxtla Gutiérrez

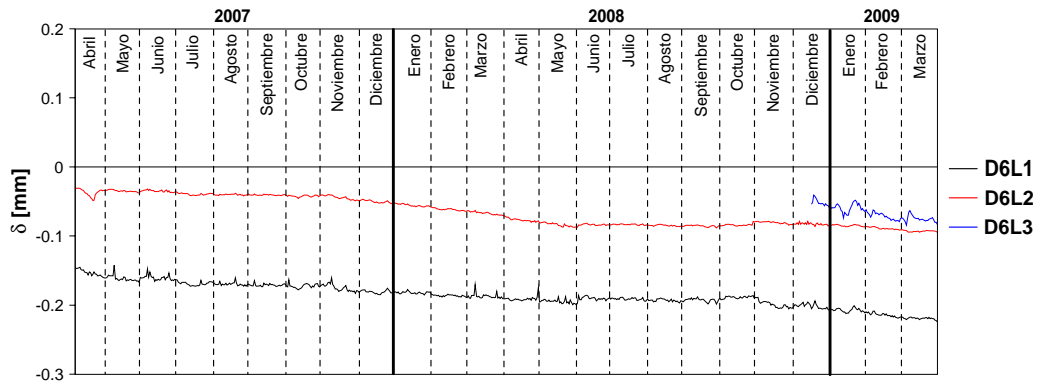


Figura 5.25: Desplazamiento relativo medido en la zona de transición, lado San Cristóbal

Finalmente, dada la importancia de la zona de transición en el desempeño de la estructura, se puede pensar conservadoramente y mencionar que el desplazamiento máximo medido durante el monitoreo, se encuentra en un porcentaje cercano al 35% del valor permitido en el lado Tuxtla Gutiérrez, dada la incertidumbre de las mediciones. Sin embargo, lo más probable es que este valor se encuentre alrededor del 24%, mientras que en el lado San Cristóbal esta cantidad se aproxima al 17%. Al observar las gráficas se puede apreciar que los desplazamientos tienden a incrementarse linealmente en valores aproximados a 0.05 mm en algunos de los registros obtenidos durante los dos años estudiados, por lo que podría suponerse que los incrementos de desplazamiento se encuentren actualmente en valores cercanos al 25% y el 40% del valor permitido, siendo el mayor porcentaje para la margen que da hacia Tuxtla Gutiérrez. Por lo tanto, se puede afirmar que la zona de transición se encuentra en óptimas condiciones y que la integridad estructural del puente no se encuentra comprometida en este aspecto.

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES FINALES.

El monitoreo estructural es un proceso encaminado a brindar información relativa al estado y comportamiento de una estructura. Sin embargo, se conoce muy poco sobre la relevancia de esta actividad a pesar de la difusión que tiene en publicaciones de revistas y en artículos presentados en congresos de índole internacional.

Las actividades en orientadas al monitoreo de estructural son cada vez más comunes en la vida profesional. Principalmente, cuando estas se relacionan con la supervisión y revisión de estructuras. Para poder realizarlas, se requiere de la intervención de una gran cantidad de personas. Desde el personal encargado de la instalación y operación del equipo hasta los responsables de administrar la información e interpretar los resultados obtenidos durante el monitoreo. Por lo tanto, se puede decir que ésta, es una labor interdisciplinaria. Sin embargo, hay ocasiones en las que los mismos ingenieros civiles son quienes debemos llevar a cabo todas estas acciones. El uso de las nuevas tecnologías ha facilitado tanto las cosas que inclusive, cada vez se requiere de la participación de menos personas. Sobre todo, cuando se trata de realizar pruebas con instrumentación temporal.

La experiencia adquirida en el manejo de los dispositivos empleados es fundamental para tener éxito y alcanzar las metas propuestas. Esta no es una tarea fácil, ya que todos los aparatos suelen tener problemas en su funcionamiento mientras son utilizados. Es una situación que no se puede evitar, por lo cual, es recomendable tener una idea del principio de operación de los aparatos y conocer algunos conceptos provenientes de otras áreas del conocimiento tales como la electrónica y la electricidad, en las cuales, la relación entre el voltaje, la corriente y la resistencia eléctrica es fundamental. Este es uno de los aspectos en los cuales se enfocó el presente trabajo de tesis, por lo tanto, se estudiaron algunos dispositivos empleados habitualmente en la instrumentación de estructuras en nuestro país, ya que su principio de funcionamiento está presente en la mayoría de los aparatos que se utilizan para otras aplicaciones.

La implementación del sistema de monitoreo del puente San Cristóbal se ha basado en el aprovechamiento de los resultados observados, en relación a la instrumentación de puentes con sensores de cuerda vibrante en diversas partes del mundo. Mantener el sistema en funcionamiento no es una labor sencilla, dadas las limitaciones económicas, la lejanía del lugar y las resientes experiencias adquiridas en el manejo de estos dispositivos. Es por ello que se presentan las principales actividades realizadas, a fin de conocer más acerca de los aspectos que involucran la vigilancia de una estructura real y promover el mejor aprovechamiento de la información recabada durante el periodo en que estuvo en funcionamiento el sistema de captura. Por lo tanto, se realizan los siguientes comentarios:

- El método empleado en la corrección de la información obtenida del sistema de monitoreo es un planteamiento empírico. En la práctica es muy común realizar hipótesis sobre el comportamiento de una estructura, ya que esto servirá de referencia a la hora de revisar y validar los datos obtenidos.

- En la sección 5.2.3.3 se presenta la relación de las lecturas corregidas y los sensores involucrados (tablas 5.11 a 5.16). Lo cual, es de gran ayuda para estimar el rendimiento del sistema monitoreo en cuanto a la calidad de los datos registrados. Sobre todo, para identificar los dispositivos que presentaron un comportamiento inadecuado, dada la necesidad de inspeccionarlos físicamente y optimizar el tiempo en las actividades de rehabilitación y mantenimiento de los mismos.
- De los dos horarios de captura analizados, se determinó que durante las 20:00 hrs. presentaron menos errores en las mediciones. Esto indica que el sistema es inestable, debido a problemas de impedancia que se pueden presentar tanto en las cuerdas vibrantes como en el sistema de captura. Para descartar esta posibilidad, en el apéndice I se expone la metodología a seguir para comprobar el correcto funcionamiento de los instrumentos.
- Al evaluar el rendimiento del sistema de monitoreo, se estimó que alrededor del 40% de los dispositivos de cuerda vibrante requieren correcciones en sus mediciones. Lo cual, resulta poco práctico, ya que la mayoría de las correcciones deben aplicarse en ambos horarios de captura. El trabajo en este aspecto se realiza al doble y es muy demandante, ya que se carecen de medios automatizados que ayuden a realizar las correcciones. Ante tal situación lo más recomendable es revisar y validar únicamente la información capturada hora por hora en lugar de hacerlo en horarios separados.

En cuanto al análisis de los datos obtenidos con las cuerdas vibrantes se comentan los siguientes resultados:

- Los niveles de esfuerzo que actúan en la superestructura del puente San Cristóbal se encuentran en valores inferiores al valor permitido. Las dovelas más esforzadas son las dovelas 8 y 11 de ambos márgenes y la dovela central, presentando valores de esfuerzo cercanos al 60% del valor permitido. Mientras que el resto presenta esfuerzos que oscilan entre el 10% y 50%. Por lo cual se puede afirmar que la estructura trabaja dentro del rango elástico del acero y que el comportamiento estructural del puente es el adecuado.
- El desplazamiento máximo relativo registrado tanto a las 8:00 hrs como a las 20:00 hrs en la zona de transición se estableció en porcentajes que se encuentran alrededor del 17% en el lado San Cristóbal y el 24% en el lado Tuxtla Gutiérrez. Al observar algunos registros en las gráficas se puede apreciar que los desplazamientos tienden a incrementarse en valores aproximados a 0.05 mm en algunos registros, por lo cual puede suponerse que, los incrementos de desplazamiento se encuentran actualmente alrededor del 25% y 40% del valor permitido, siendo el mayor porcentaje para la margen correspondiente al lado Tuxtla Gutiérrez. Es por ello que se tienen los elementos suficientes para afirmar que la integridad estructural del puente no se encuentra comprometida en este aspecto.

Lo anterior sólo representa una muestra de la tendencia del comportamiento estructural del puente. Sin embargo, se espera rehabilitar el sistema de monitoreo para continuar obteniendo datos relevantes sobre el comportamiento de esta estructura. Que sin duda trascenderán en la elaboración de futuros proyectos de infraestructura y monitoreo estructural.

APÉNDICE A. Incrementos de esfuerzo medidos a las 8:00 hrs.

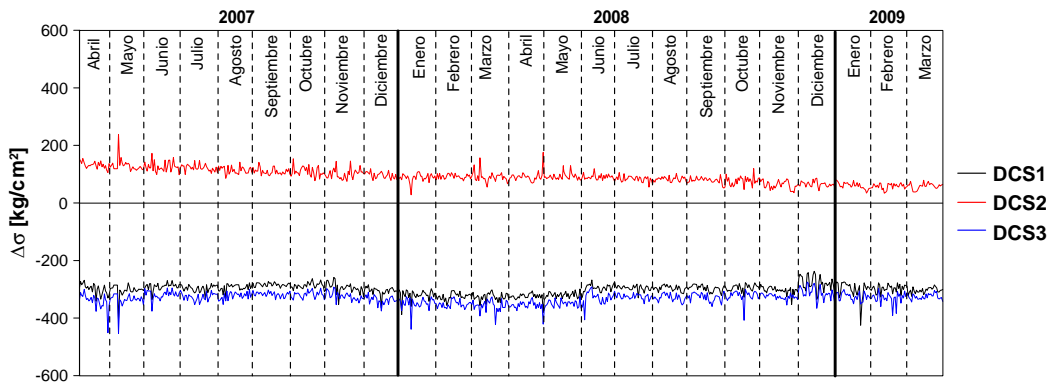


Figura A.1: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela central

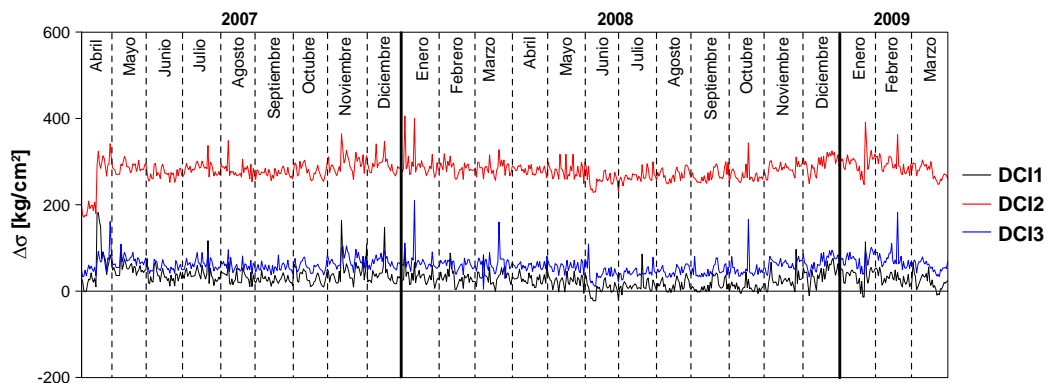


Figura A.2: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela central

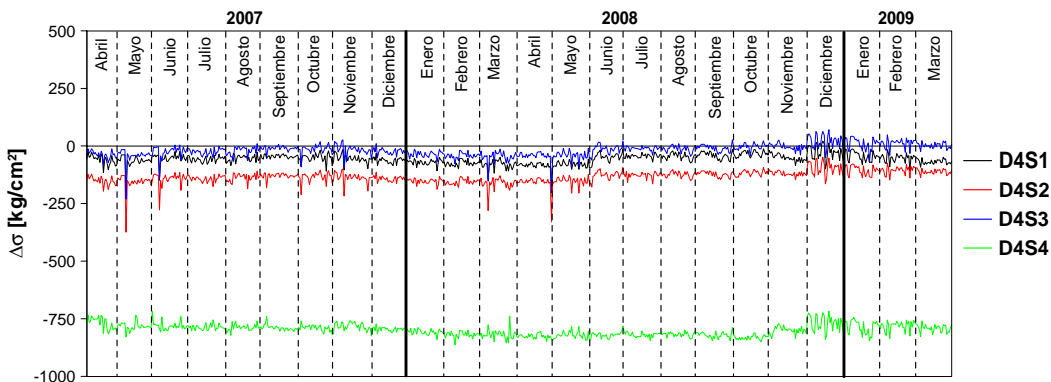


Figura A.3: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

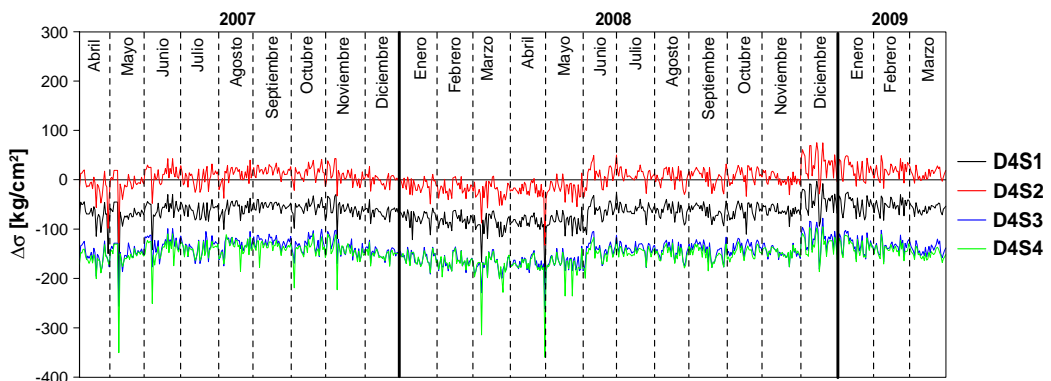


Figura A.4: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D4, lado San Cristóbal

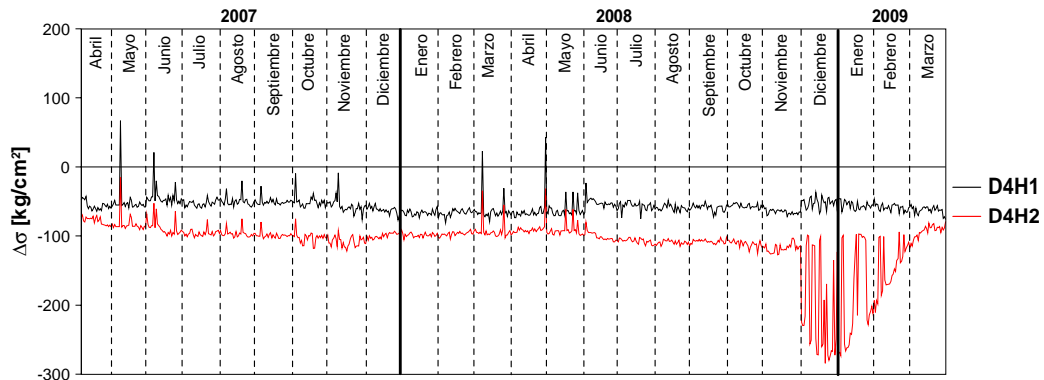


Figura A.5: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

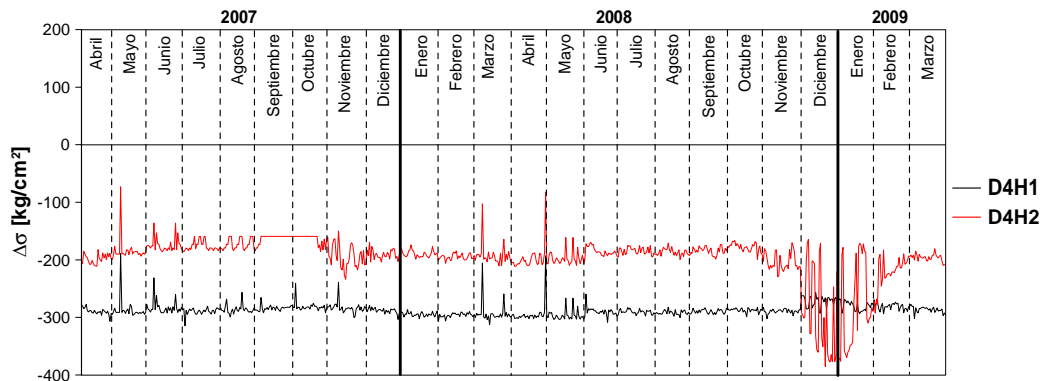


Figura A.6: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D4, lado San Cristóbal

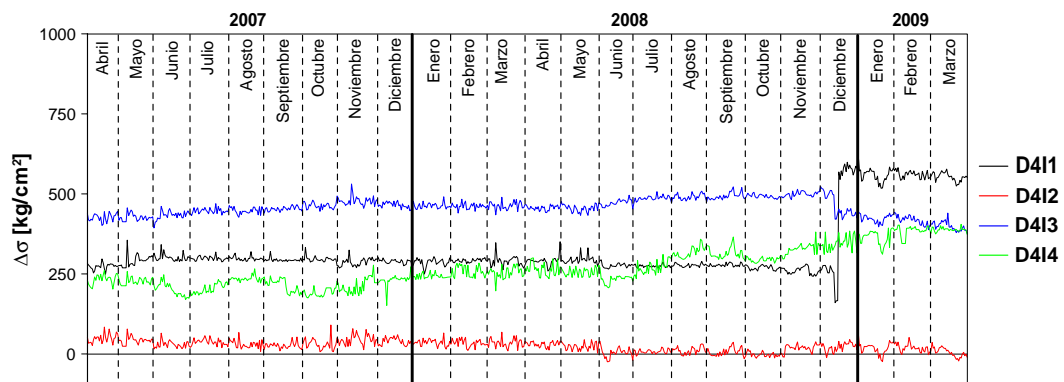


Figura A.7: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

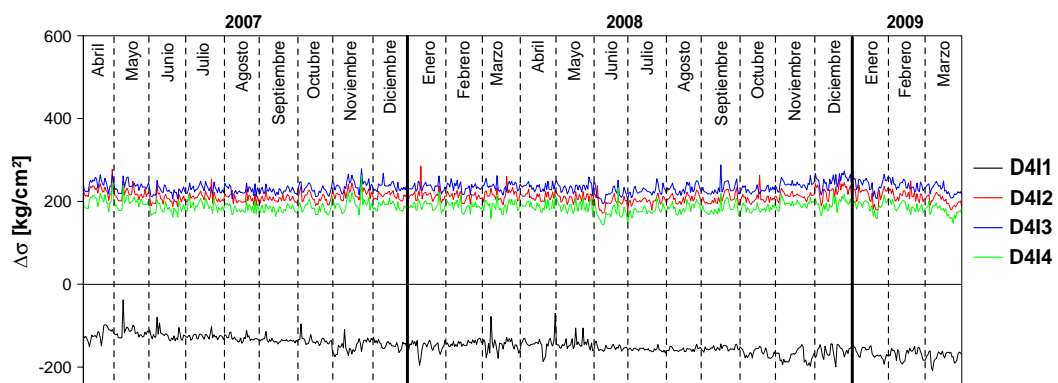


Figura A.8: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D4, lado San Cristóbal

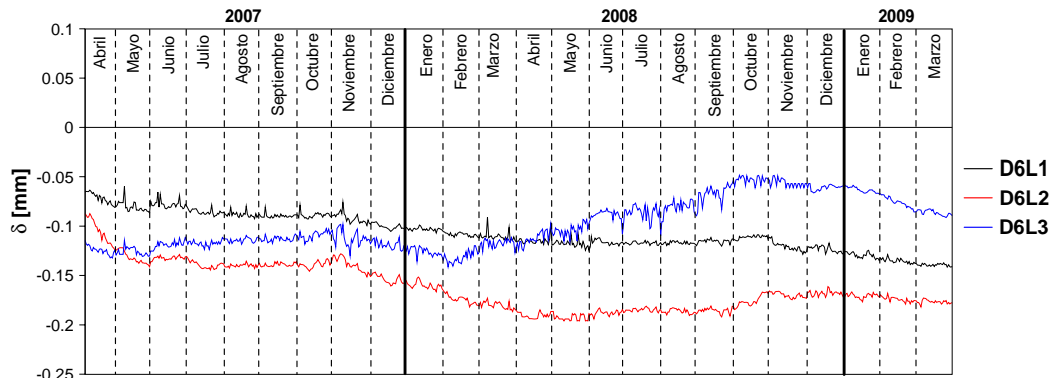


Figura A.9: Desplazamiento relativo, zona de transición, lado Tuxtla Gutiérrez

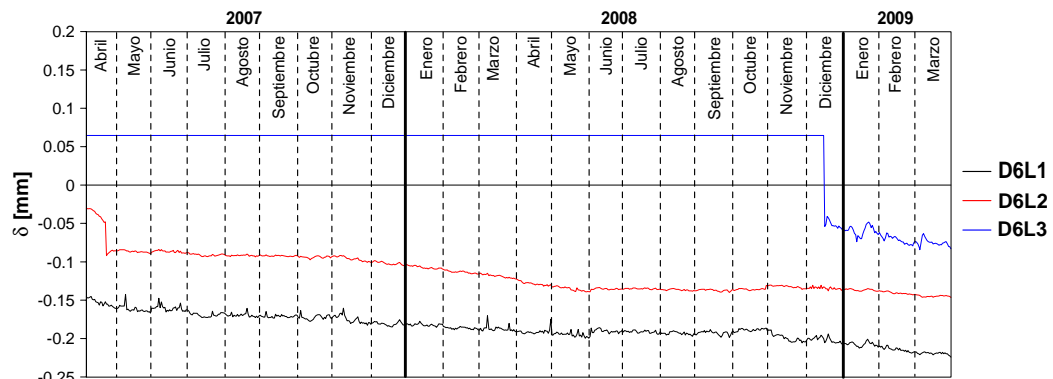


Figura A.10: Desplazamiento relativo, zona de transición, lado San Cristóbal

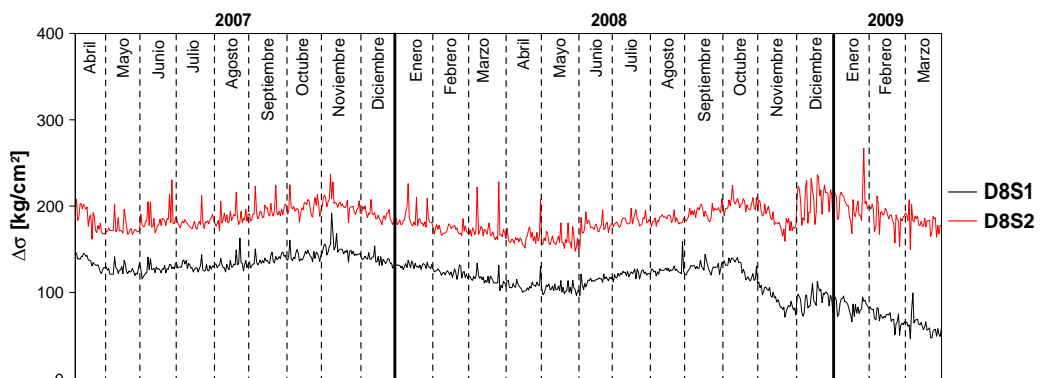


Figura A.11: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

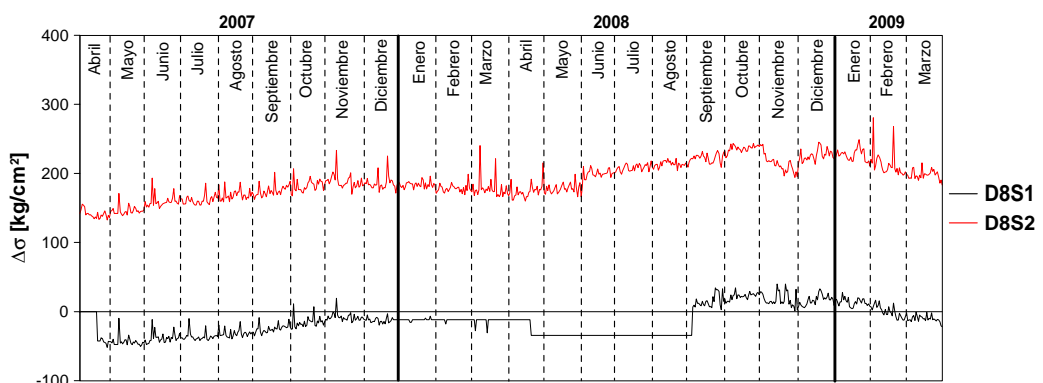


Figura A.12: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

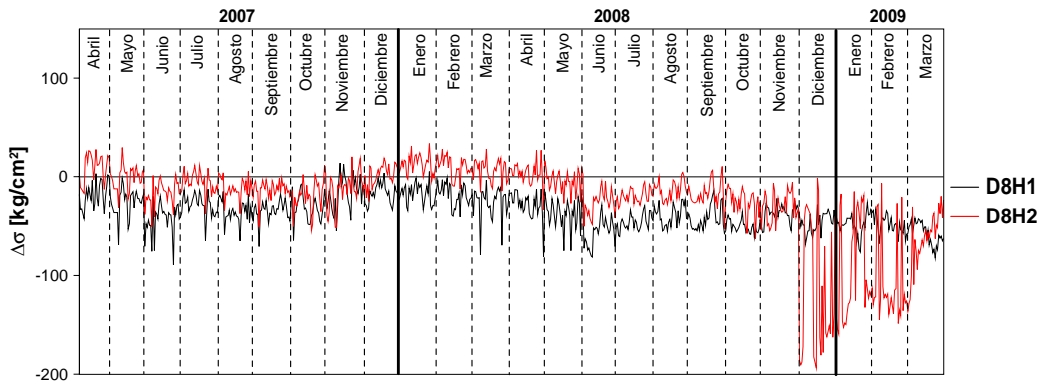


Figura A.13: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

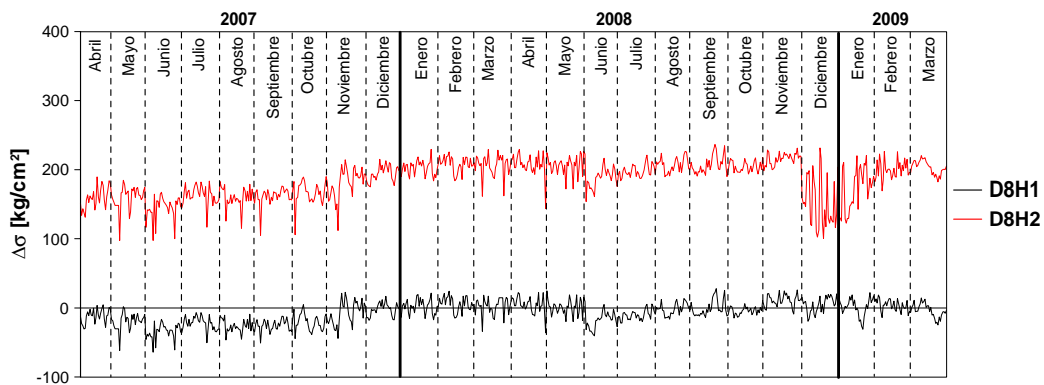


Figura A.14 Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

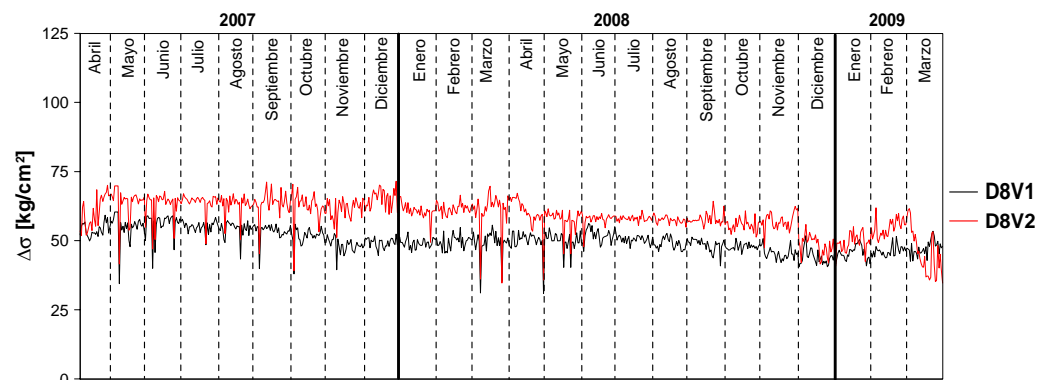


Figura A.15: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

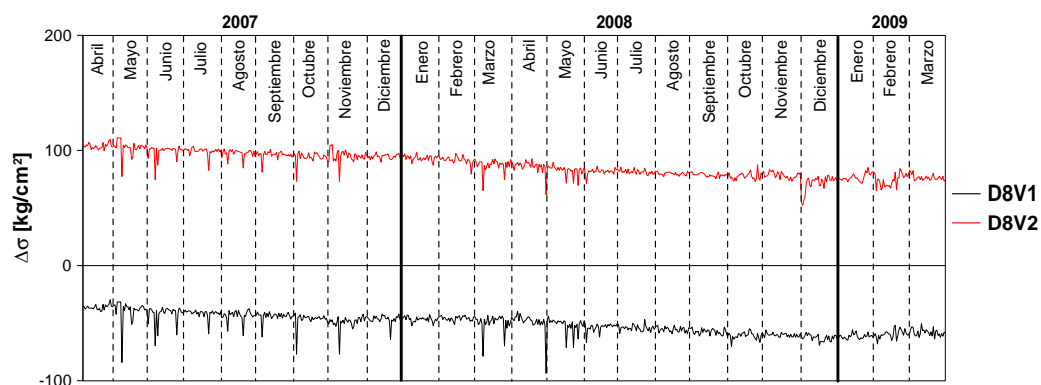


Figura A.16: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

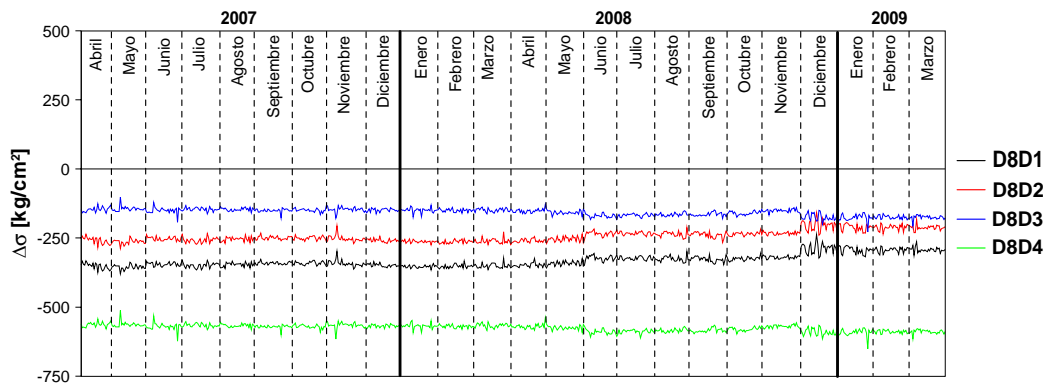


Figura A.17: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

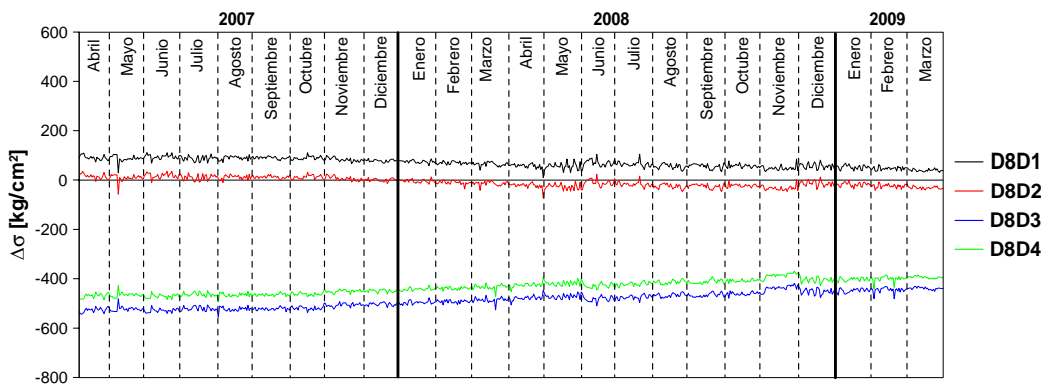


Figura A.18: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

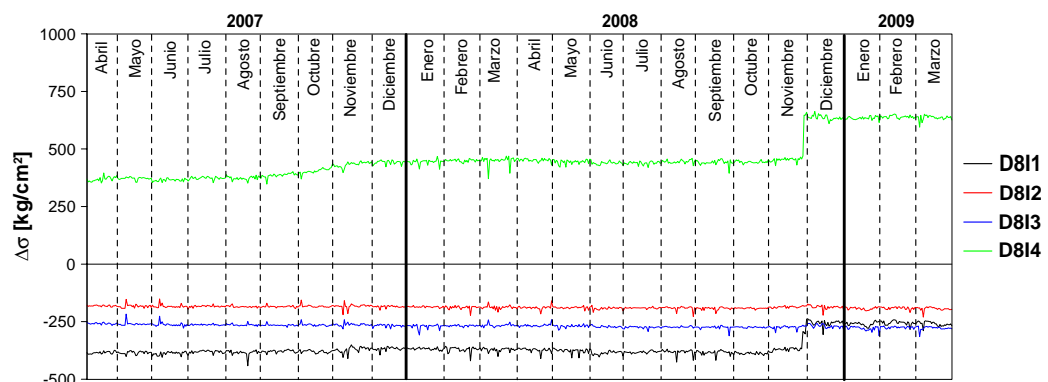


Figura A.19: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

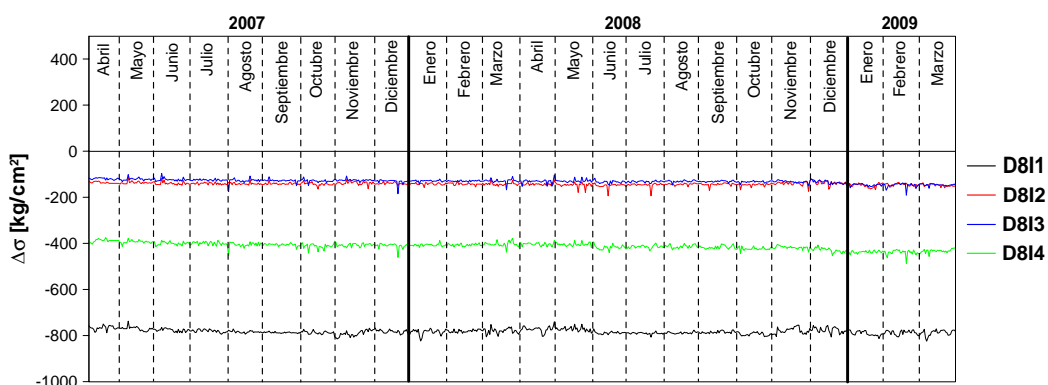


Figura A.20: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

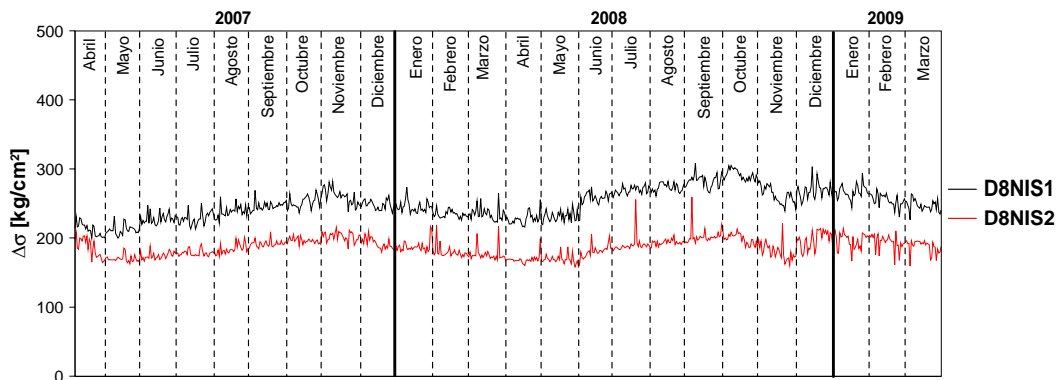


Figura A.21: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

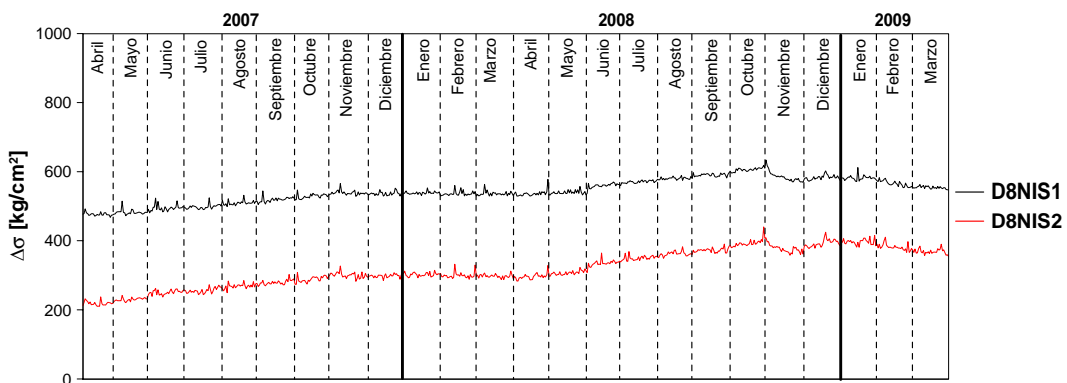


Figura A.22: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

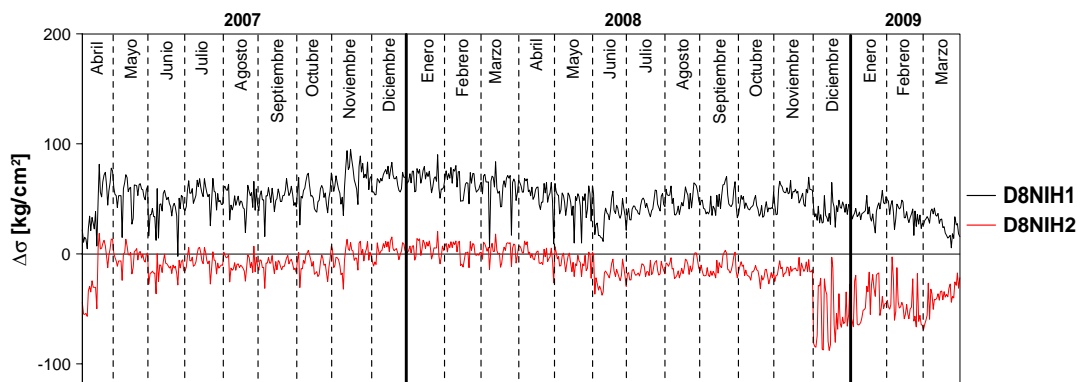


Figura A.23: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

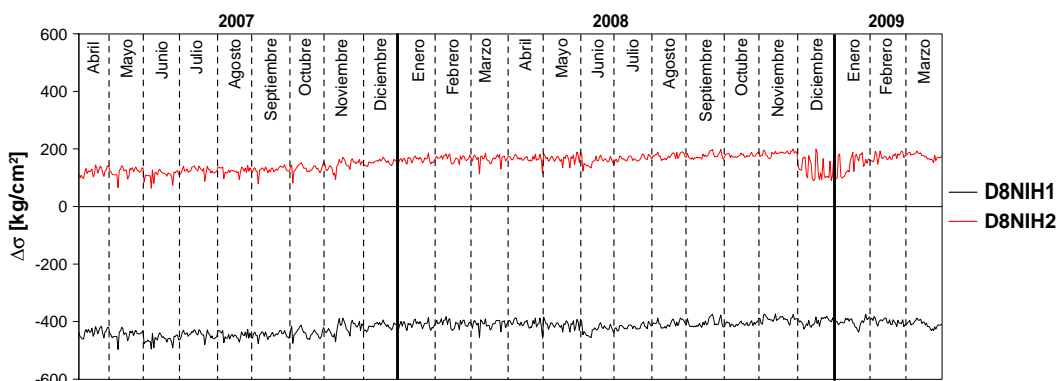


Figura A.24: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

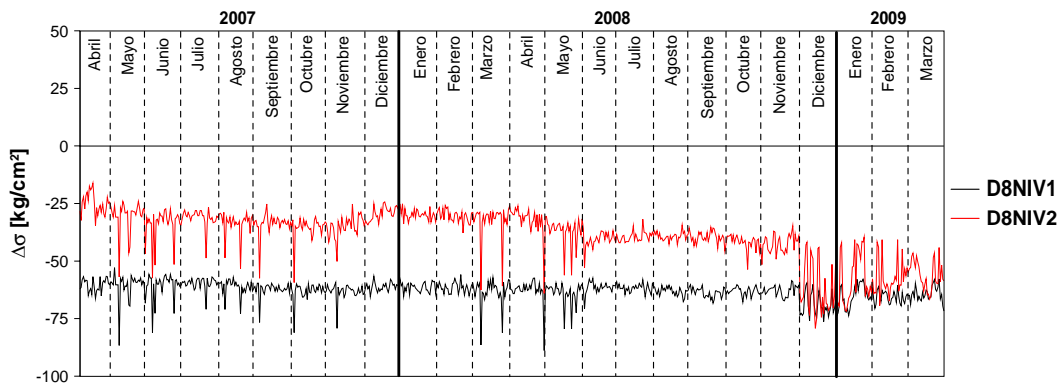


Figura A.25: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

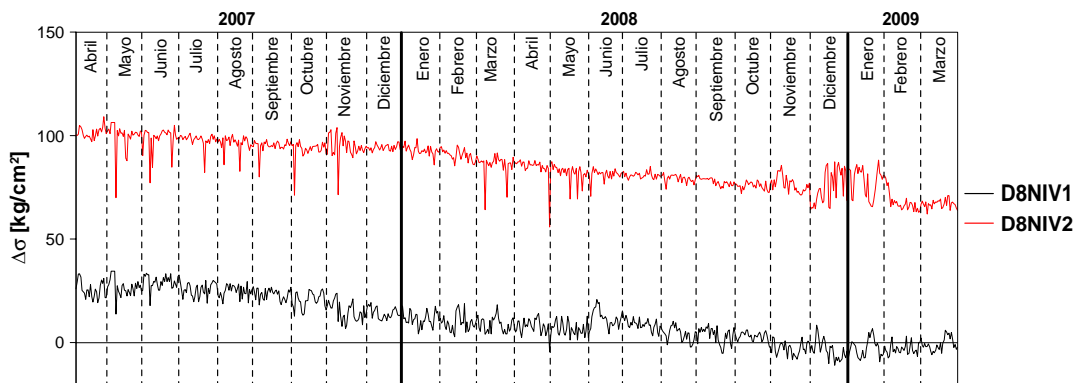


Figura A.26: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

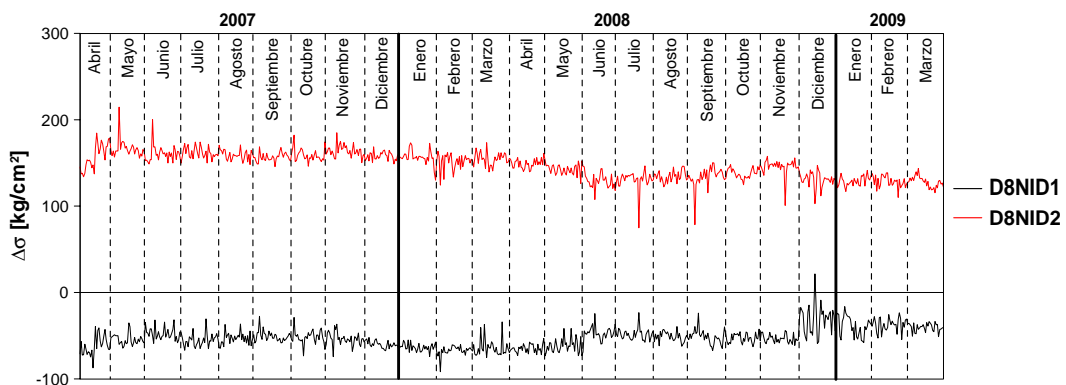


Figura A.27: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

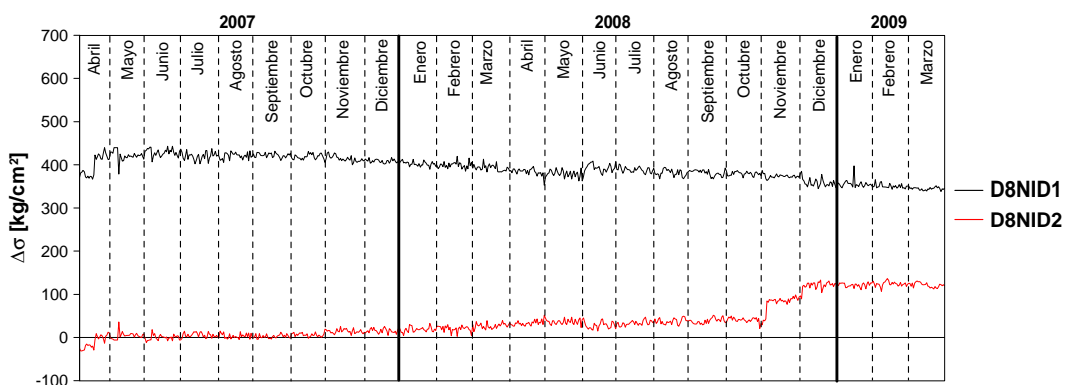


Figura A.28: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

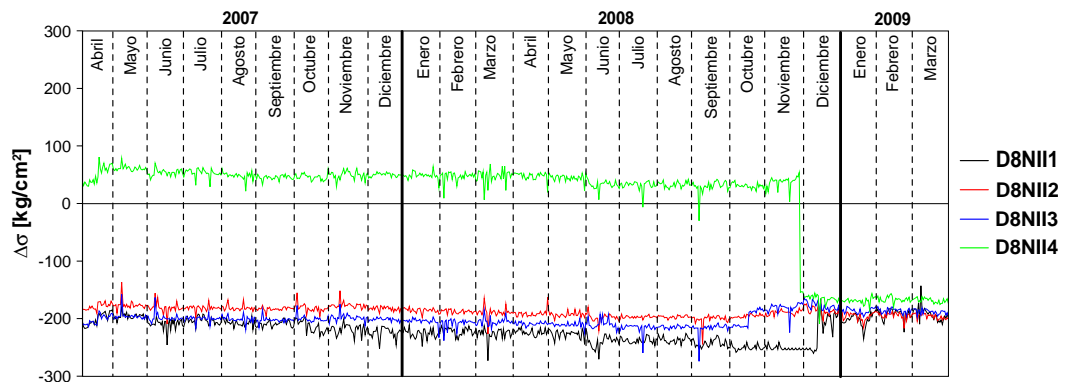


Figura A.29: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

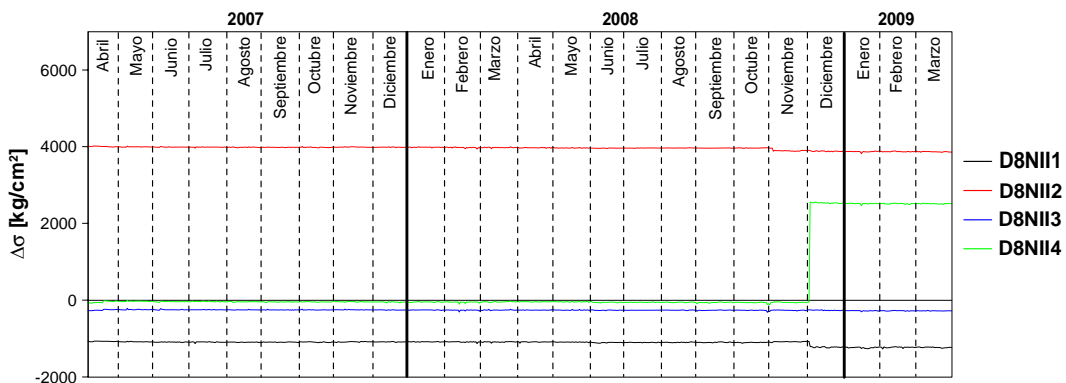


Figura A.30: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

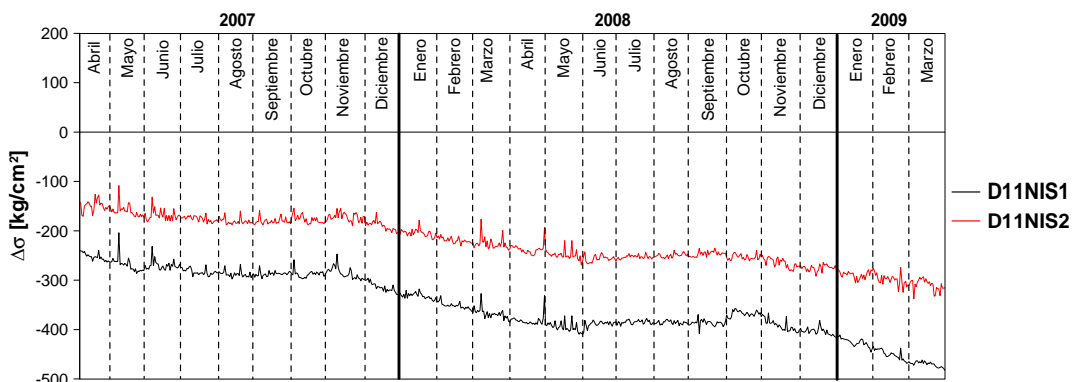


Figura A.31: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

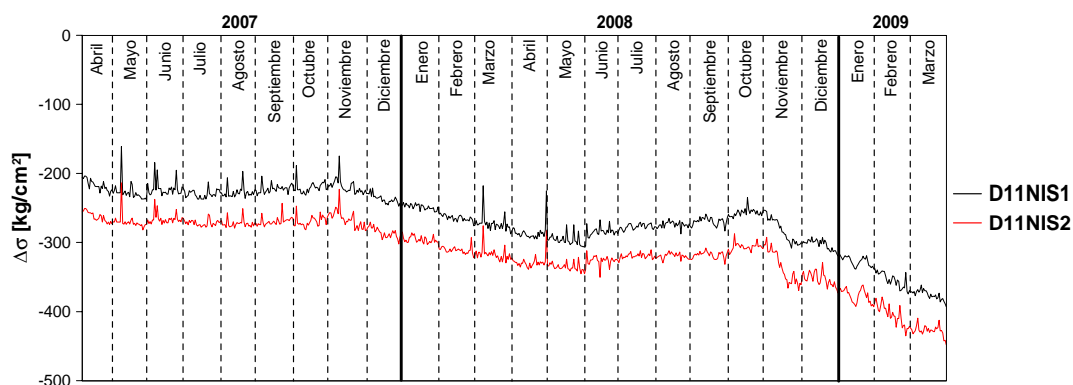


Figura A.32: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D11, lado San Cristóbal

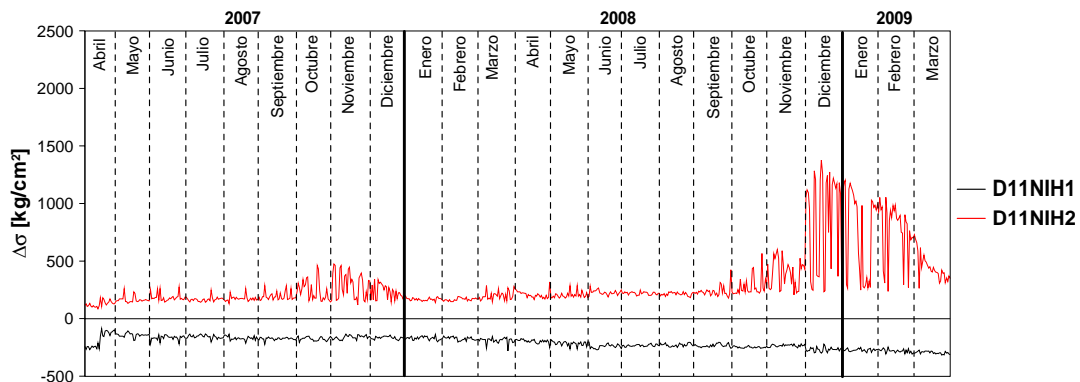


Figura A.33: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

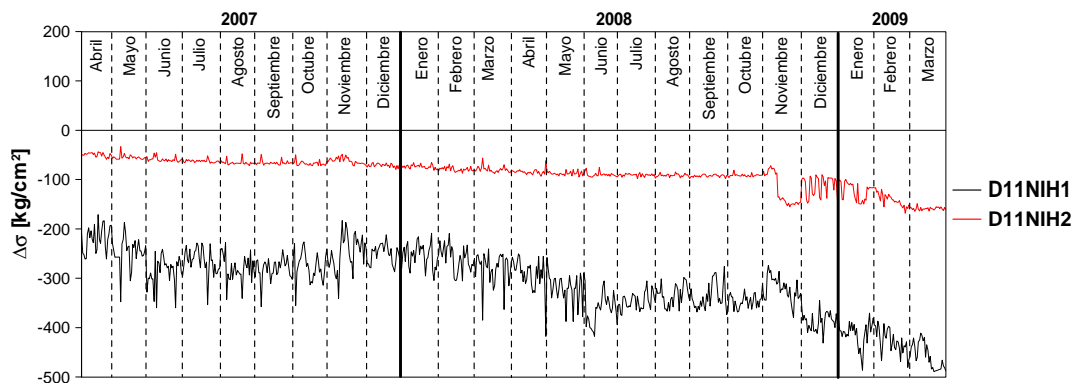


Figura A.34: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D11, lado San Cristóbal

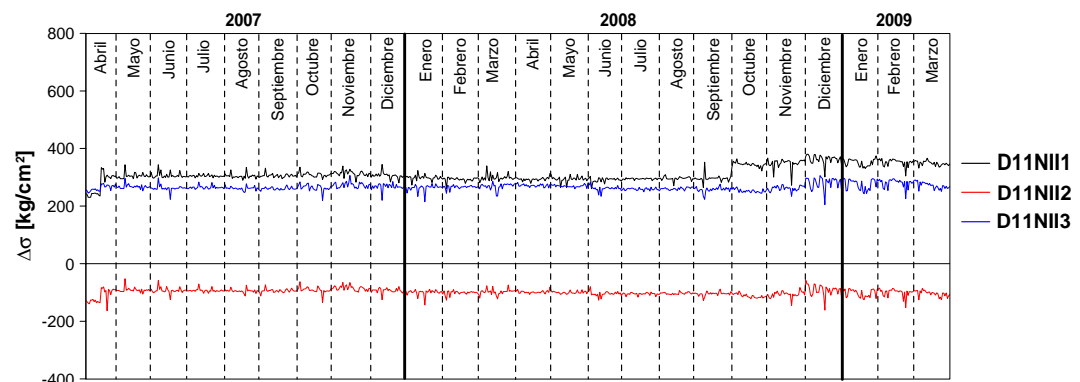


Figura A.35: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

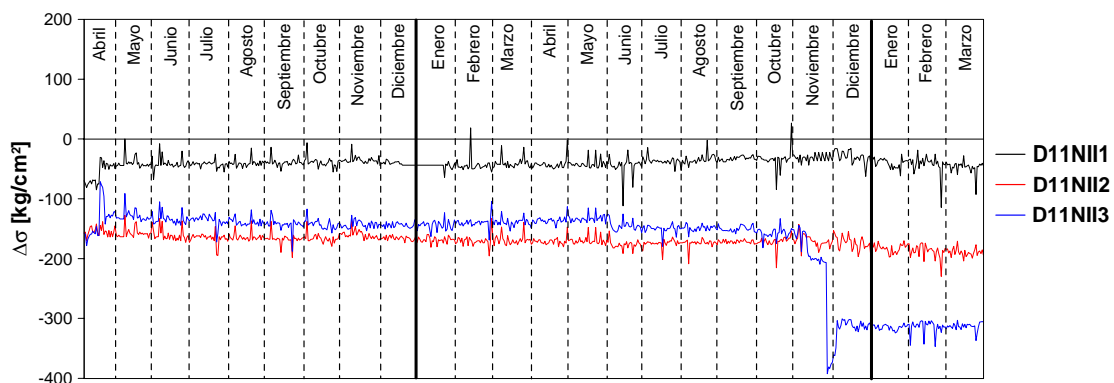


Figura A.36: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D11, lado San Cristóbal

APÉNDICE B. Incrementos de esfuerzo medidos a las 20:00 hrs.

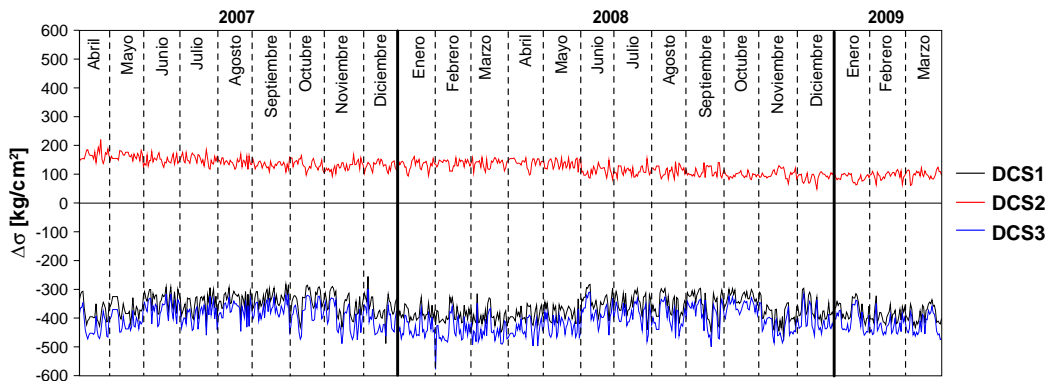


Figura B.1: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela central

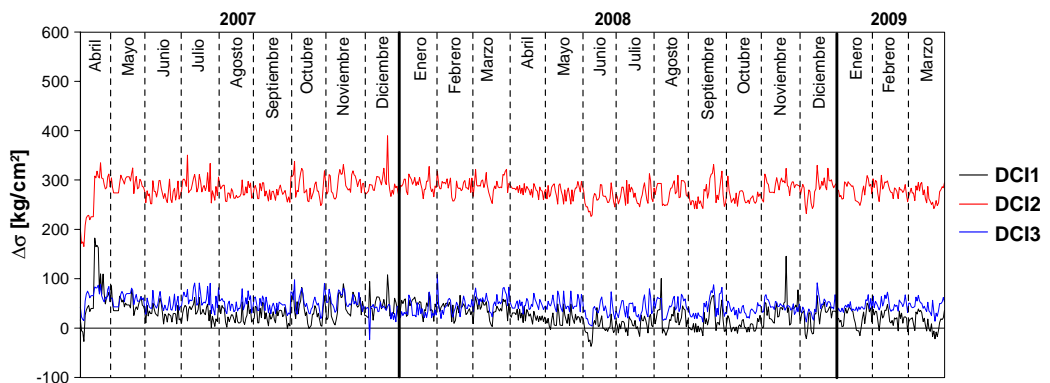


Figura B.2: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela central

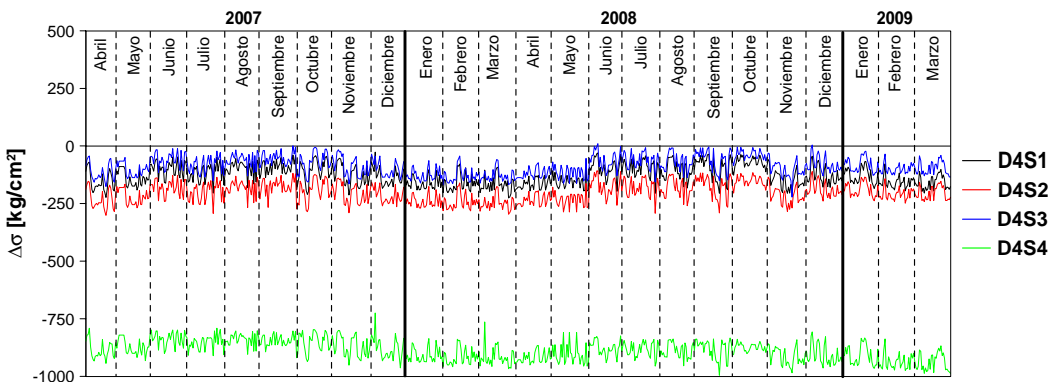


Figura B.3: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

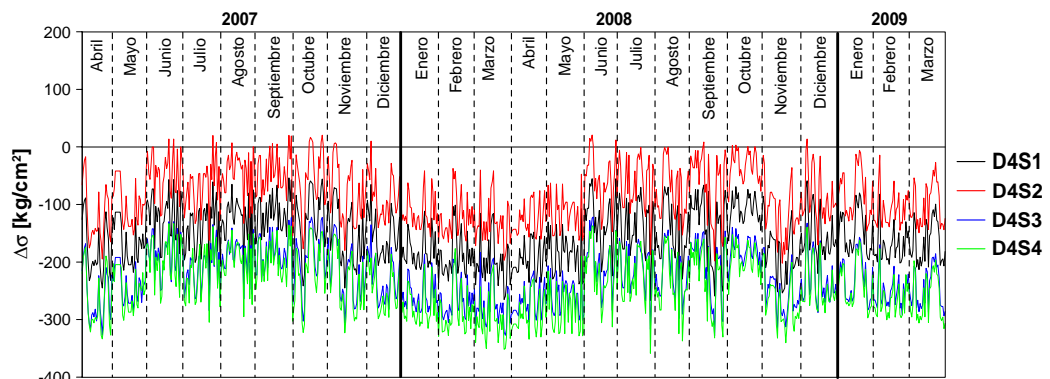


Figura B.4: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D4, lado San Cristóbal

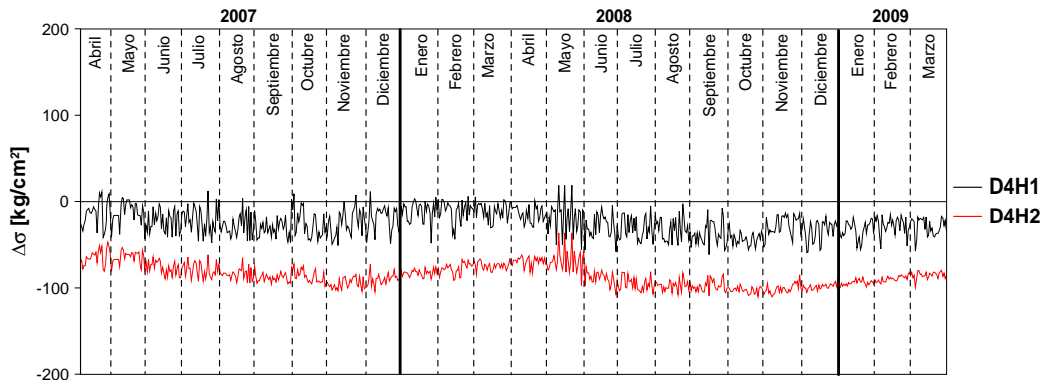


Figura B.5: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

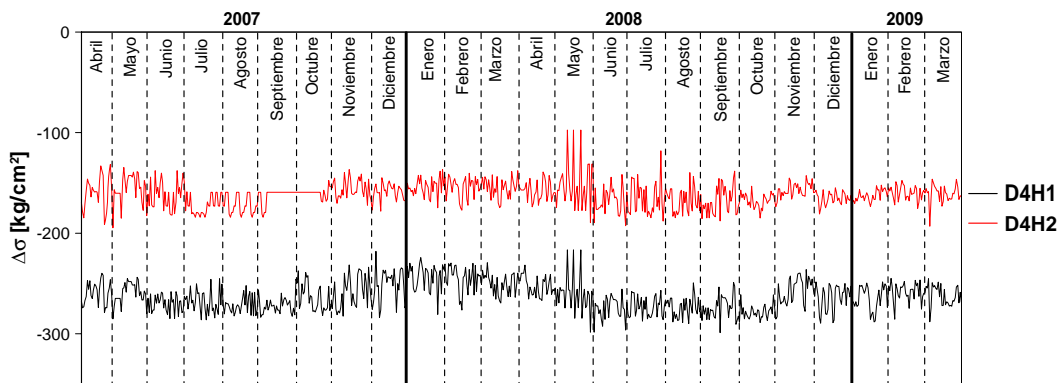


Figura B.6: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D4, lado San Cristóbal

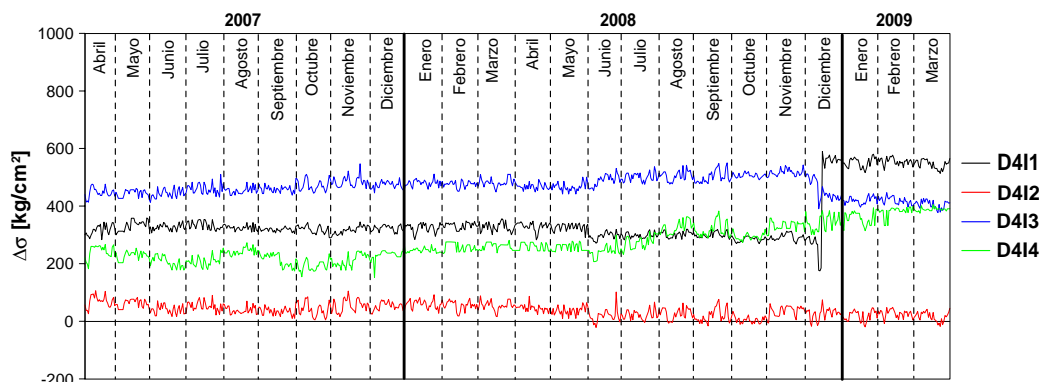


Figura B.7: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

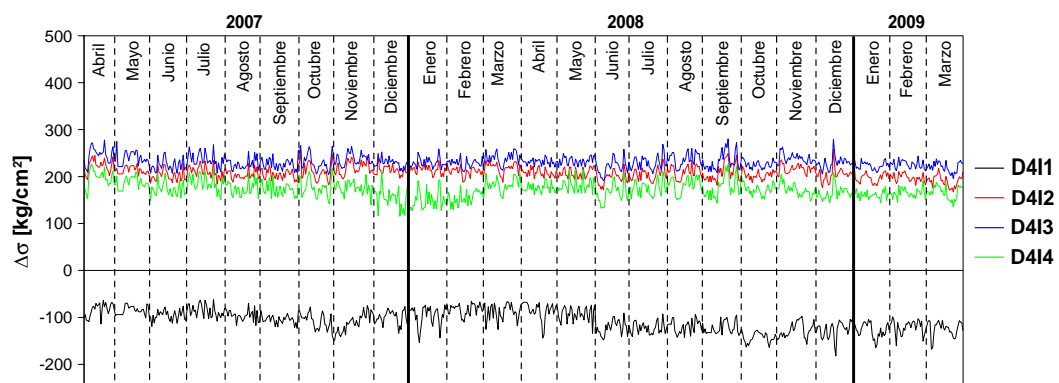


Figura B.8: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D4, lado San Cristóbal

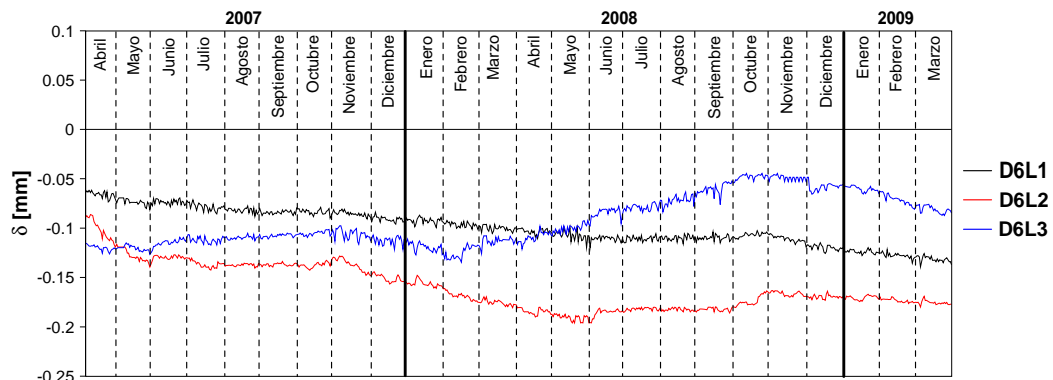


Figura B.9: Desplazamiento relativo, zona de transición, lado Tuxtla Gutiérrez

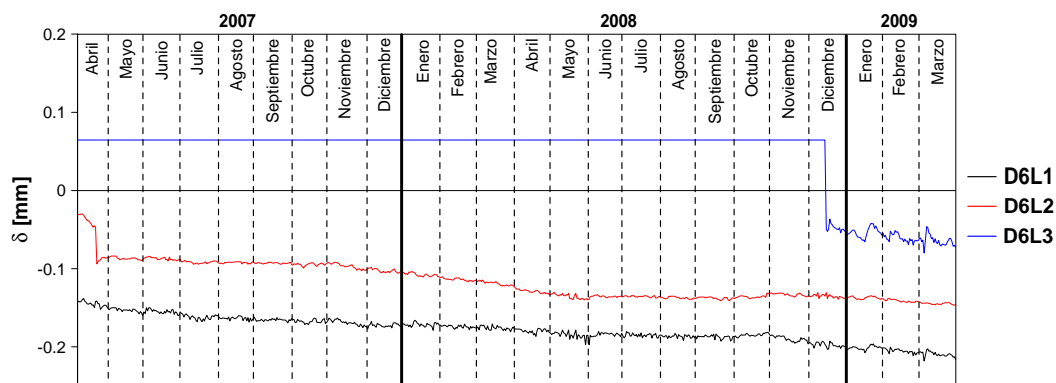


Figura B.10: Desplazamiento relativo, zona de transición, lado San Cristóbal

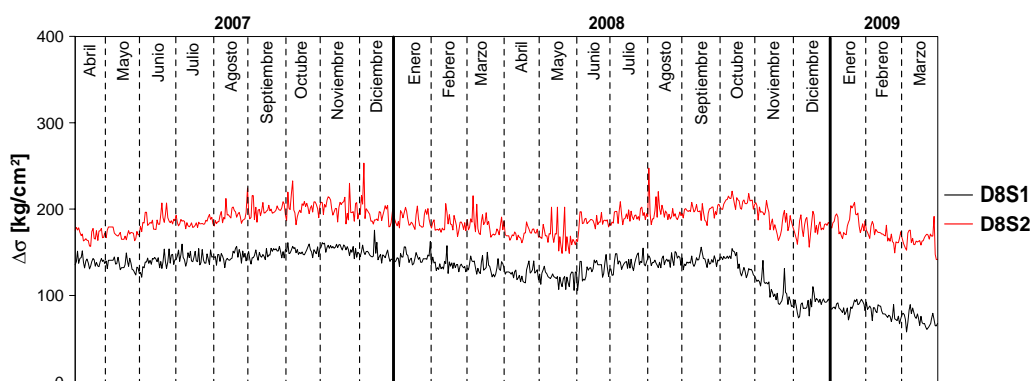


Figura B.11: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

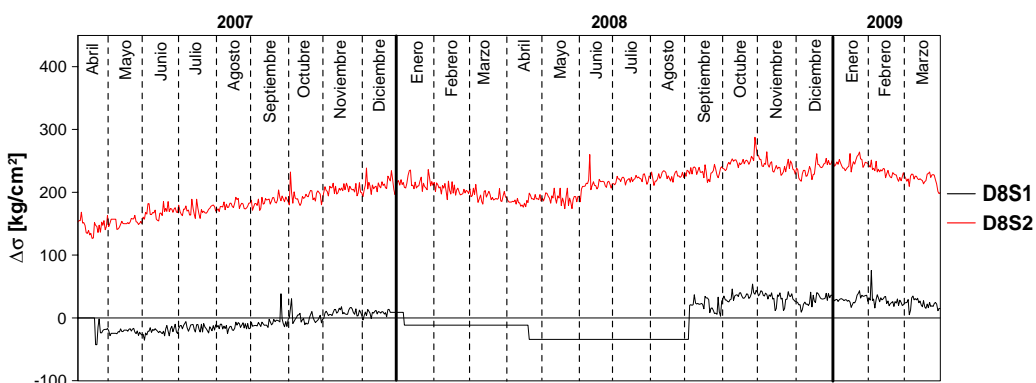


Figura B.12: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

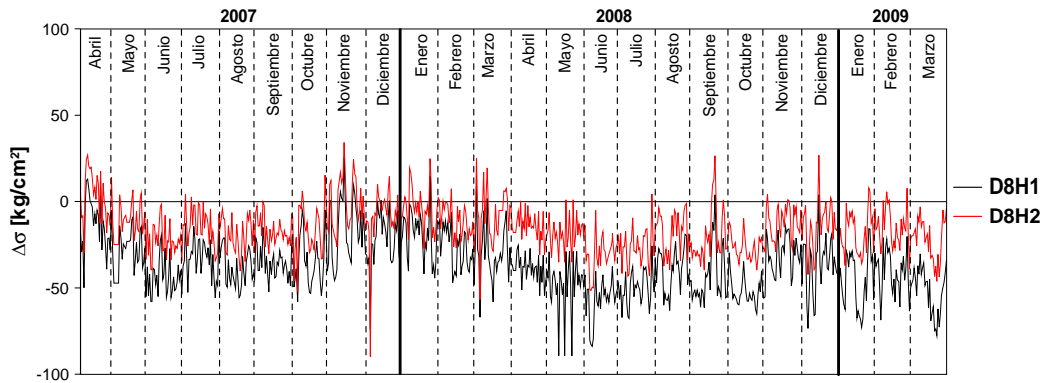


Figura B.13: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

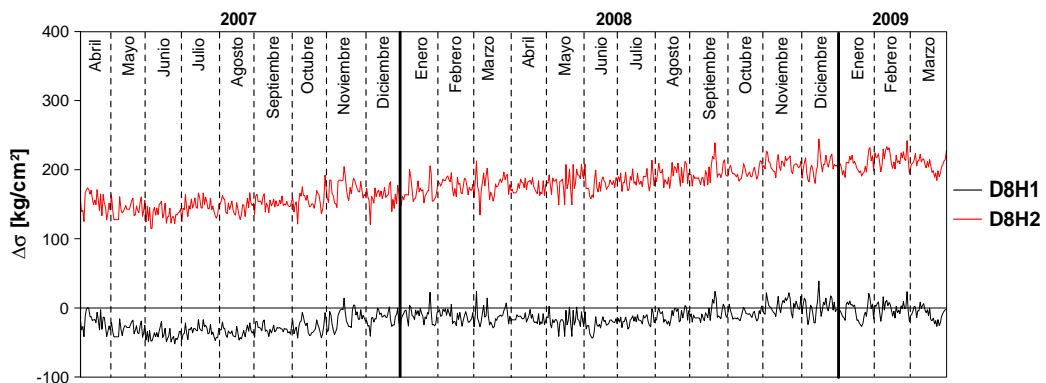


Figura B.14 Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

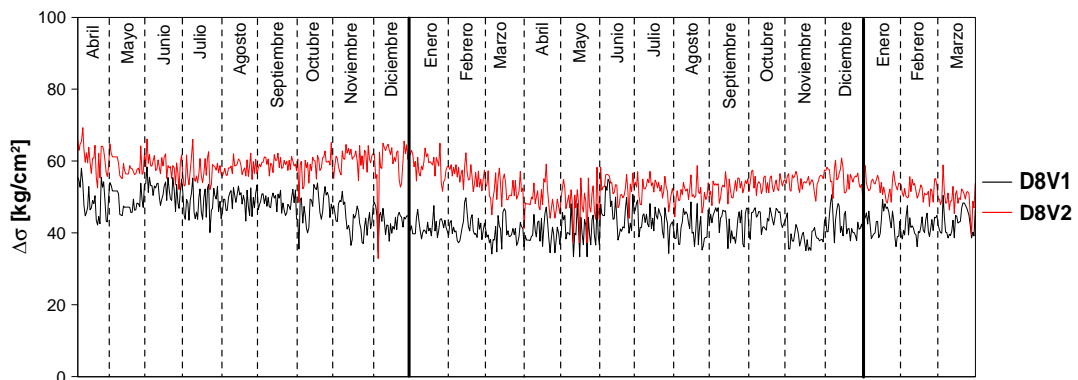


Figura B.15: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

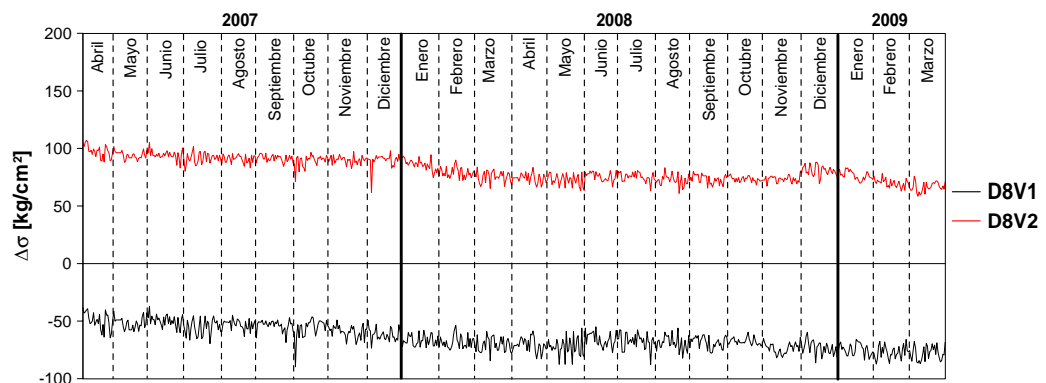


Figura B.16: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

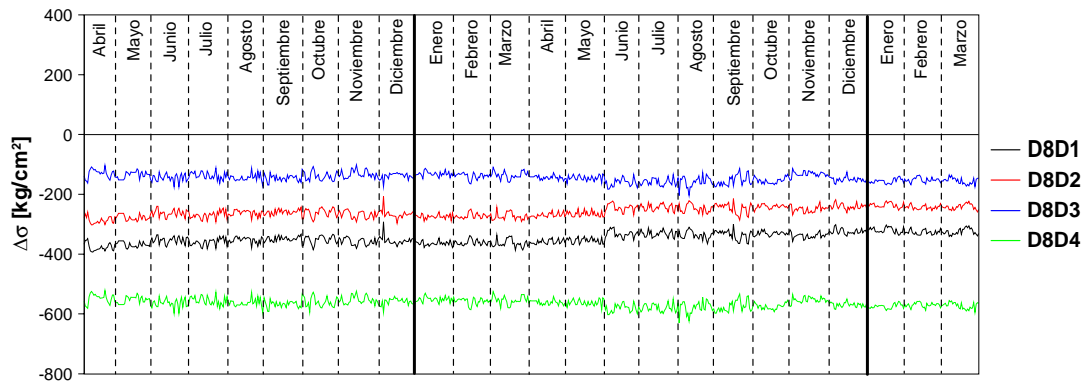


Figura B.17: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

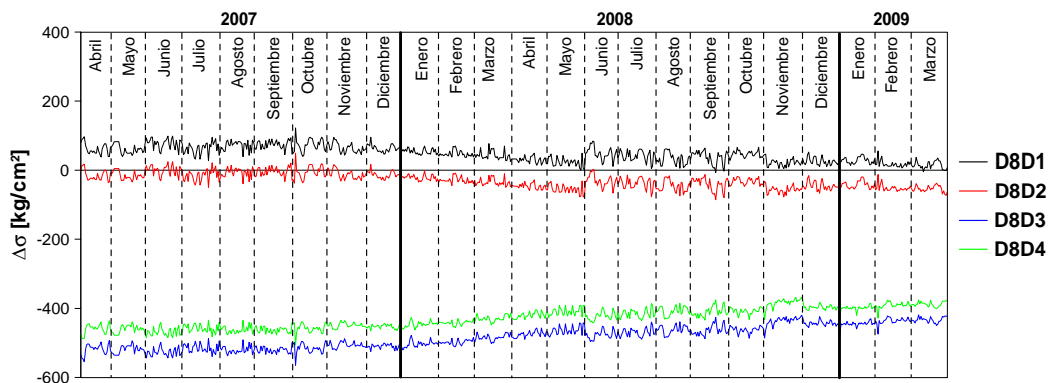


Figura B.18: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

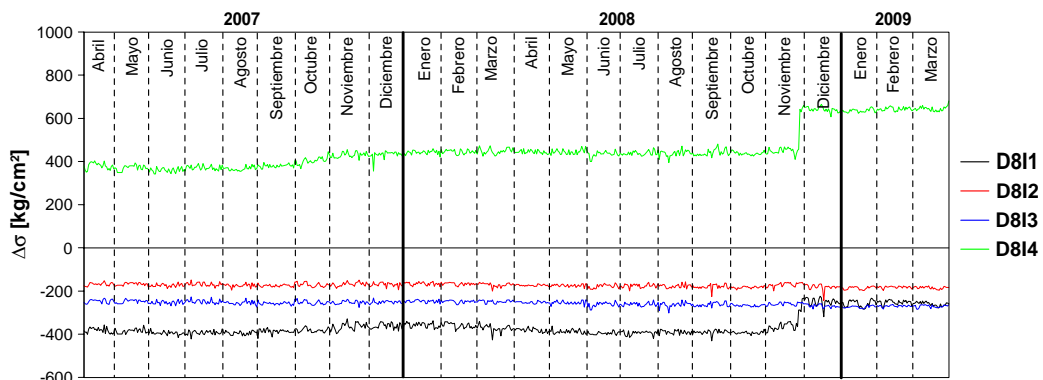


Figura B.19: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

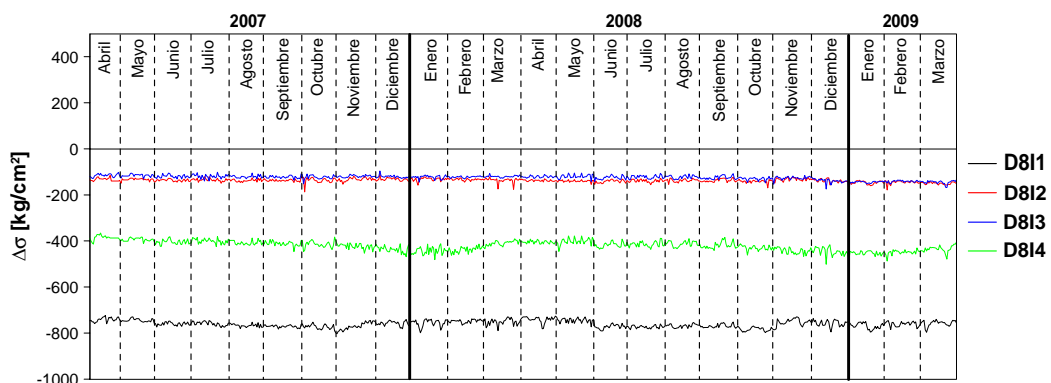


Figura B.20: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

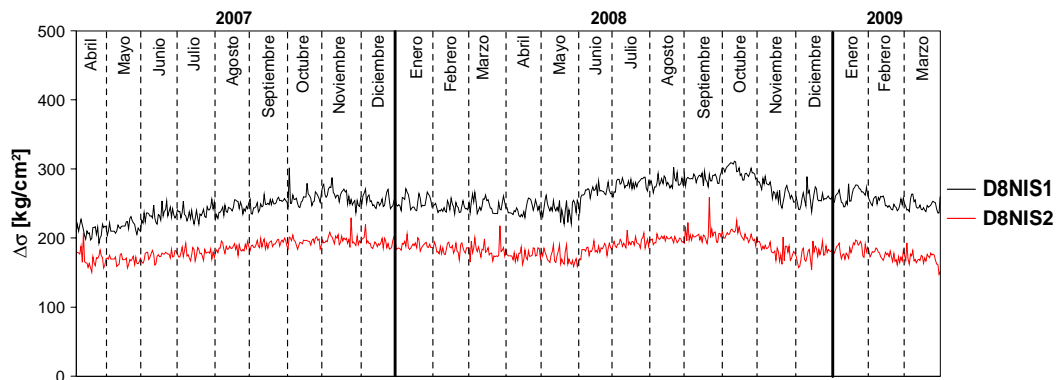


Figura B.21: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

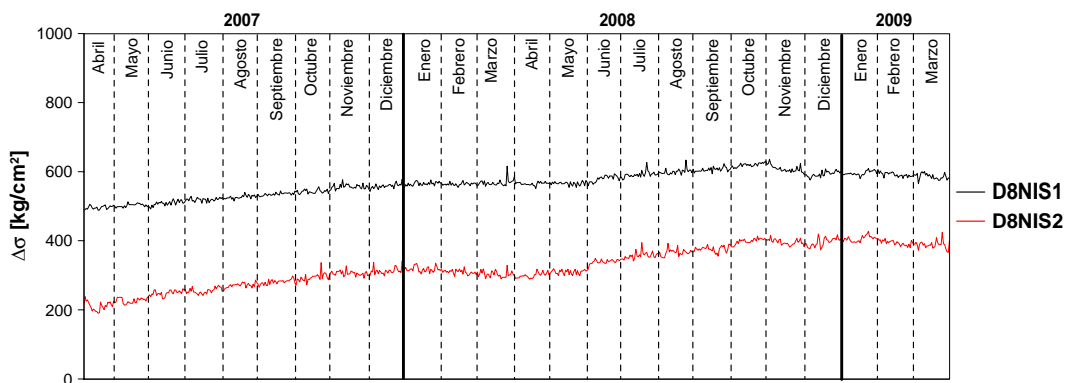


Figura B.22: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

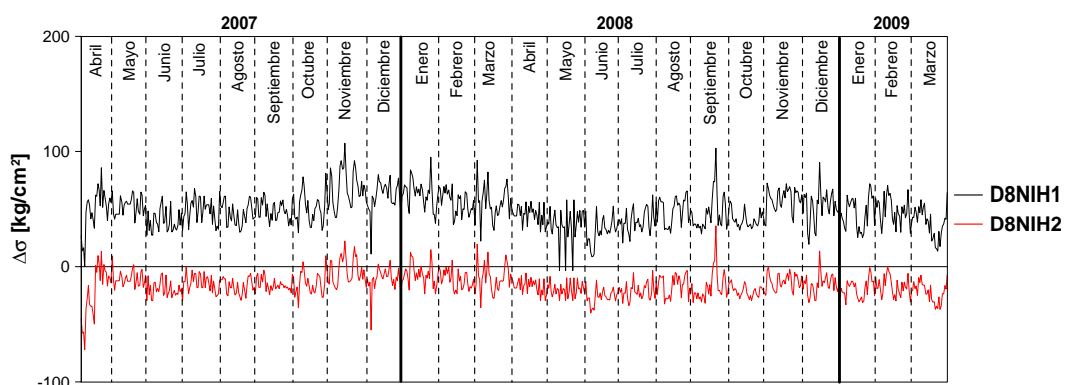


Figura B.23: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

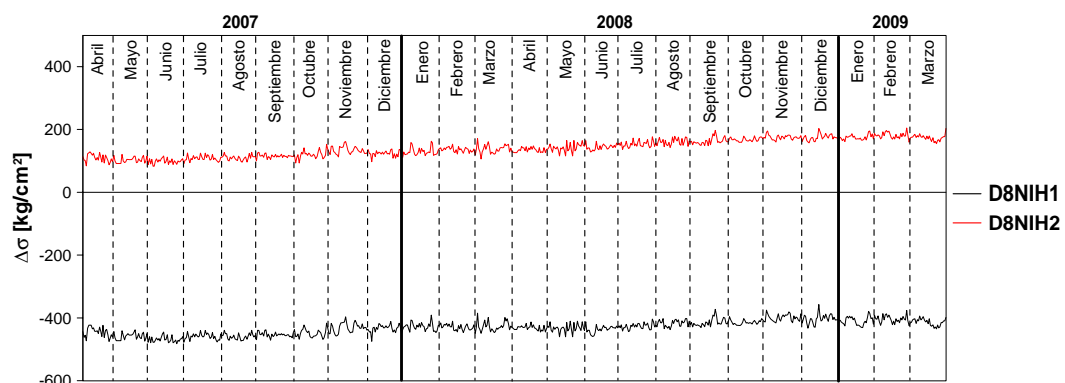


Figura B.24: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

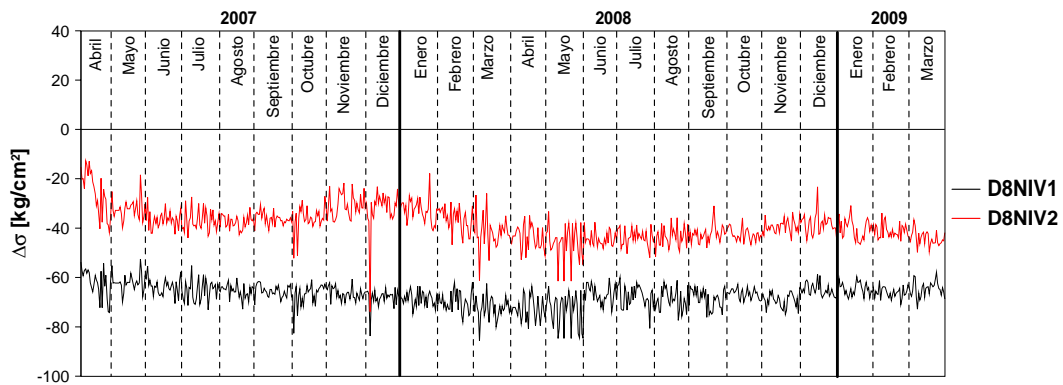


Figura B.25: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

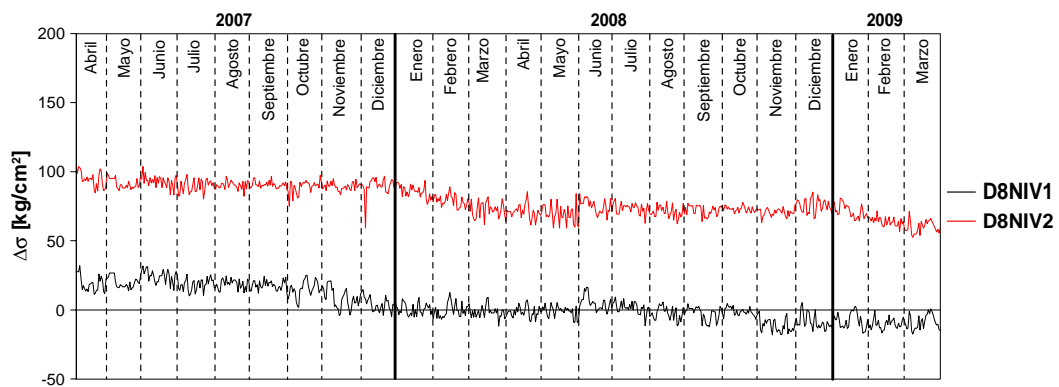


Figura B.26: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

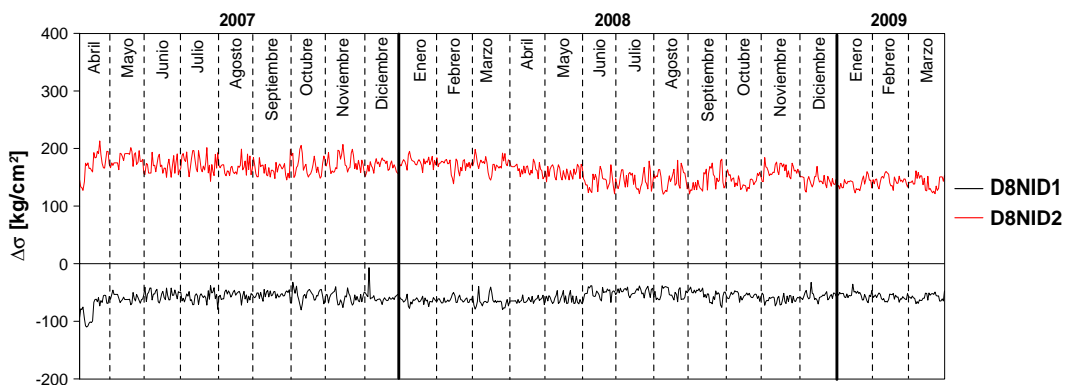


Figura B.27: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

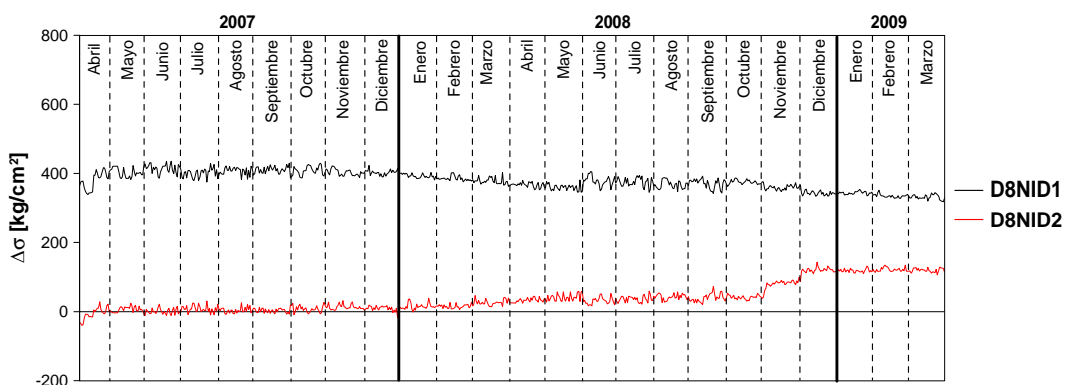


Figura B.28: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

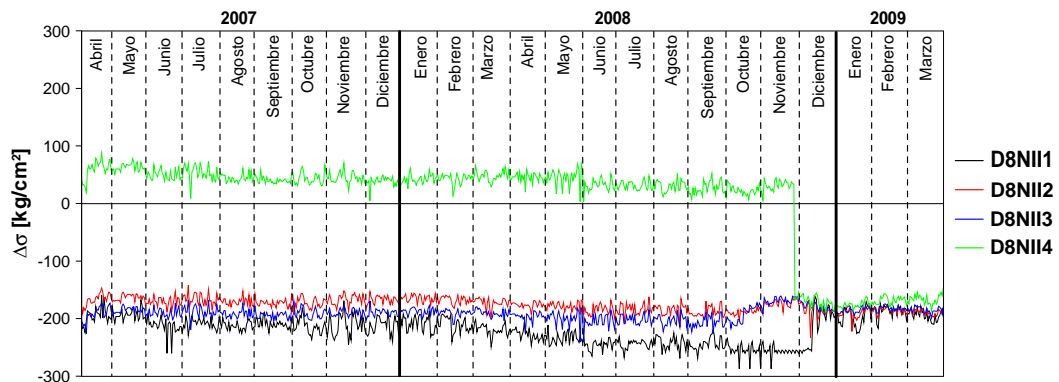


Figura B.29: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

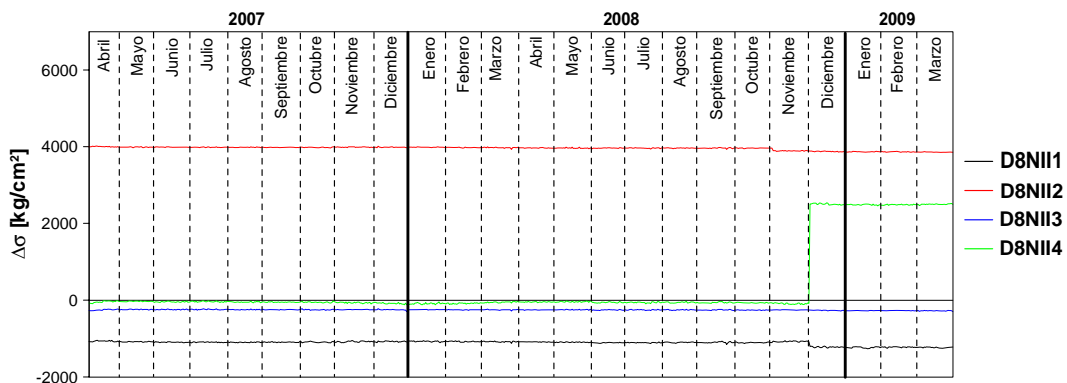


Figura B.30: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

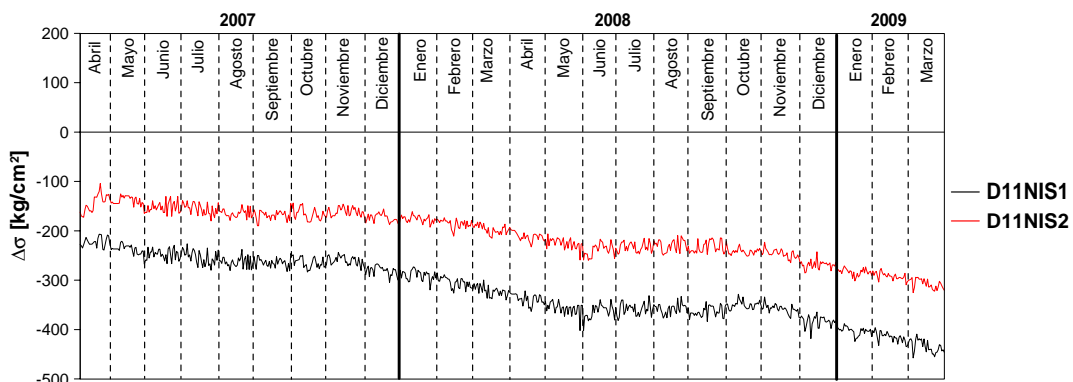


Figura B.31: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

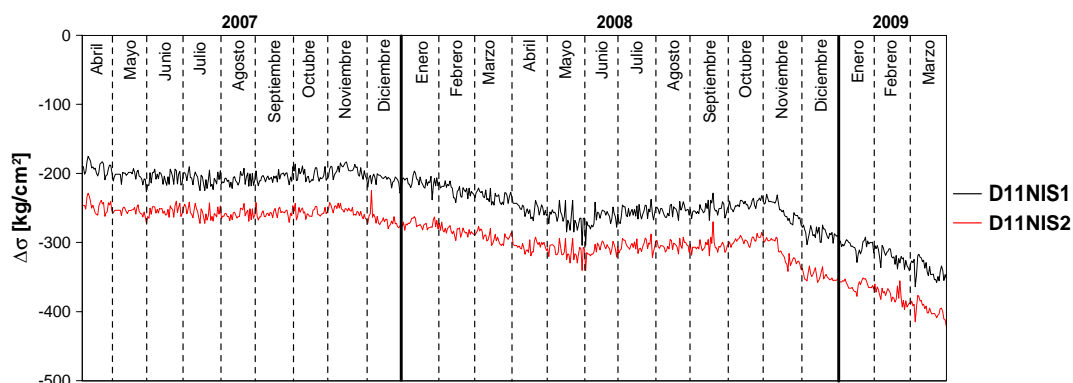


Figura B.32: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D11, lado San Cristóbal

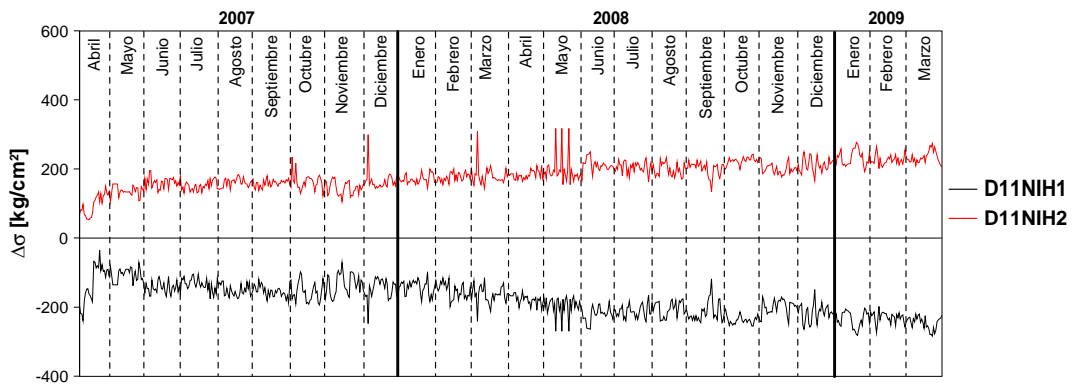


Figura B.33: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

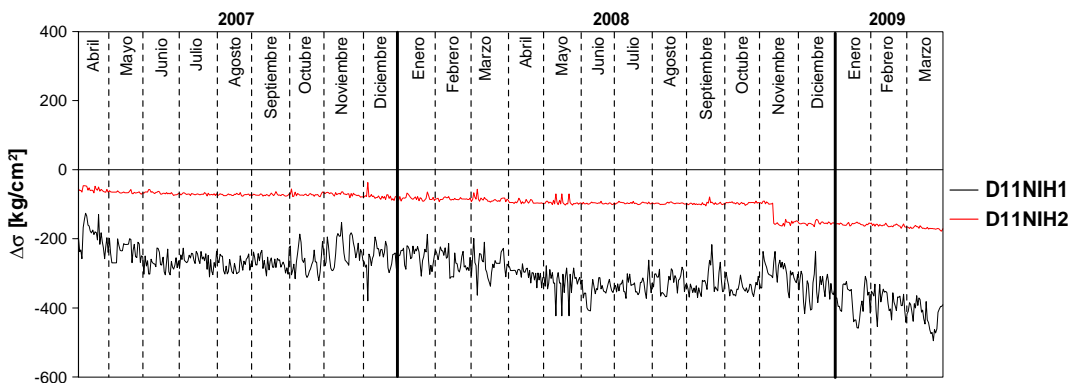


Figura B.34: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D11, lado San Cristóbal

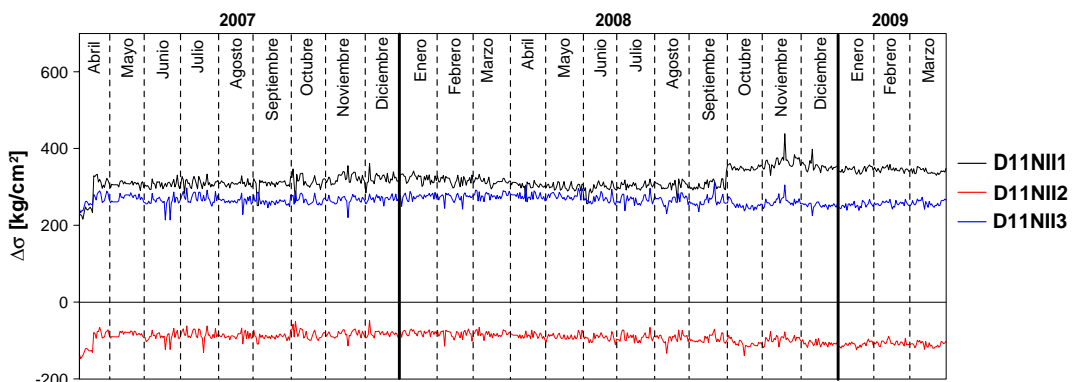


Figura B.35: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

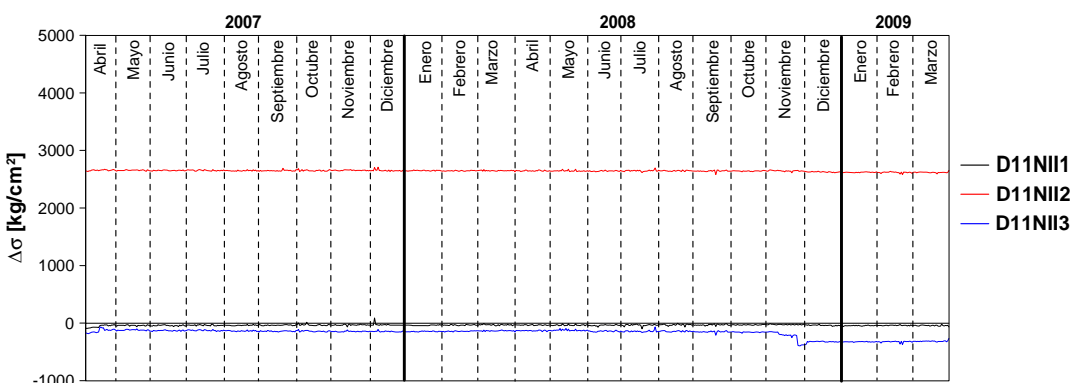


Figura B.36: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D11, lado San Cristóbal

APÉNDICE C. Temperaturas medidas a las 8:00 hrs.

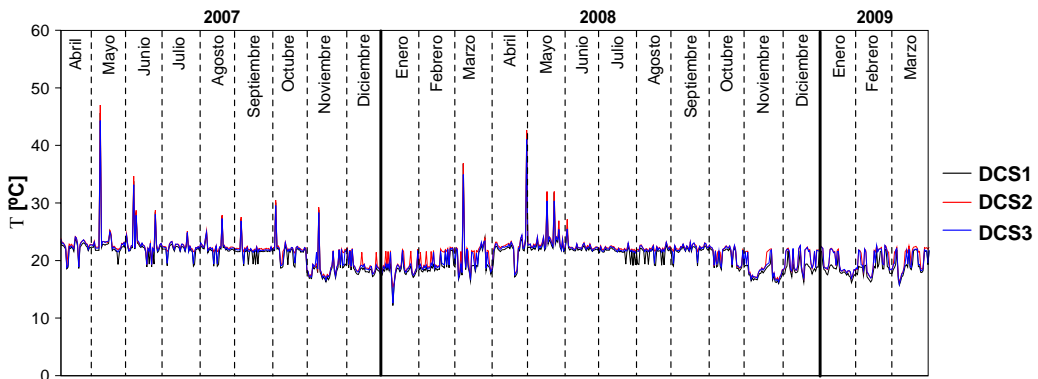


Figura C.1: Temperatura, lecho superior, dovela central

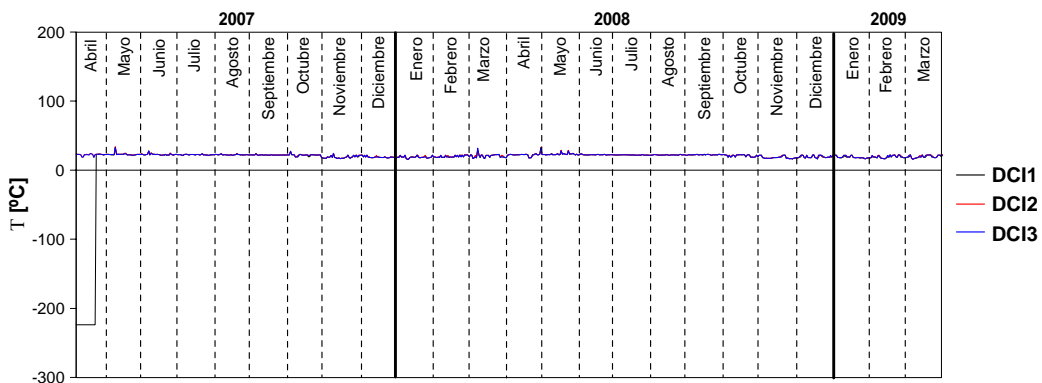


Figura C.2: Temperatura, lecho inferior, dovela central

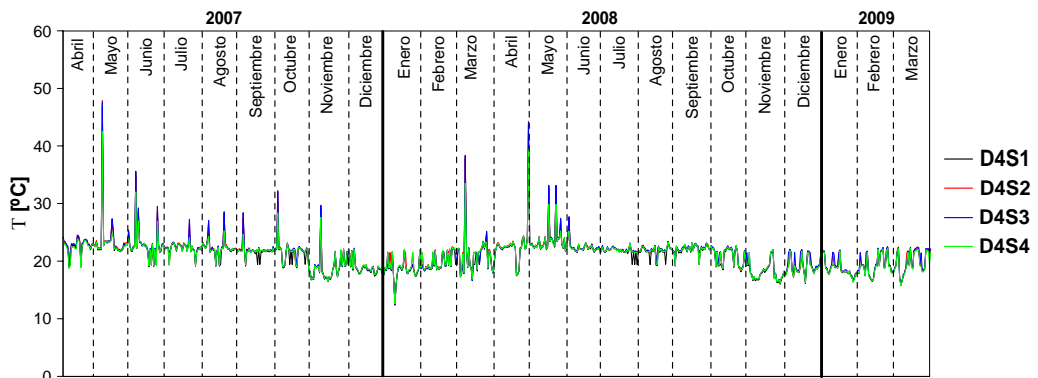


Figura C.3: Temperatura, lecho superior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

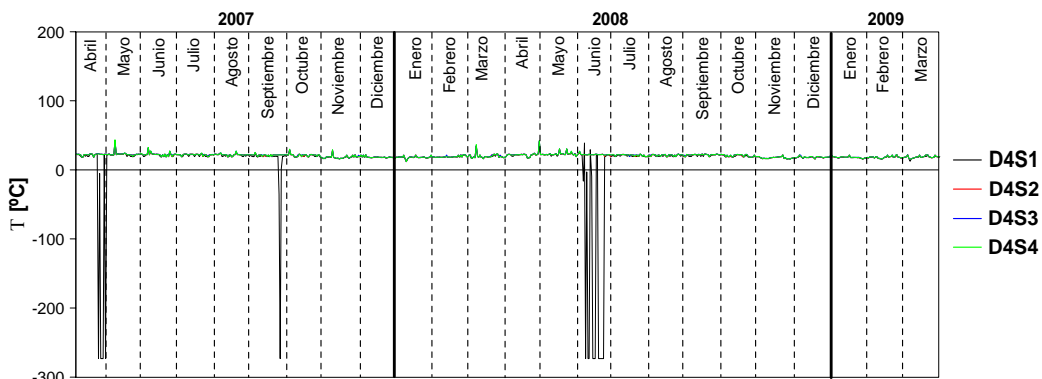


Figura C.4: Temperatura, lecho superior, dovela D4, lado San Cristóbal

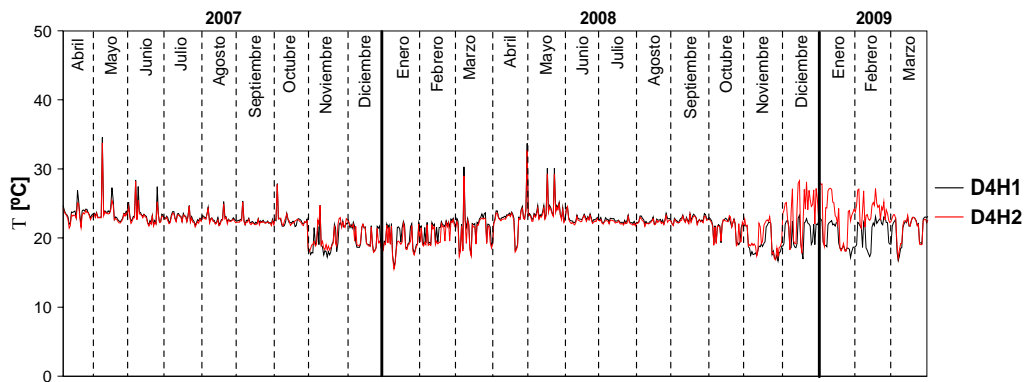


Figura C.5: Temperatura, posición horizontal, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

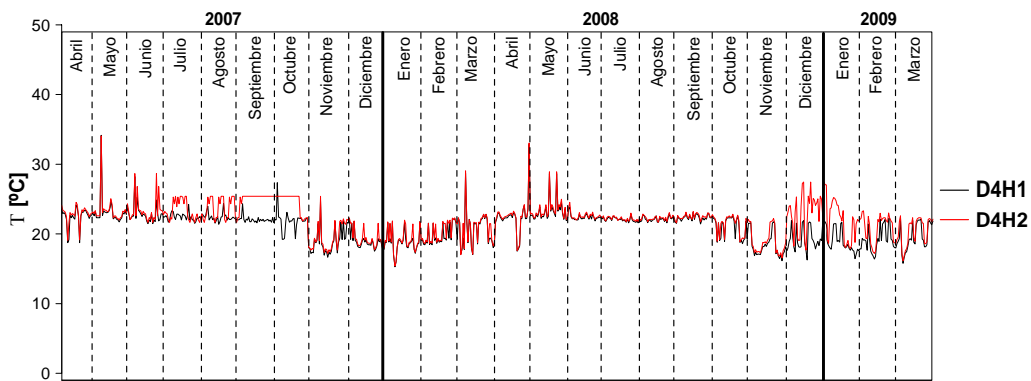


Figura C.6: Temperatura, posición horizontal, dovela D4, lado San Cristóbal

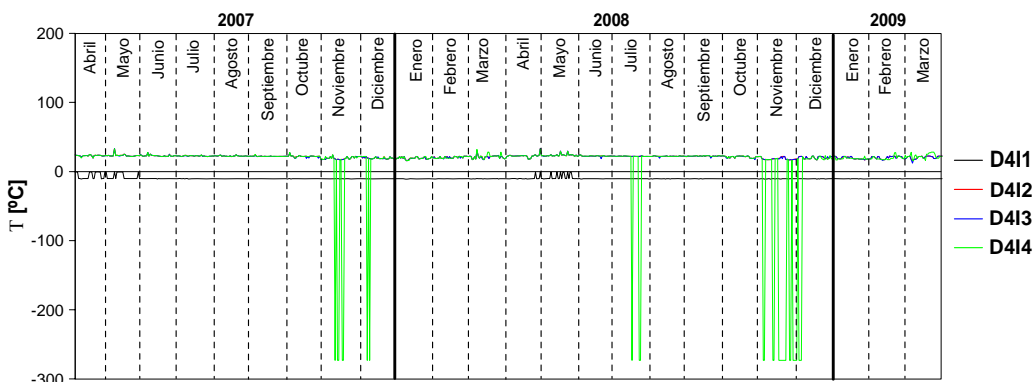


Figura C.7: Temperatura, lecho inferior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

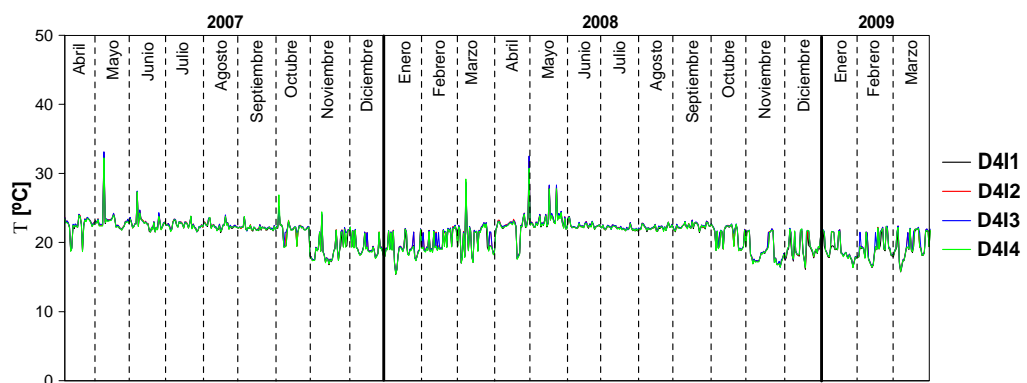


Figura C.8: Temperatura, lecho inferior, dovela D4, lado San Cristóbal

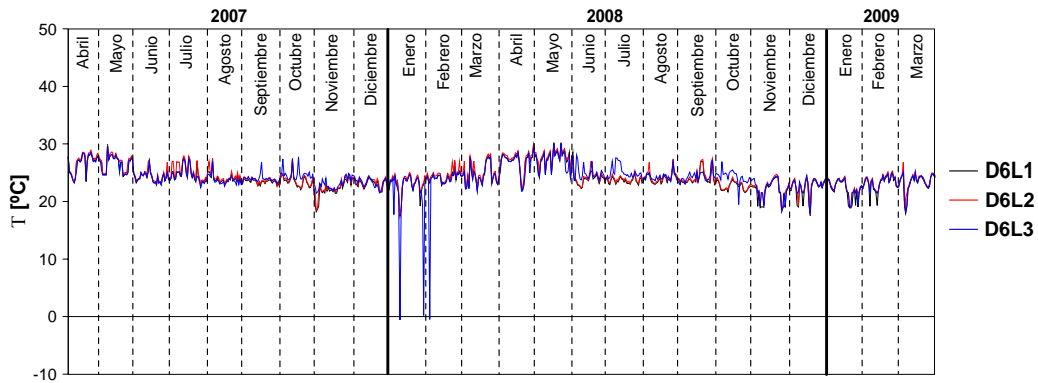


Figura C.9: Temperatura, zona de transición, lado Tuxtla Gutiérrez

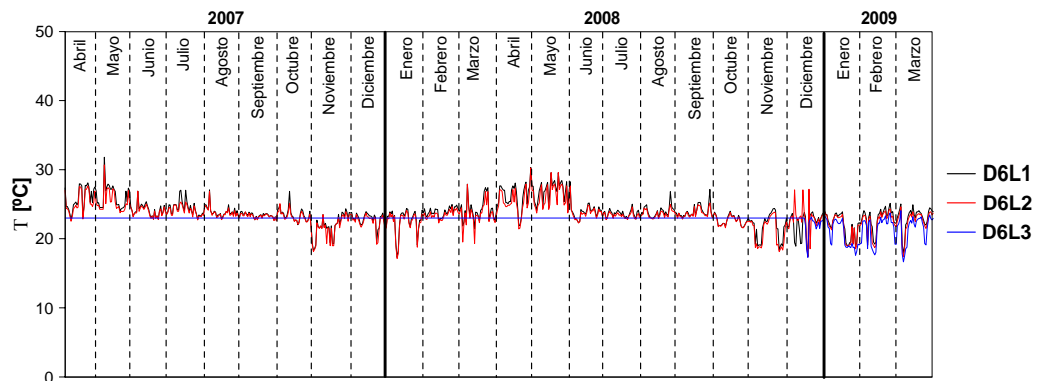


Figura C.10: Temperatura, zona de transición, lado San Cristóbal

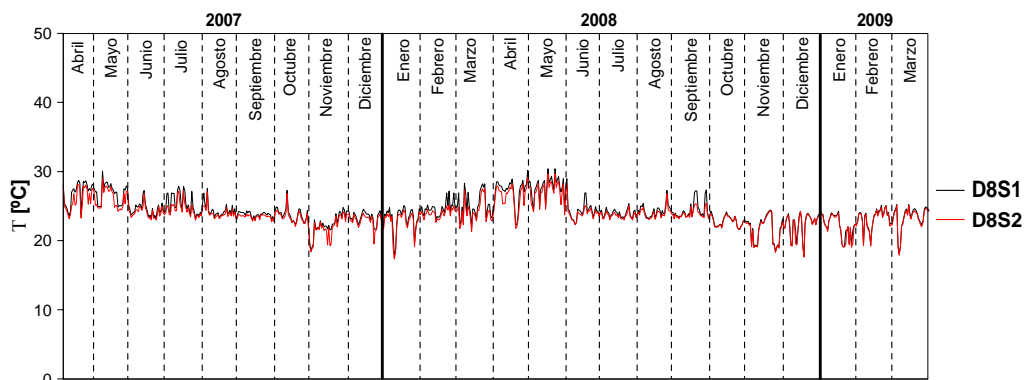


Figura C.11: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

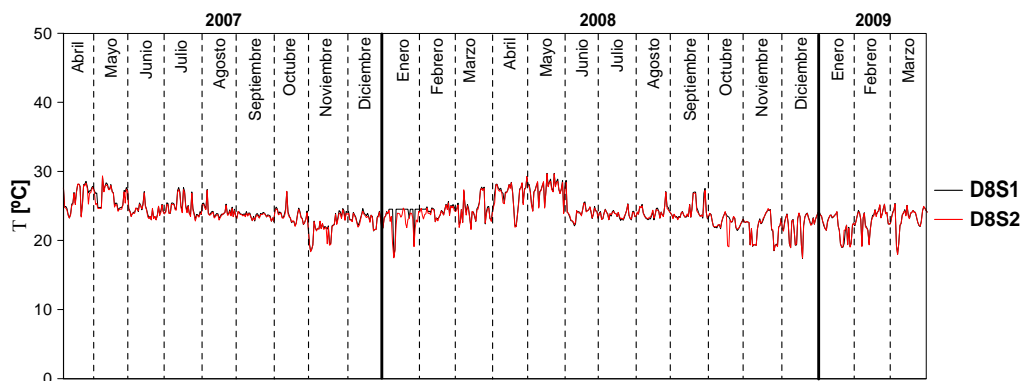


Figura C.12: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

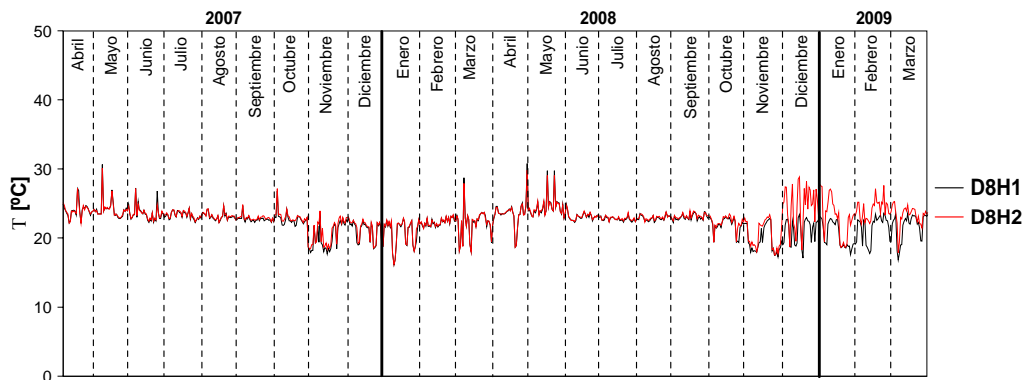


Figura C.13: Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

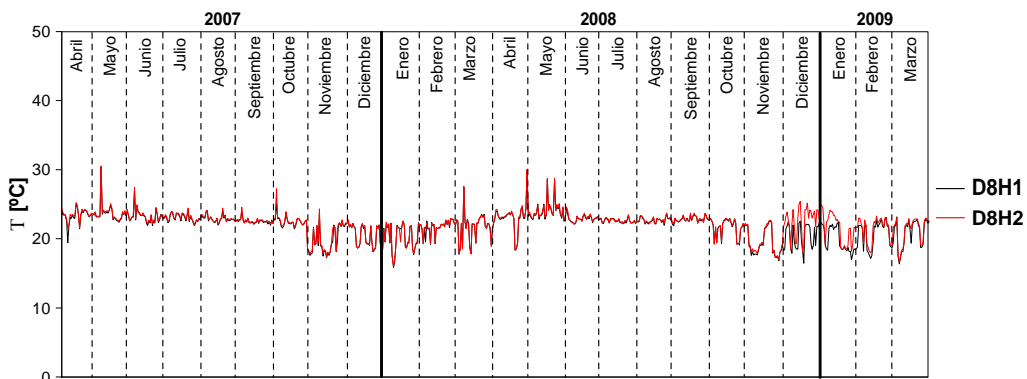


Figura C.14 Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

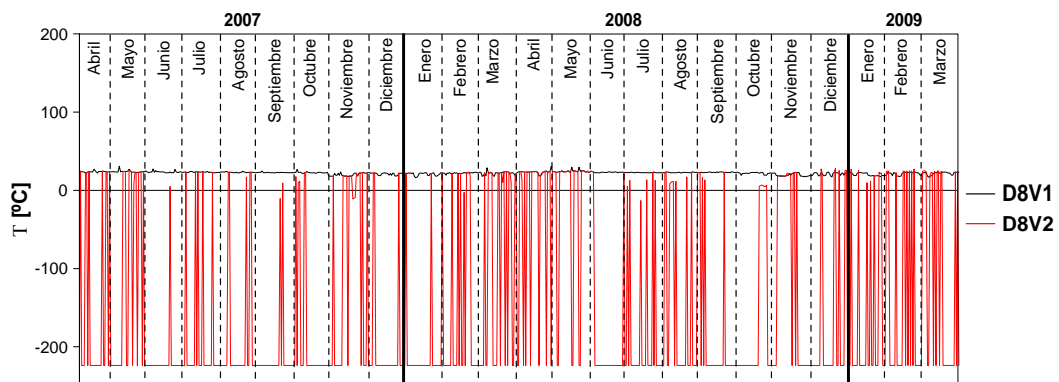


Figura C.15: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

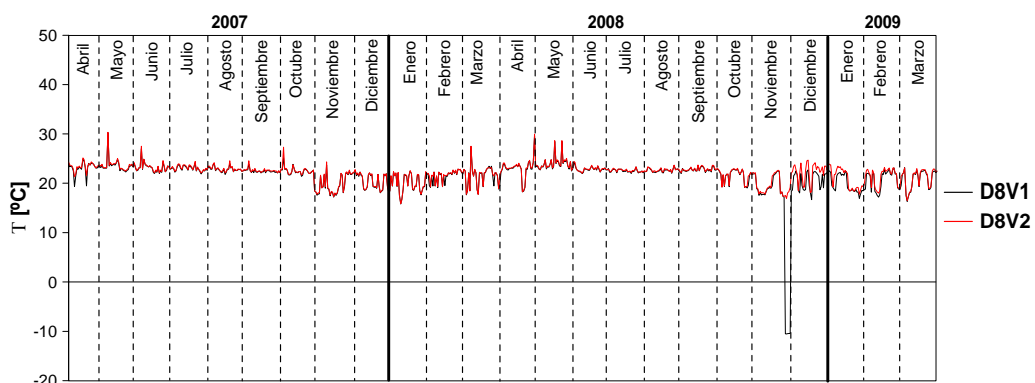


Figura C.16: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

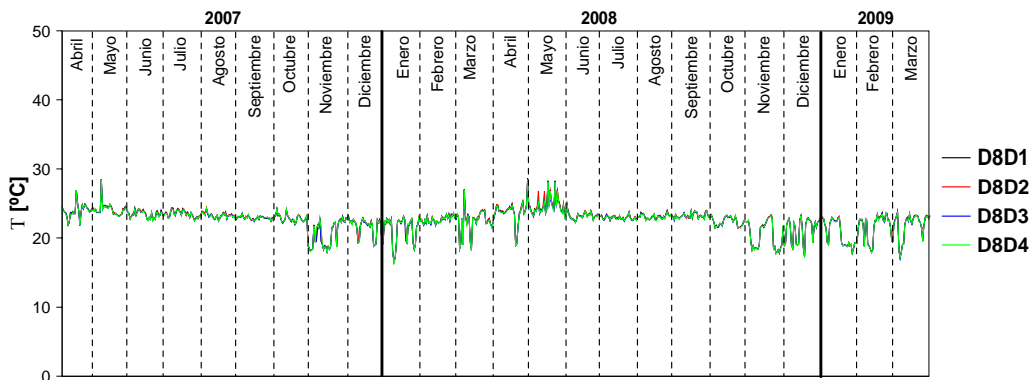


Figura C.17: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

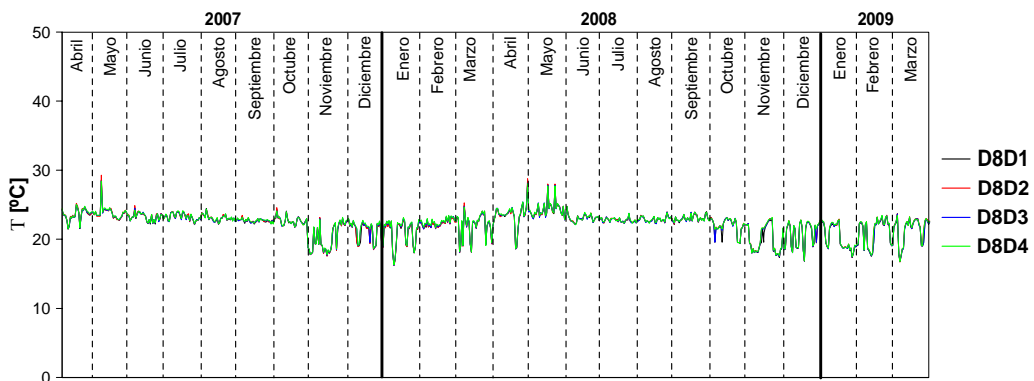


Figura C.18: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

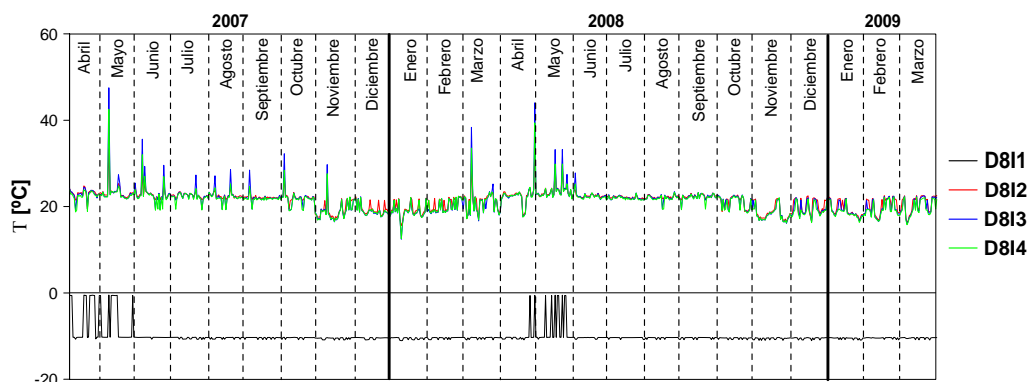


Figura C.19: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

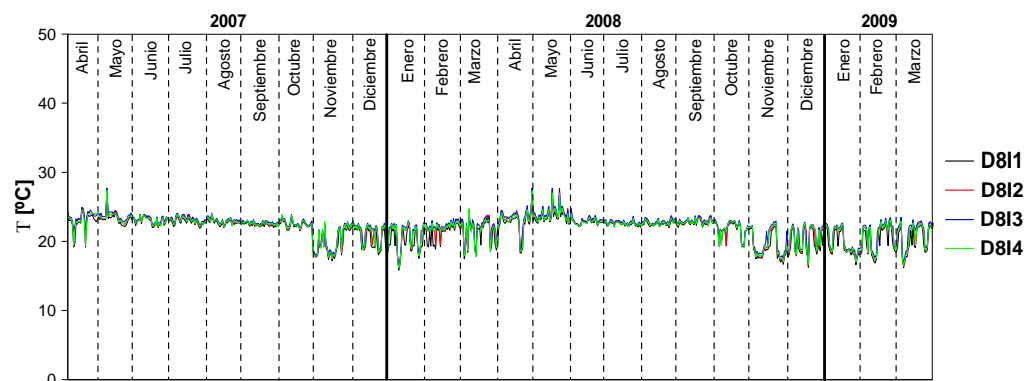


Figura C.20: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

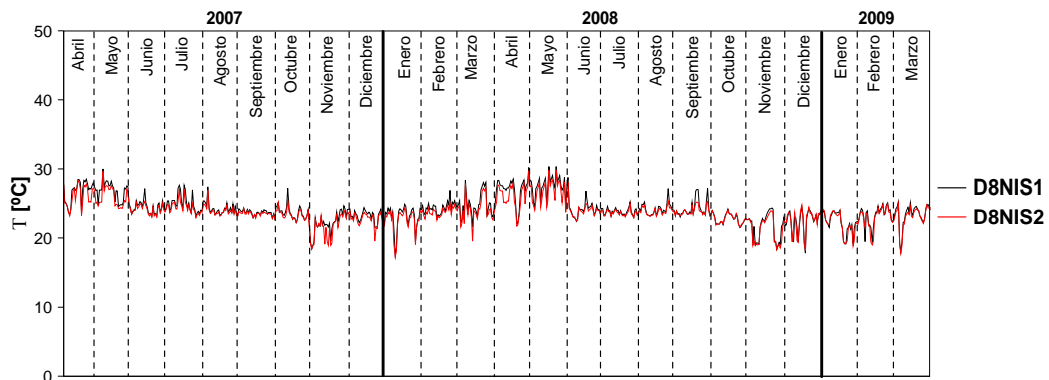


Figura C.21: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

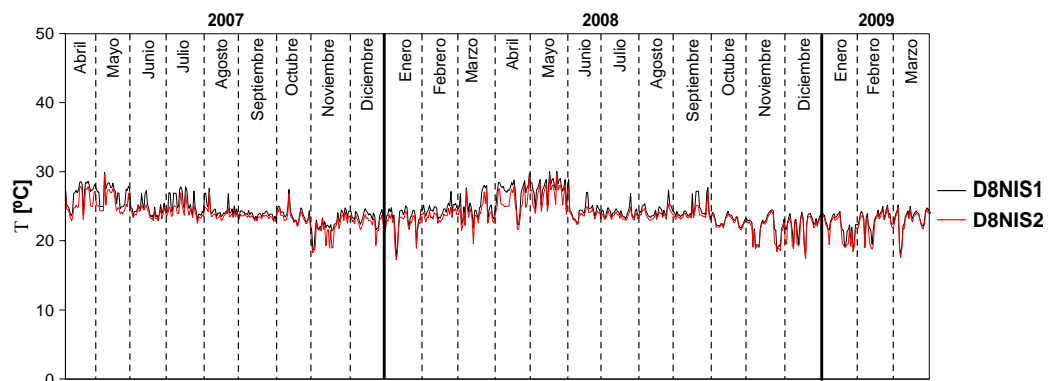


Figura C.22: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

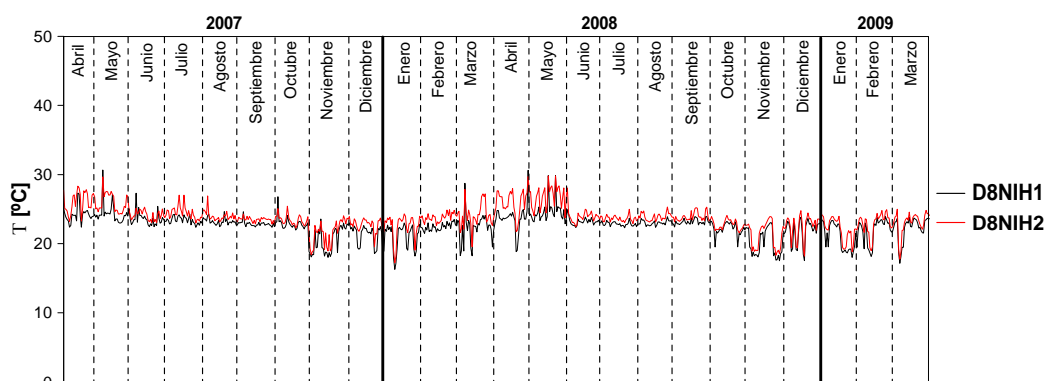


Figura C.23: Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

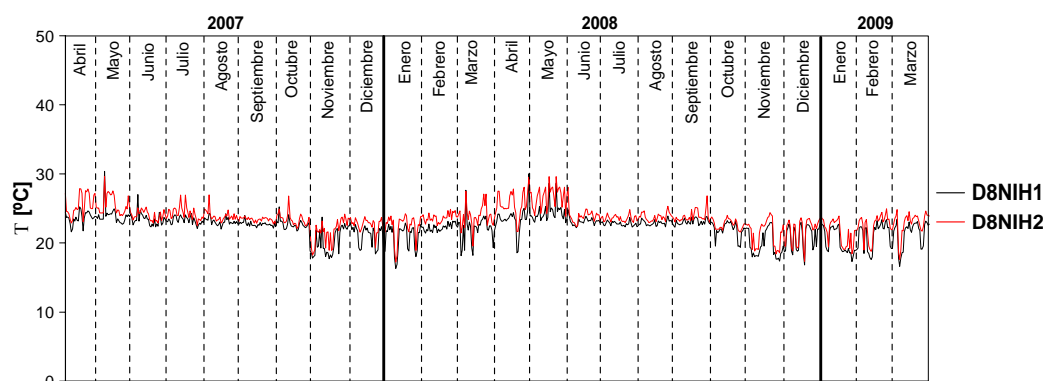


Figura C.24: Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

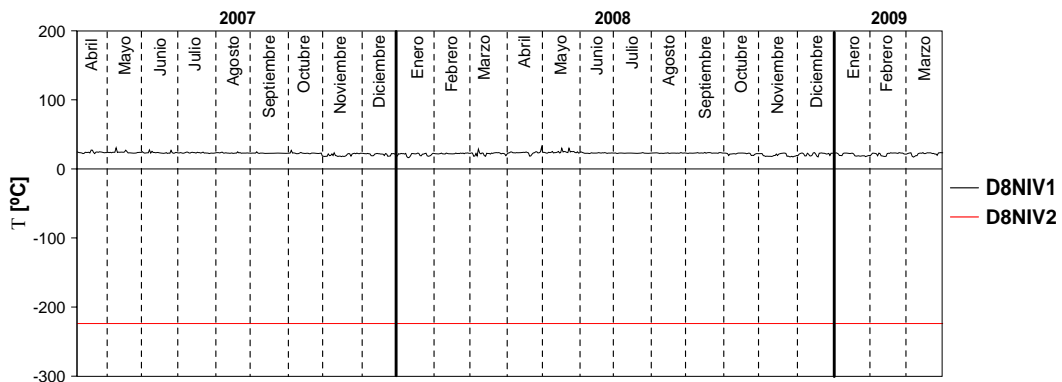


Figura C.25: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

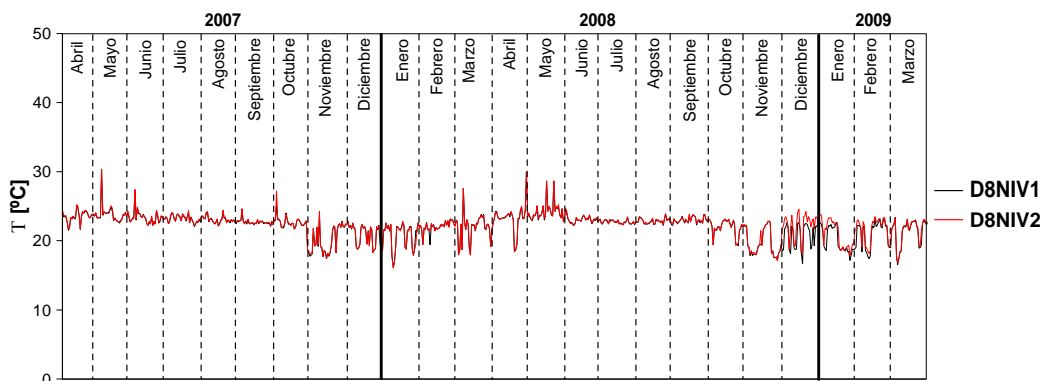


Figura C.26: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

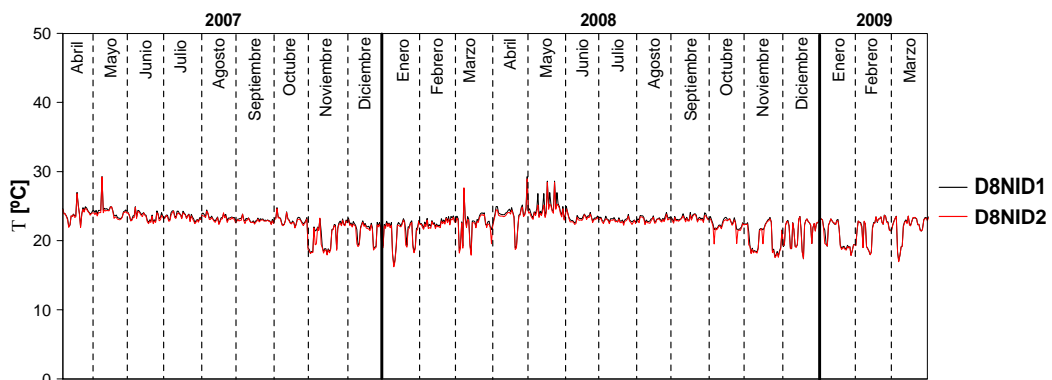


Figura C.27: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

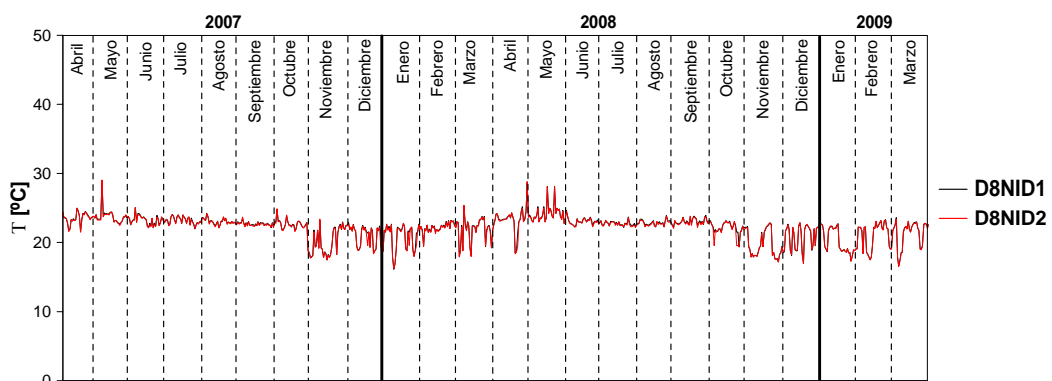


Figura C.28: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

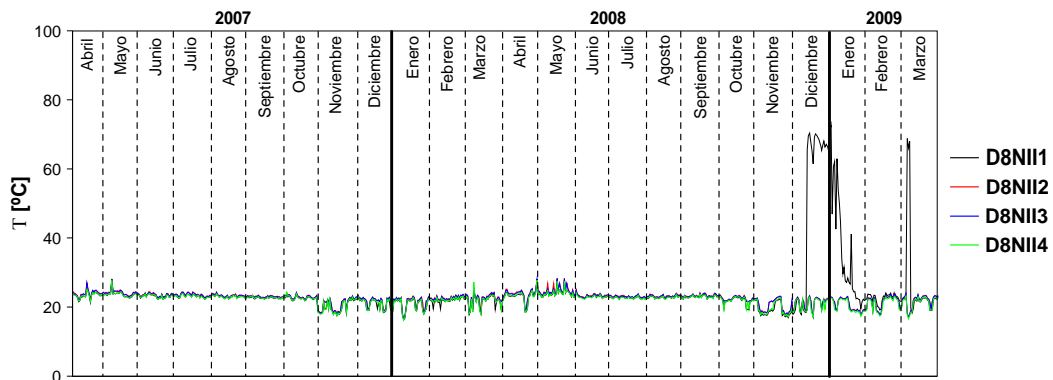


Figura C.29: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

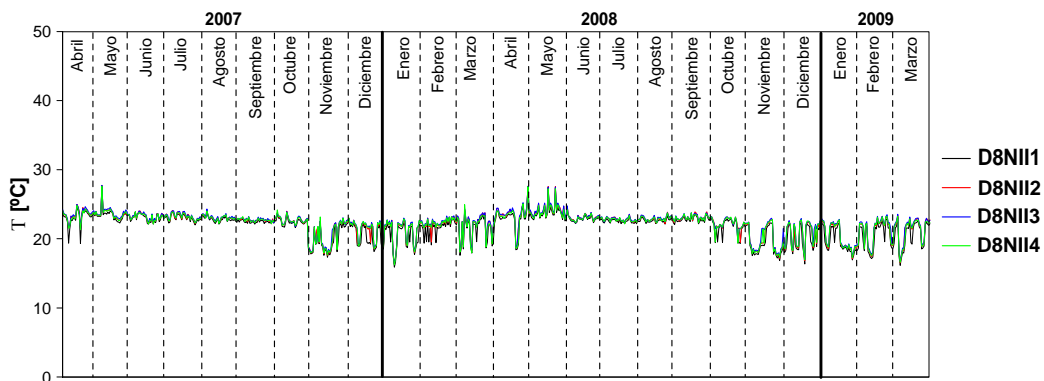


Figura C.30: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

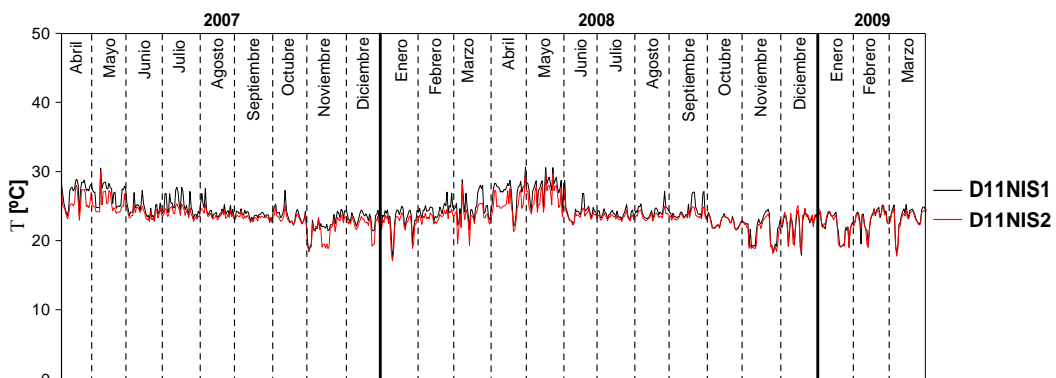


Figura C.31: Temperatura, lecho superior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

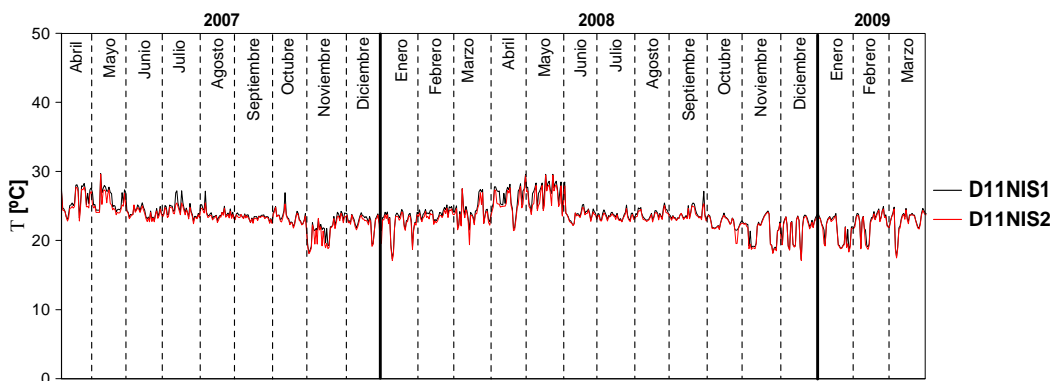


Figura C.32: Temperatura, lecho superior, dovela D11, lado San Cristóbal

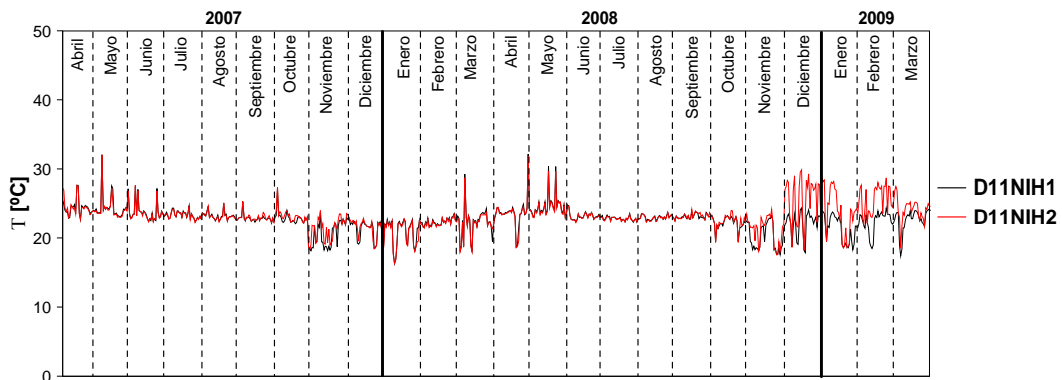


Figura C.33: Temperatura, posición horizontal, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

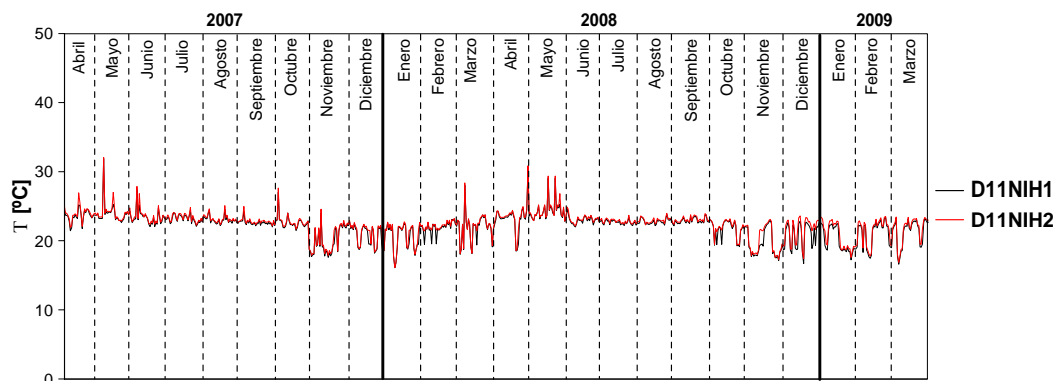


Figura C.34: Temperatura, posición horizontal, dovela D11, lado San Cristóbal

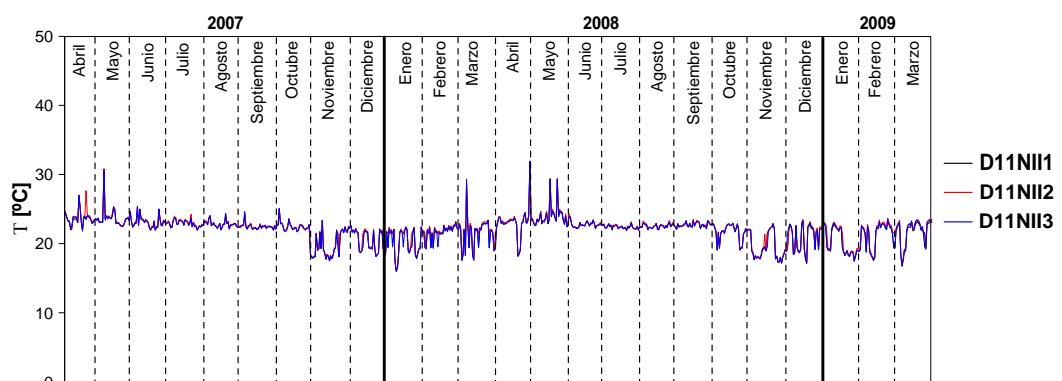


Figura C.35: Temperatura, lecho inferior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

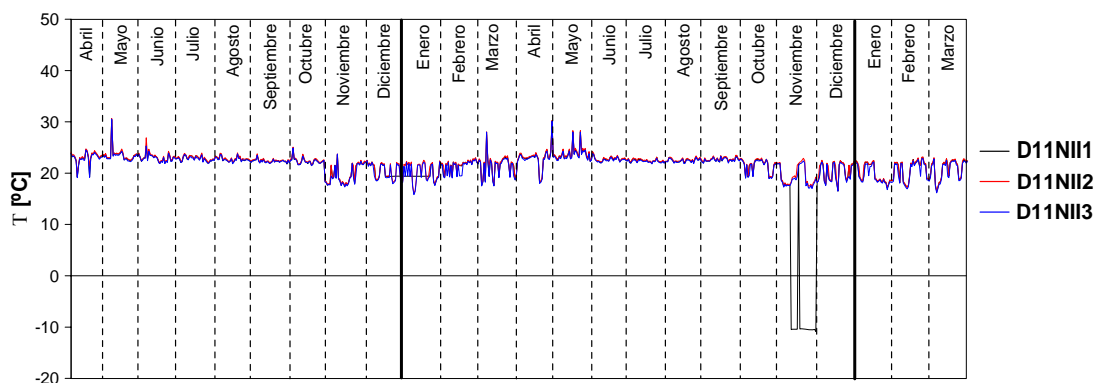


Figura C.36: Temperatura, lecho inferior, dovela D11, lado San Cristóbal

APÉNDICE D. Temperaturas medidas a las 20:00 hrs.

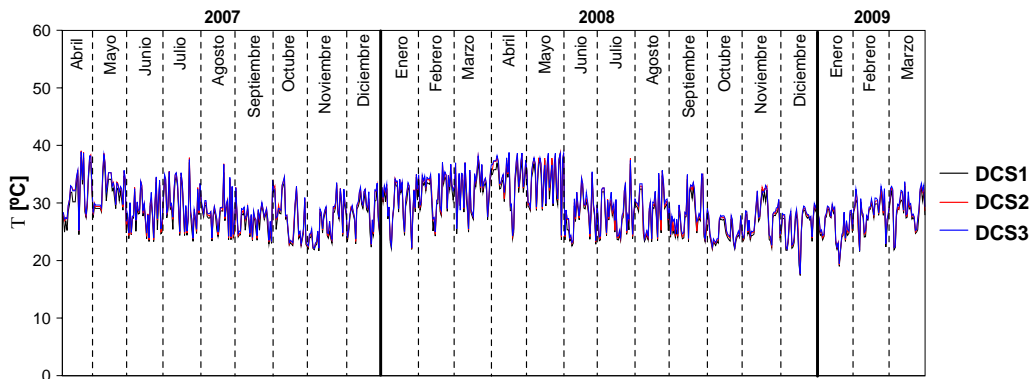


Figura D.1: Temperatura, lecho superior, dovela central

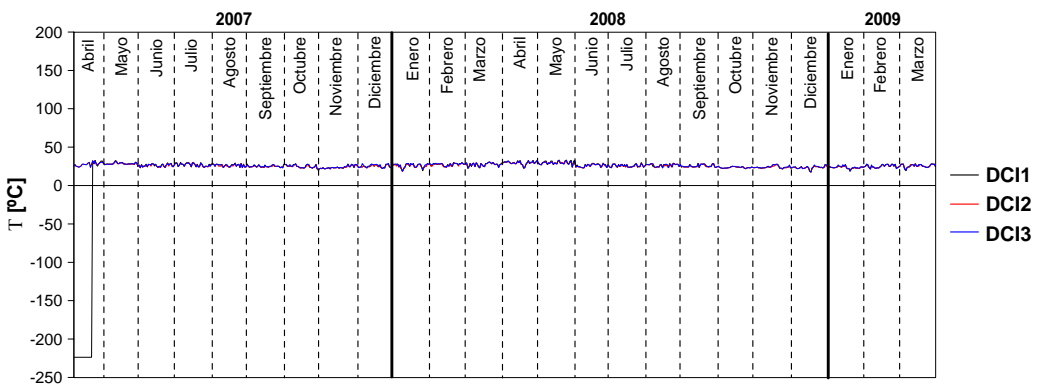


Figura D.2: Temperatura, lecho inferior, dovela central

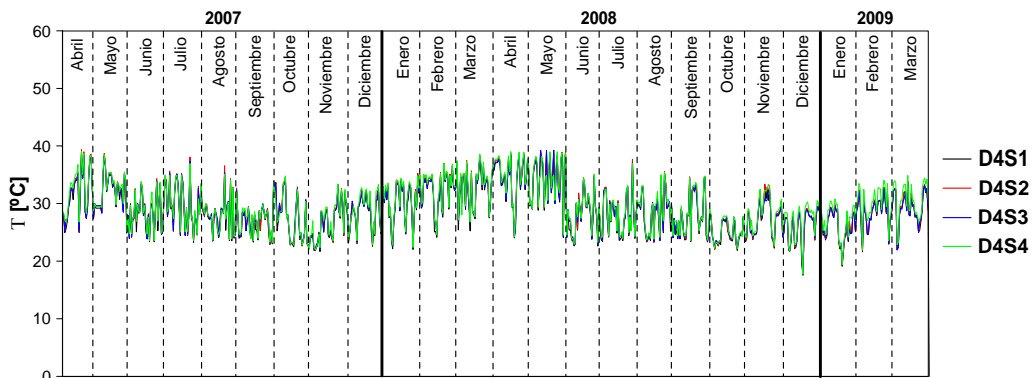


Figura D.3: Temperatura, lecho superior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

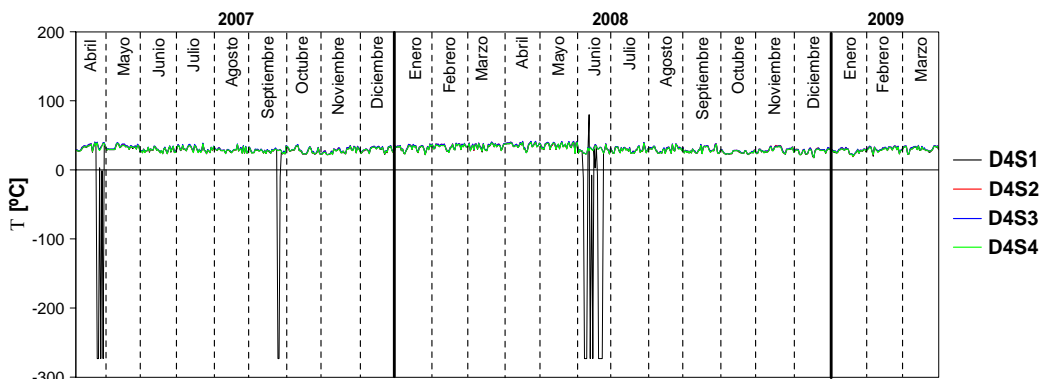


Figura D.4: Temperatura, lecho superior, dovela D4, lado San Cristóbal

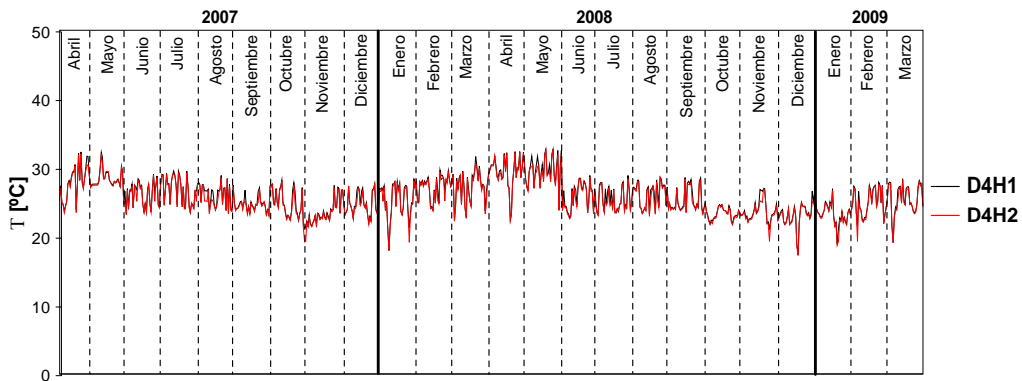


Figura D.5: Temperatura, posición horizontal, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

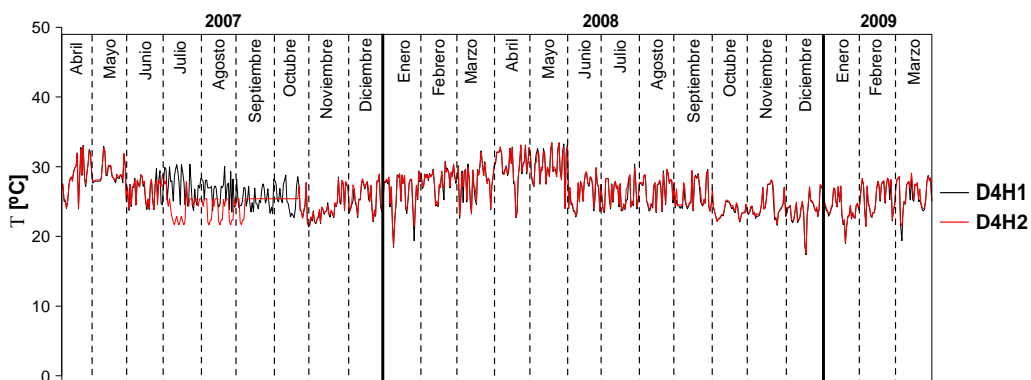


Figura D.6: Temperatura, posición horizontal, dovela D4, lado San Cristóbal

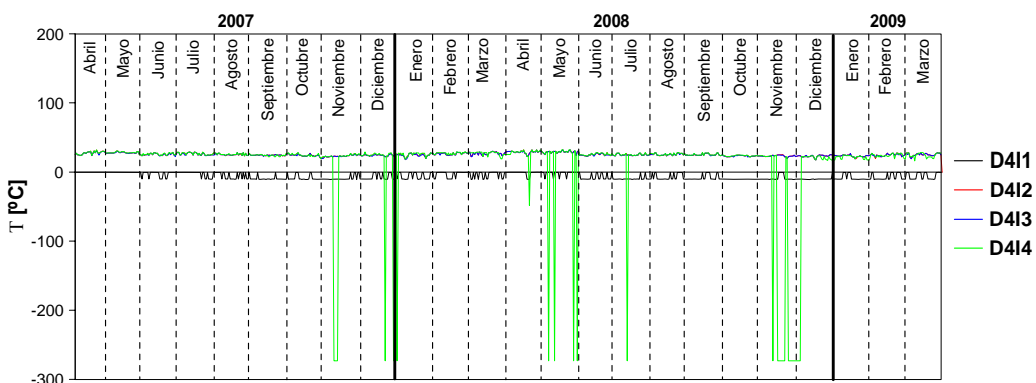


Figura D.7: Temperatura, lecho inferior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

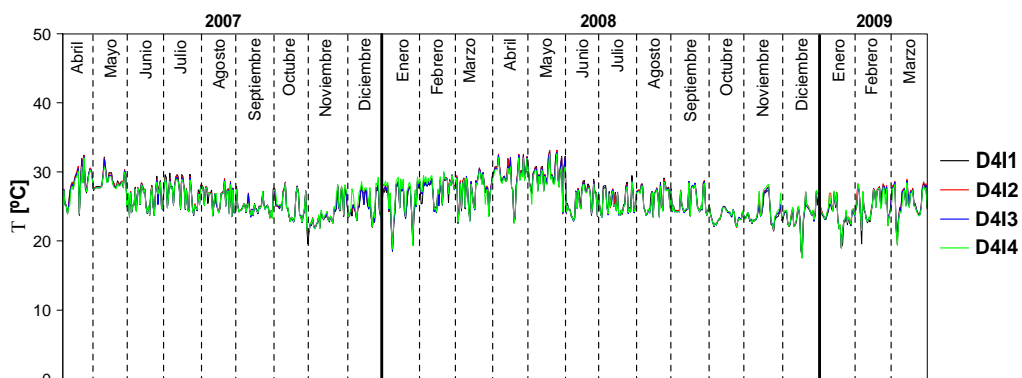


Figura D.8: Temperatura, lecho inferior, dovela D4, lado San Cristóbal

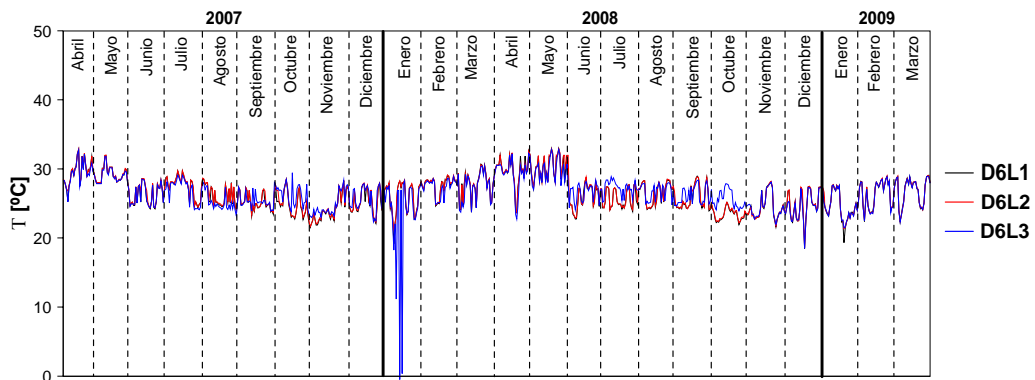


Figura D.9: Temperatura, zona de transición, lado Tuxtla Gutiérrez

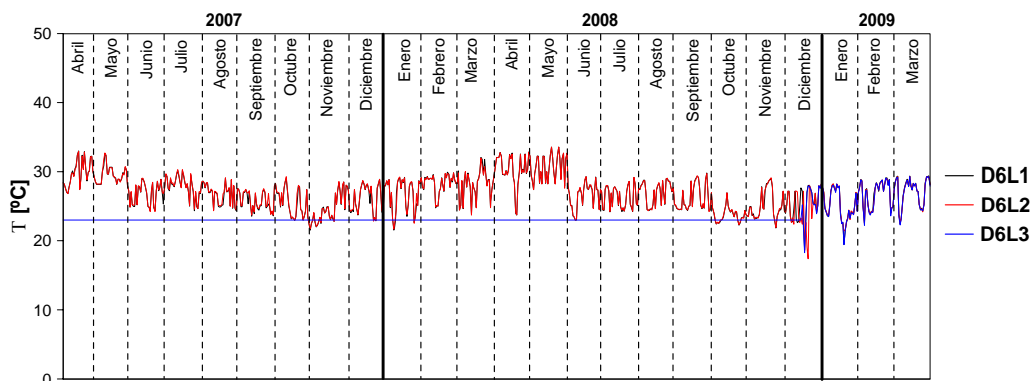


Figura D.10: Temperatura, zona de transición, lado San Cristóbal

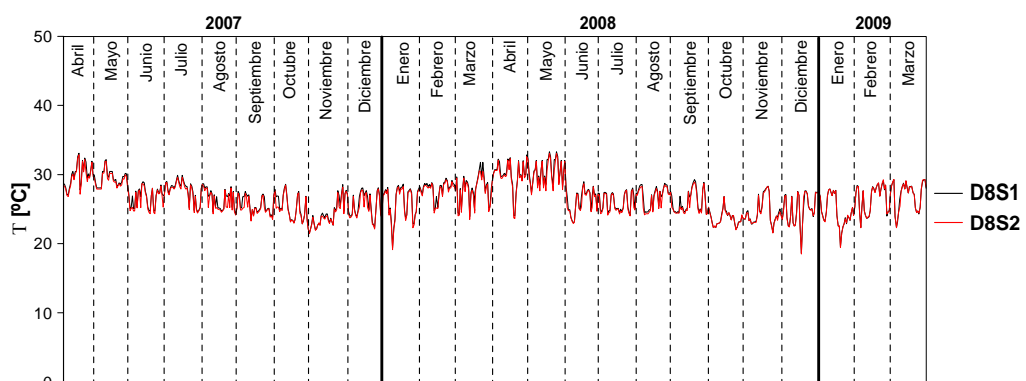


Figura D.11: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

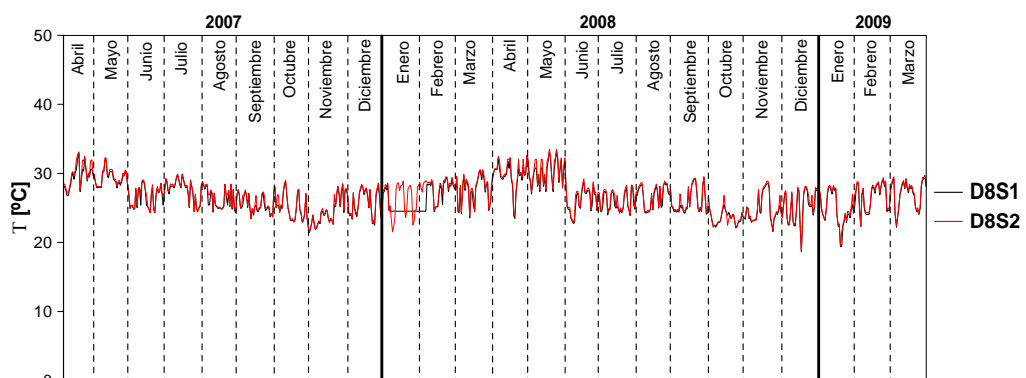


Figura D.12: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

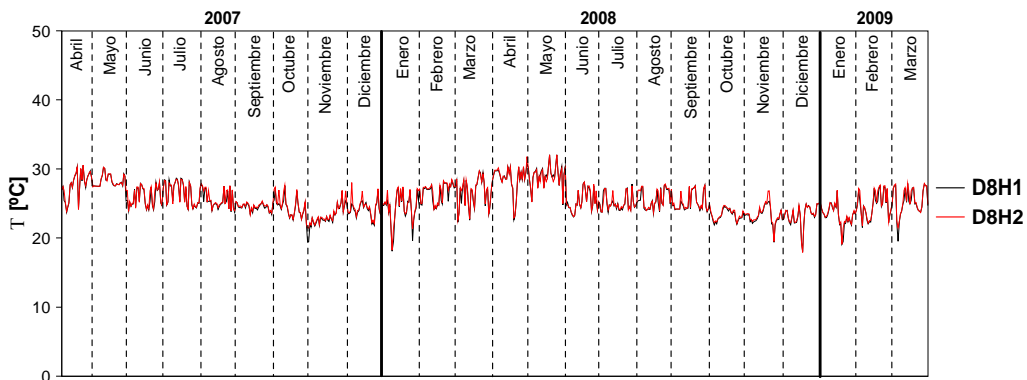


Figura D.13: Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

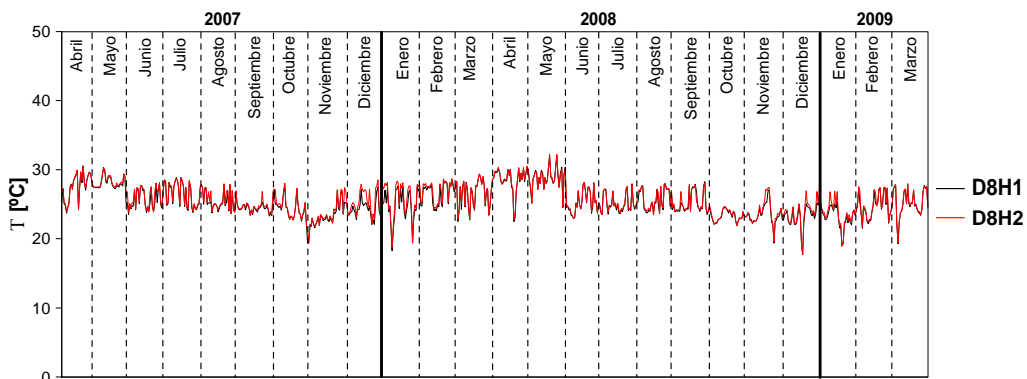


Figura D.14 Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

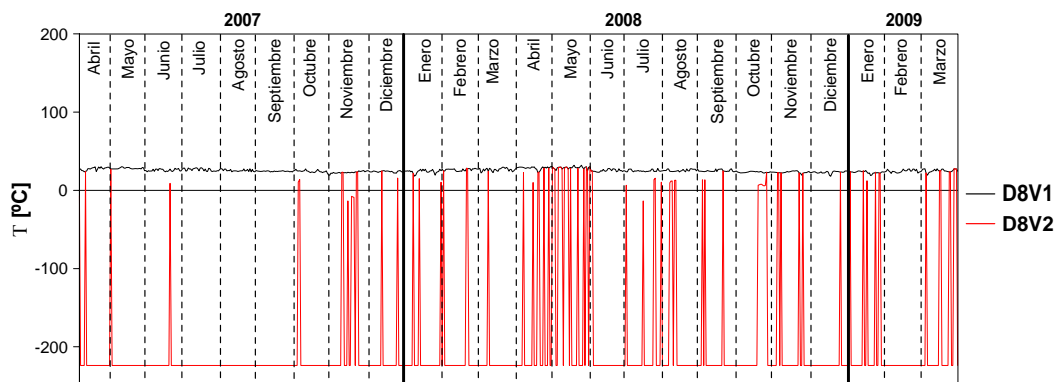


Figura D.15: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

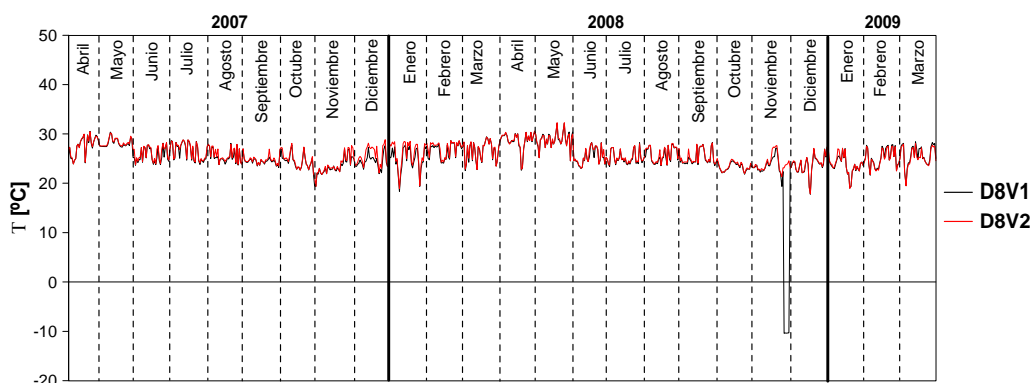


Figura D.16: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

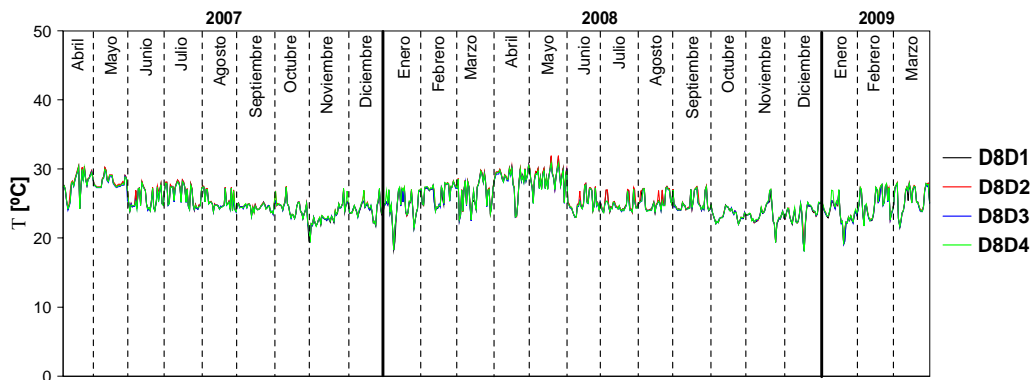


Figura D.17: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

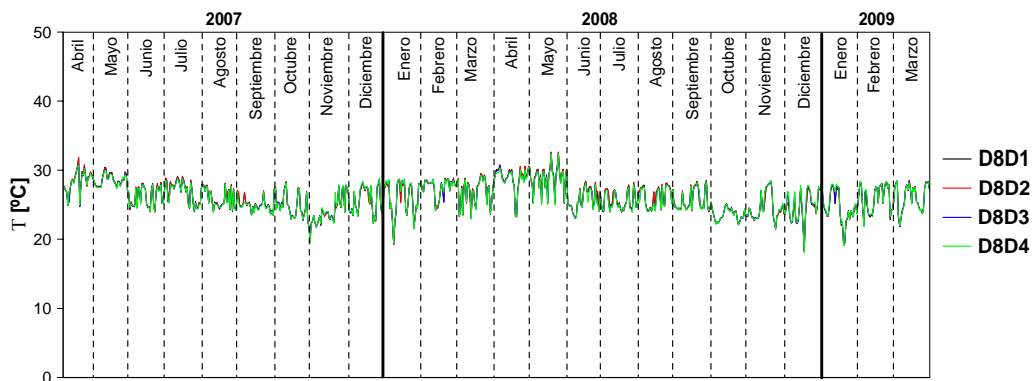


Figura D.18: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

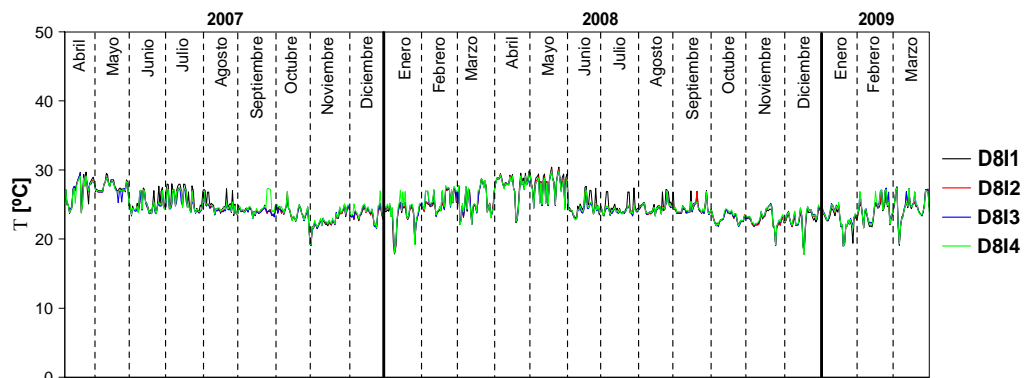


Figura D.19: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

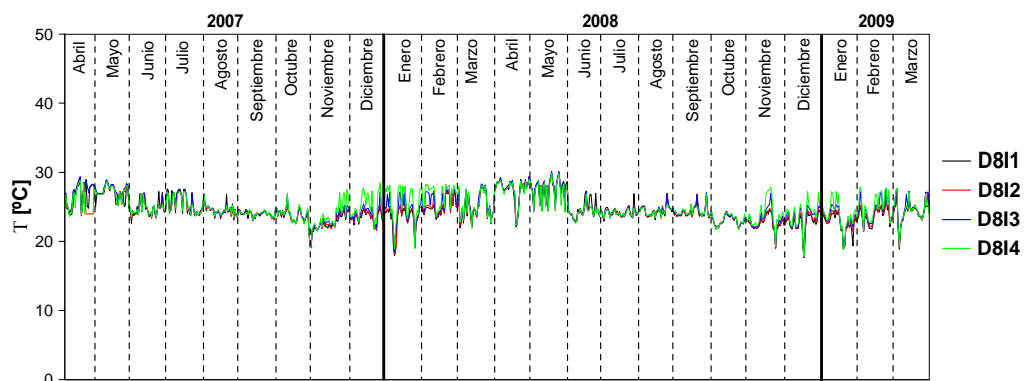


Figura D.20: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

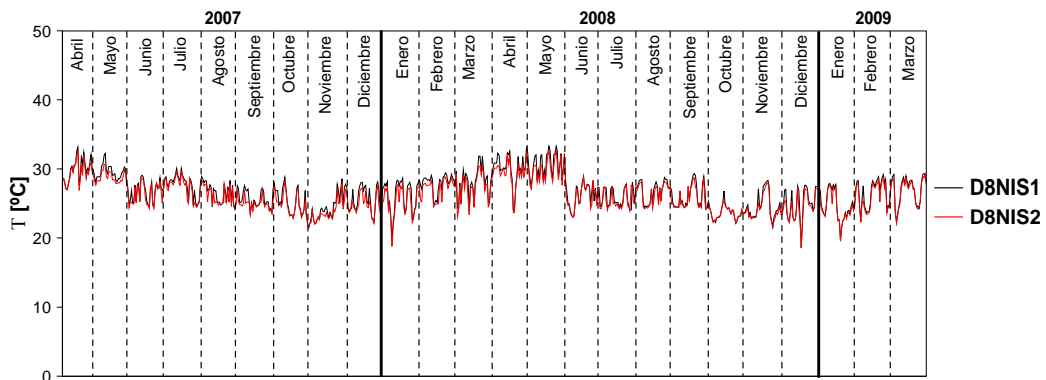


Figura D.21: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

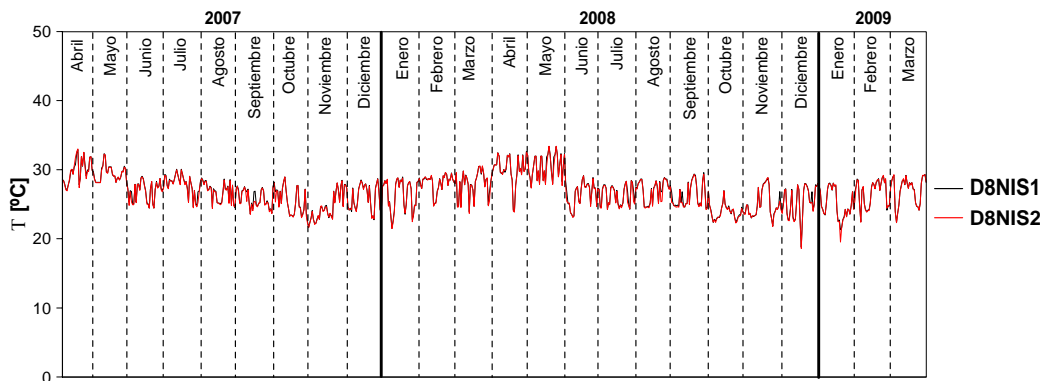


Figura D.22: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

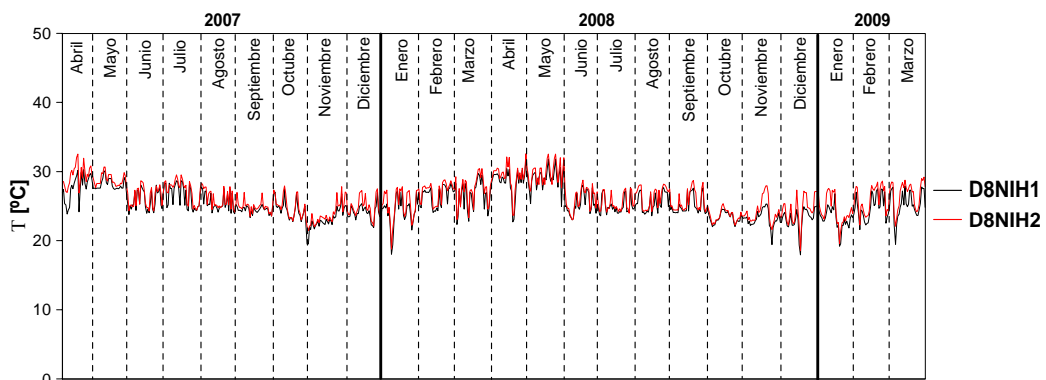


Figura D.23: Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

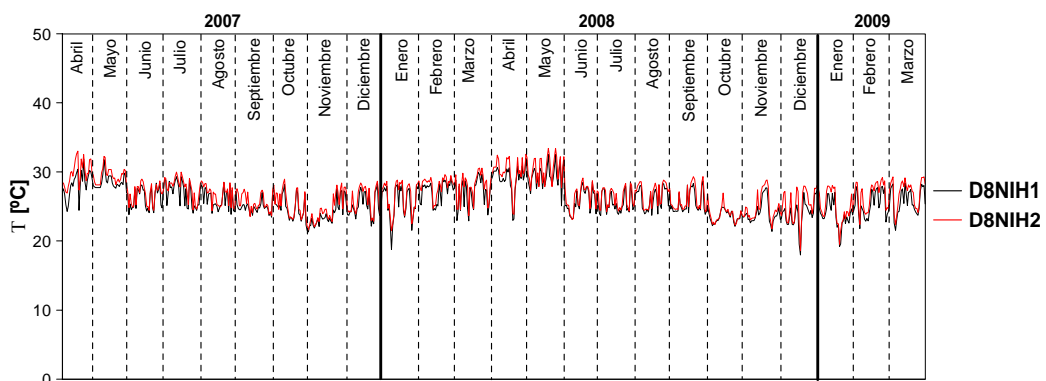


Figura D.24: Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

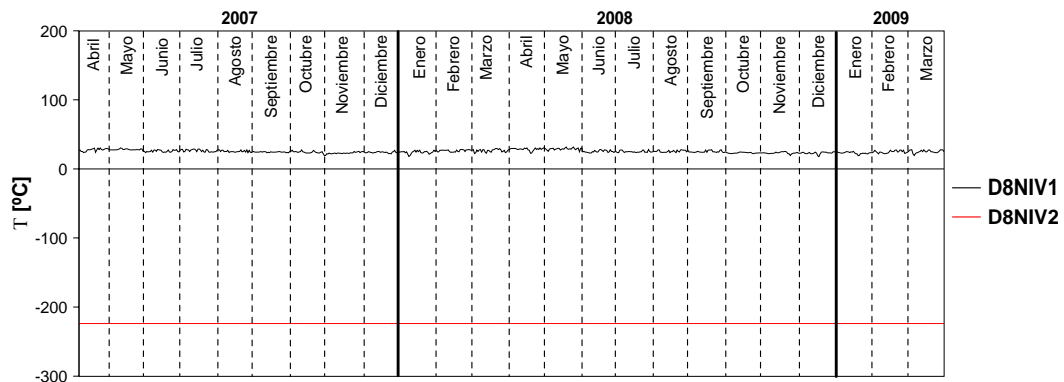


Figura D.25: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

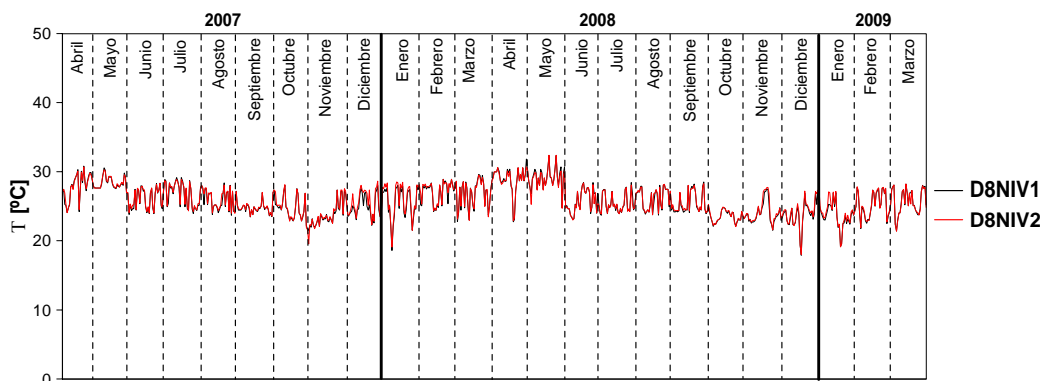


Figura D.26: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

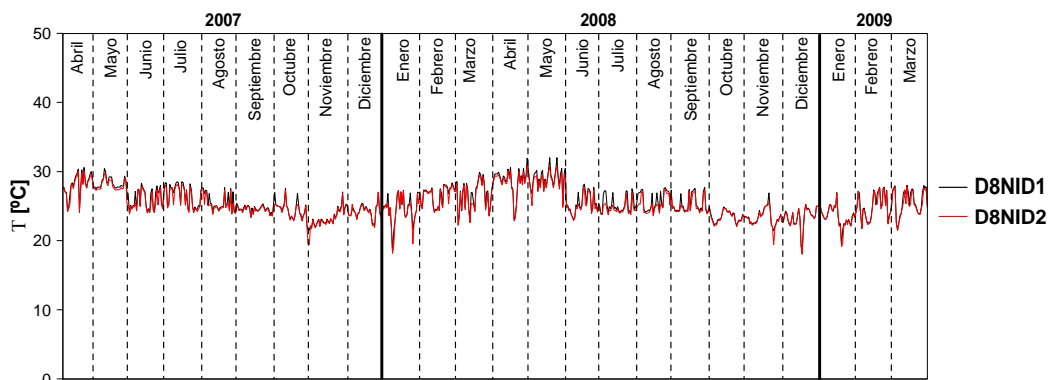


Figura D.27: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

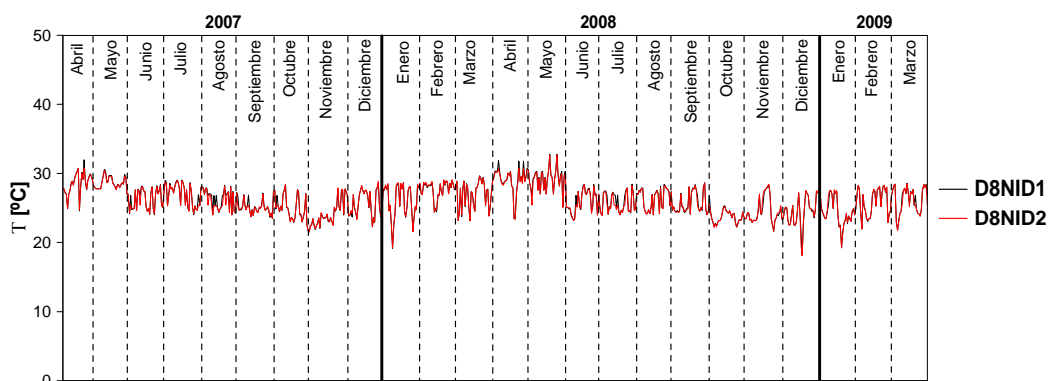


Figura D.28: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

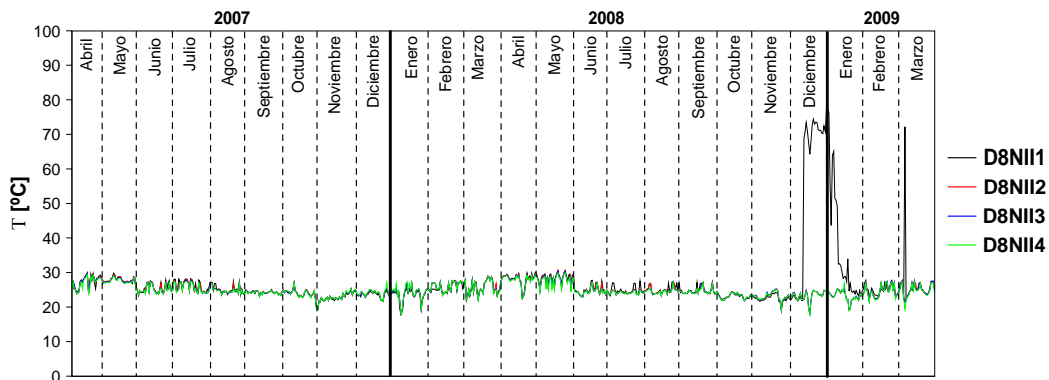


Figura D.29: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

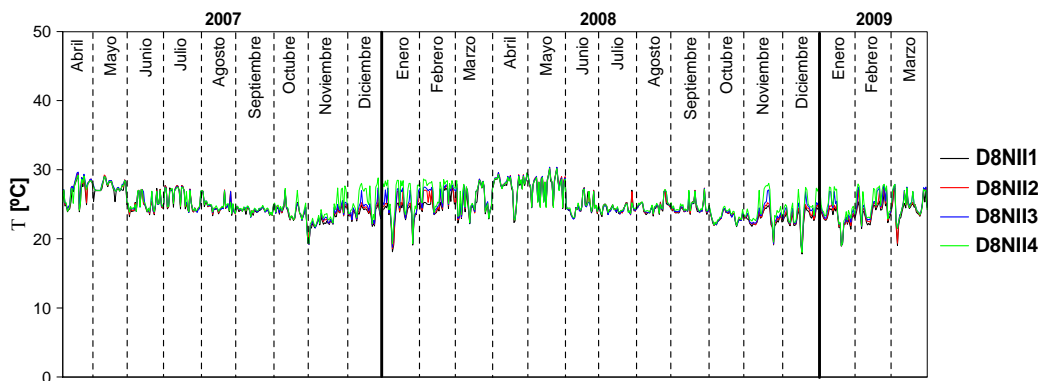


Figura D.30: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

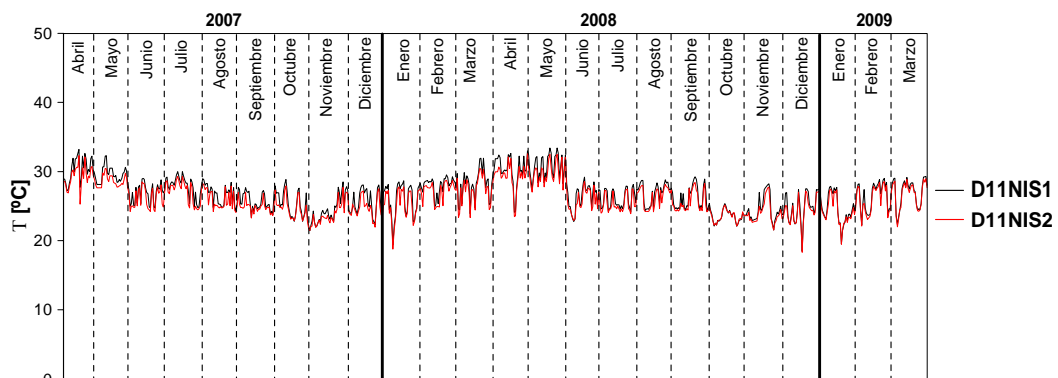


Figura D.31: Temperatura, lecho superior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

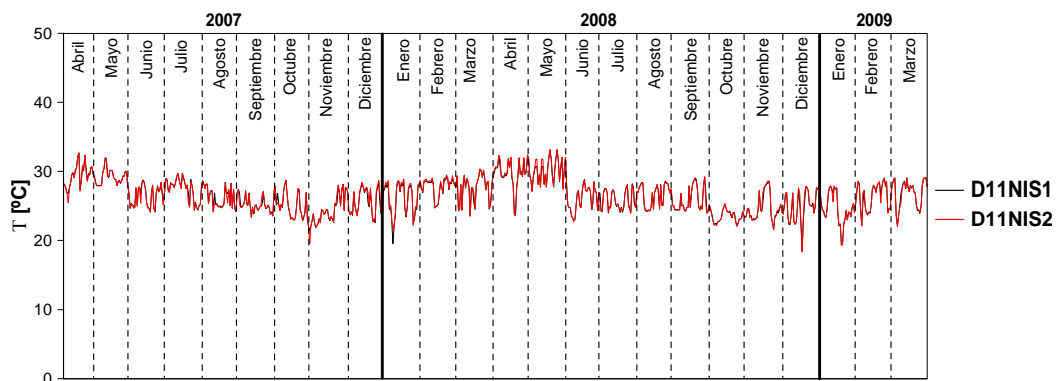


Figura D.32: Temperatura, lecho superior, dovela D11, lado San Cristóbal

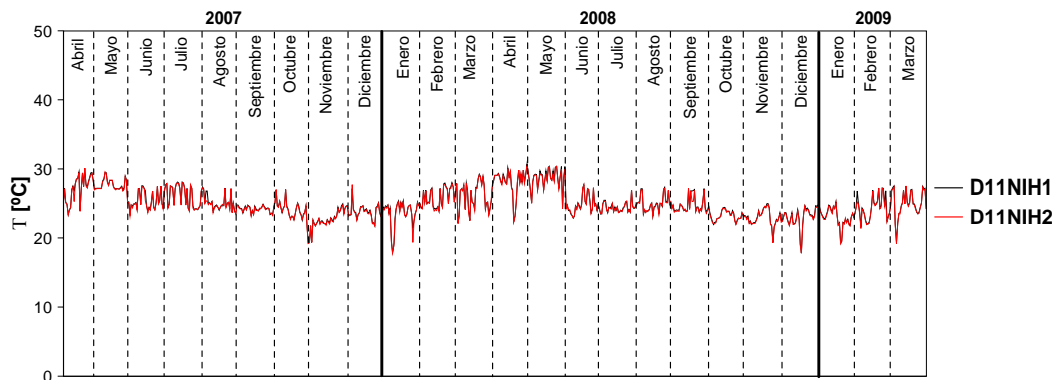


Figura D.33: Temperatura, posición horizontal, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

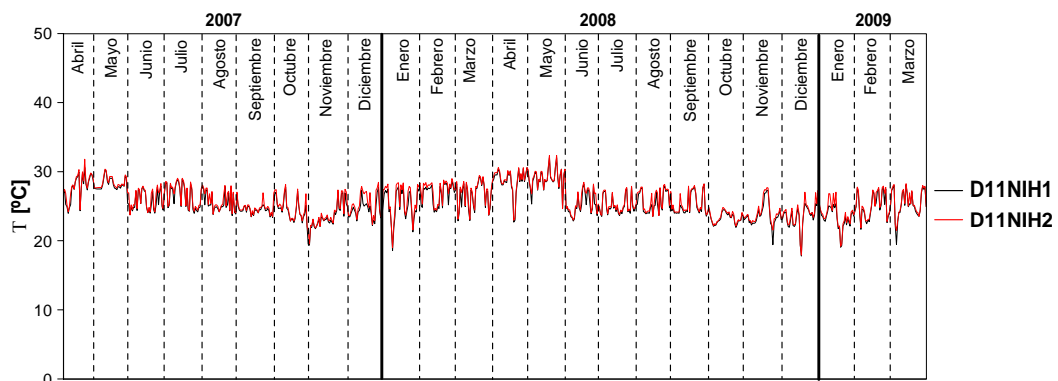


Figura D.34: Temperatura, posición horizontal, dovela D11, lado San Cristóbal

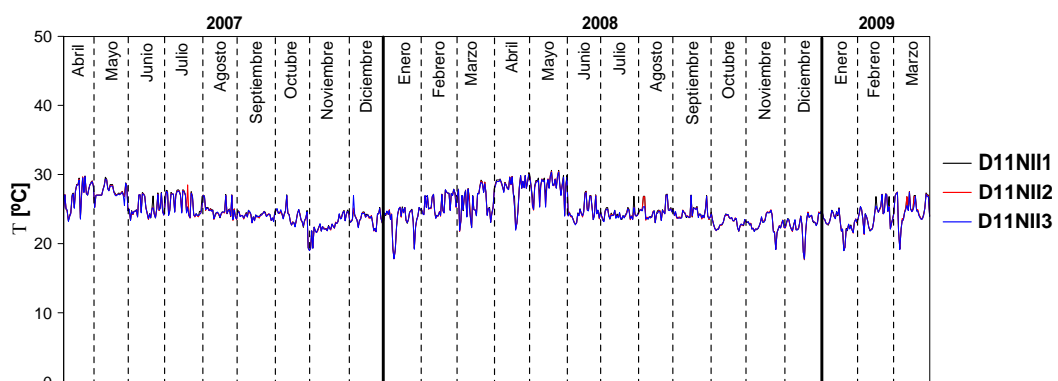


Figura D.35: Temperatura, lecho inferior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

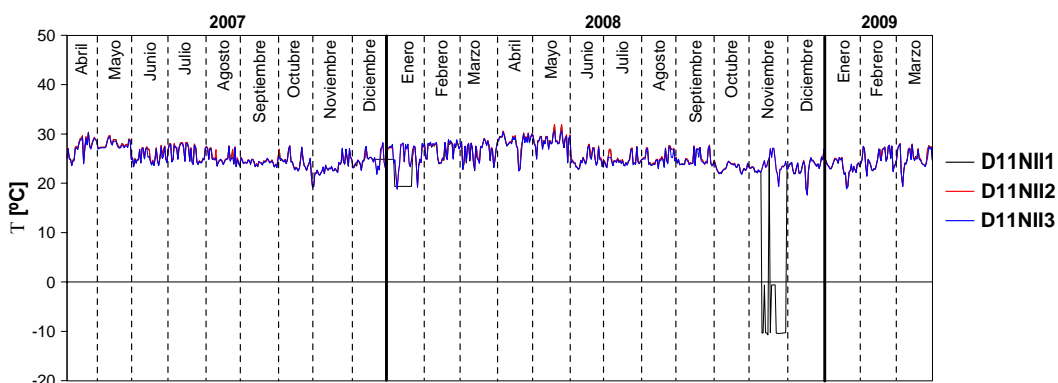


Figura D.36: Temperatura, lecho inferior, dovela D11, lado San Cristóbal

APÉNDICE E. Incrementos de esfuerzo corregidos, medidos a las 8:00 hrs.

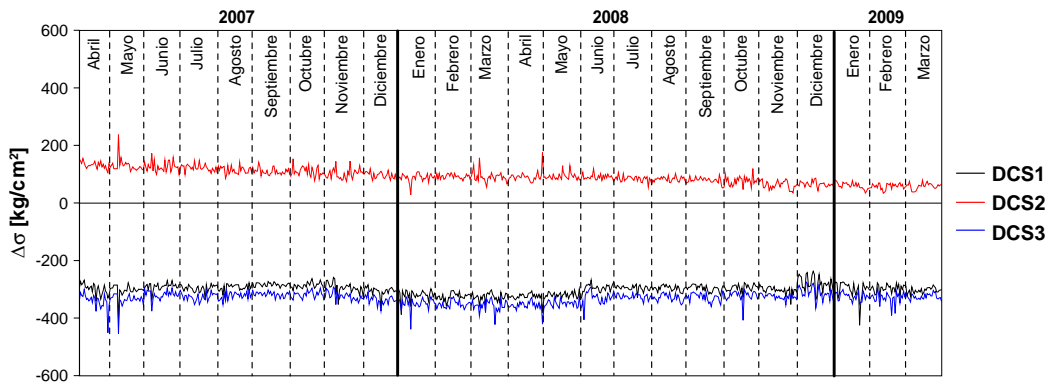


Figura E.1: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela central

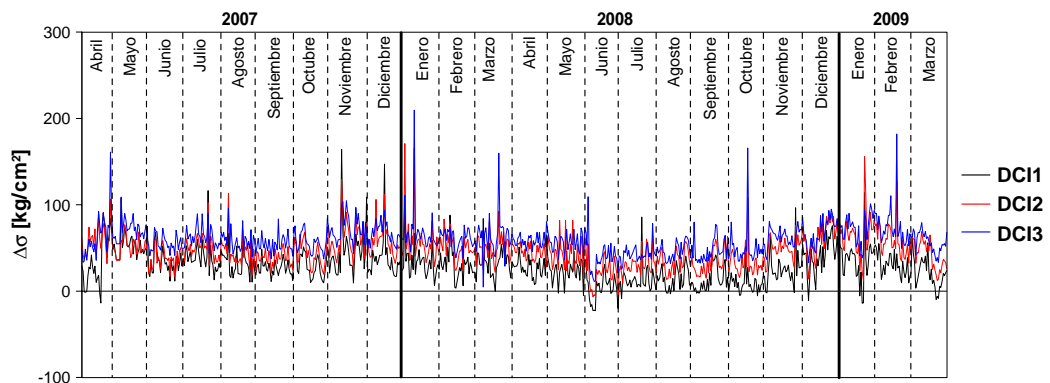


Figura E.2: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela central

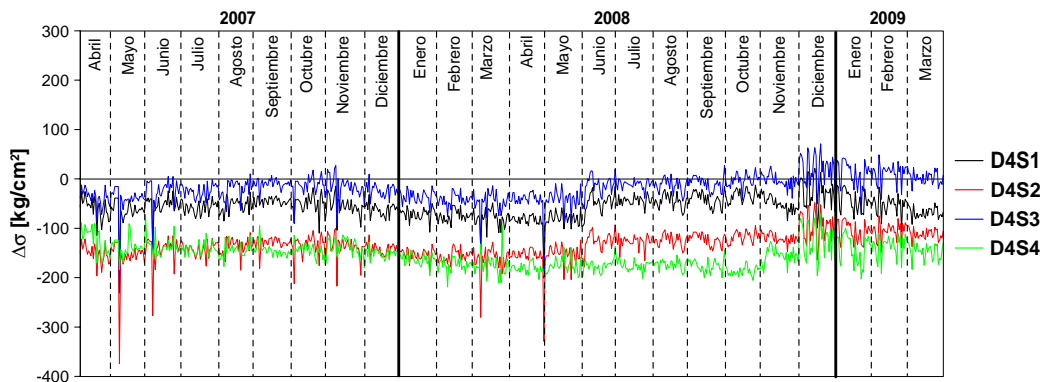


Figura E.3: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

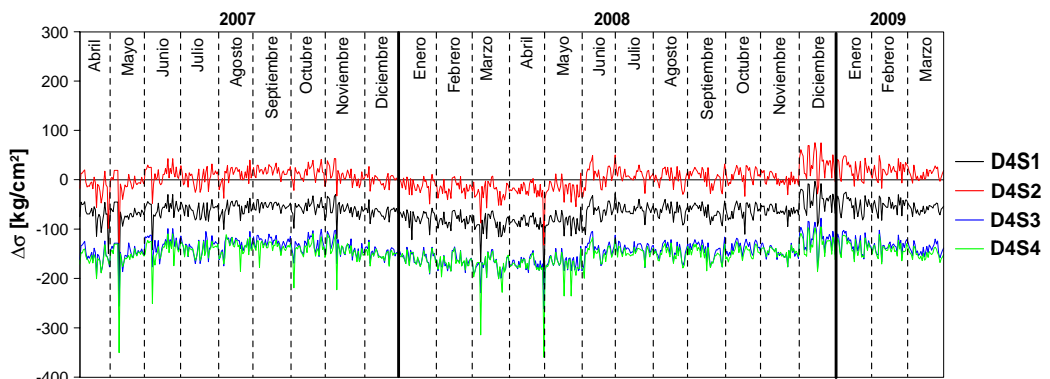


Figura E.4: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D4, lado San Cristóbal

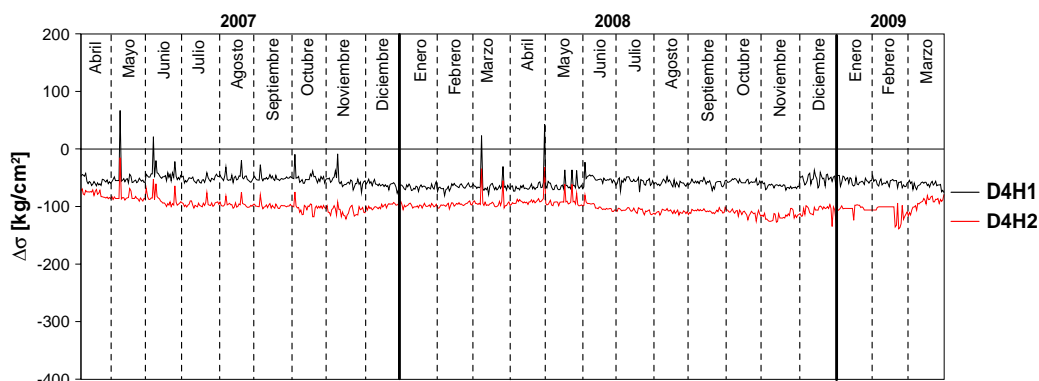


Figura E.5: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

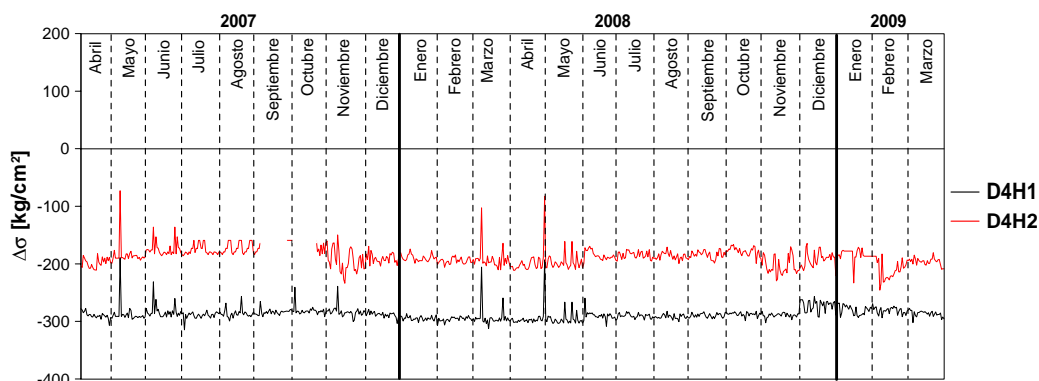


Figura E.6: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D4, lado San Cristóbal

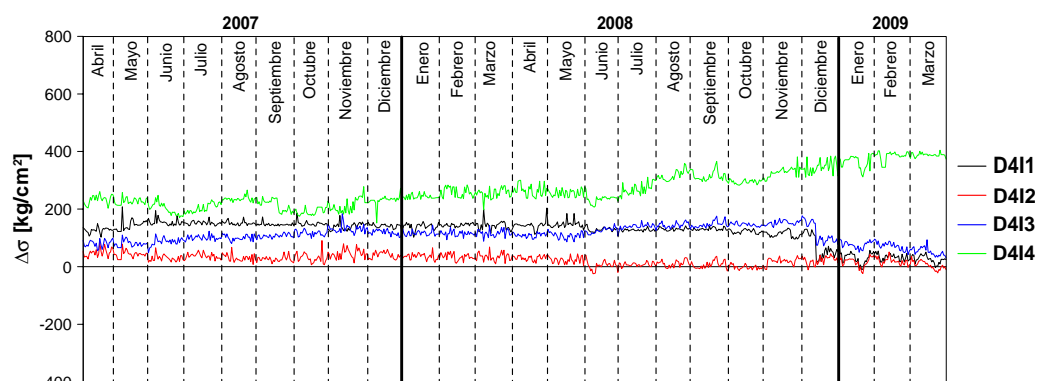


Figura E.7: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

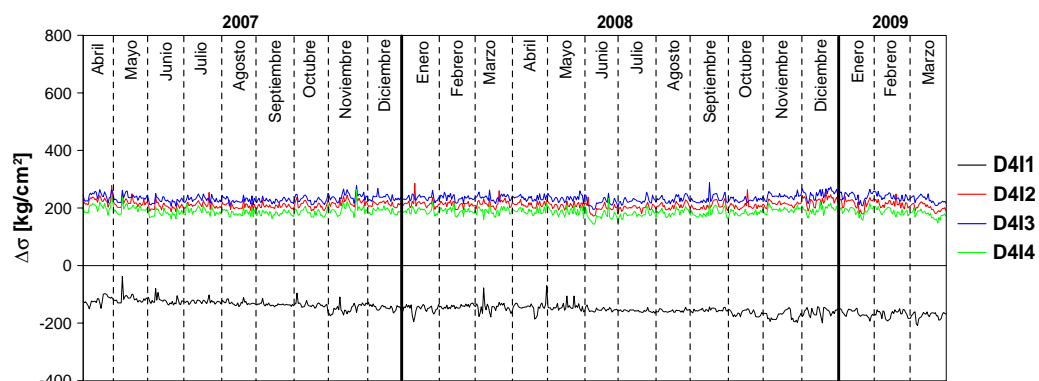


Figura E.8: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D4, lado San Cristóbal

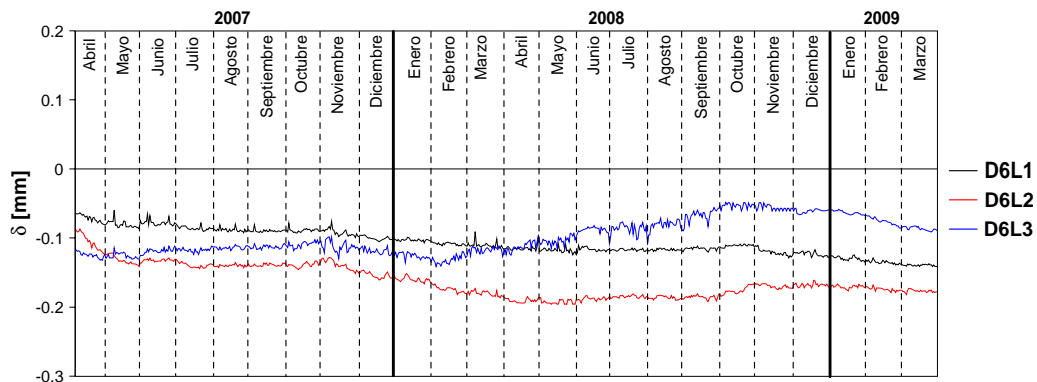


Figura E.9: Desplazamiento relativo, zona de transición, lado Tuxtla Gutiérrez

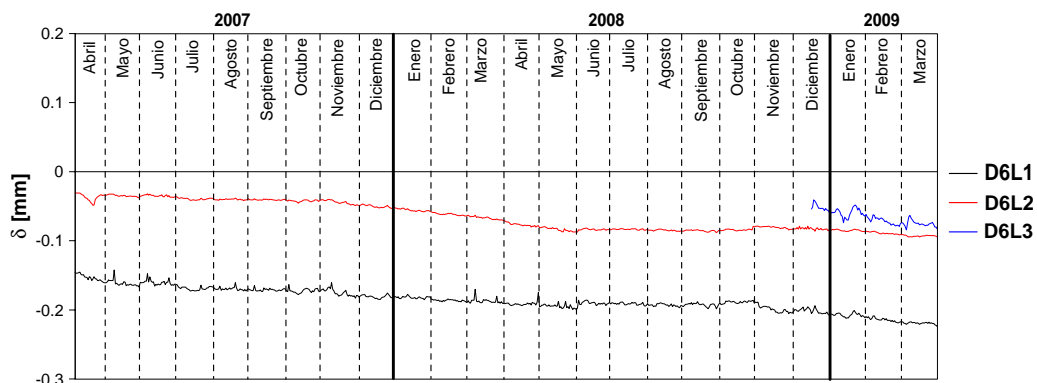


Figura E.10: Desplazamiento relativo, zona de transición, lado San Cristóbal

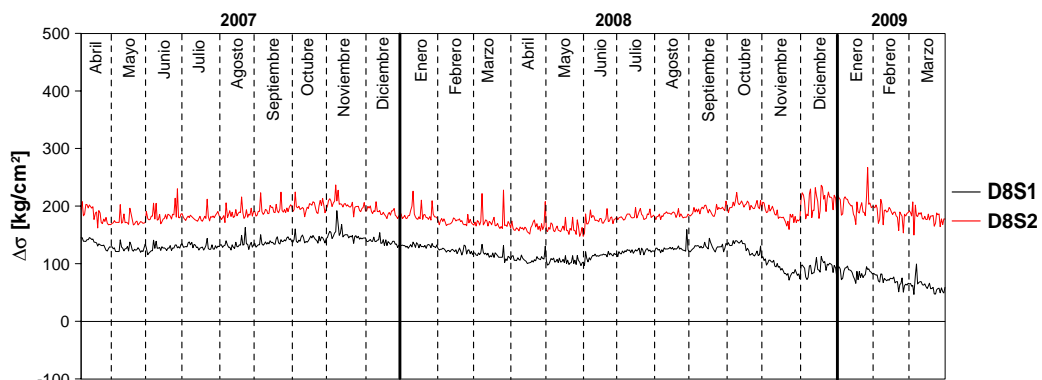


Figura E.11: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

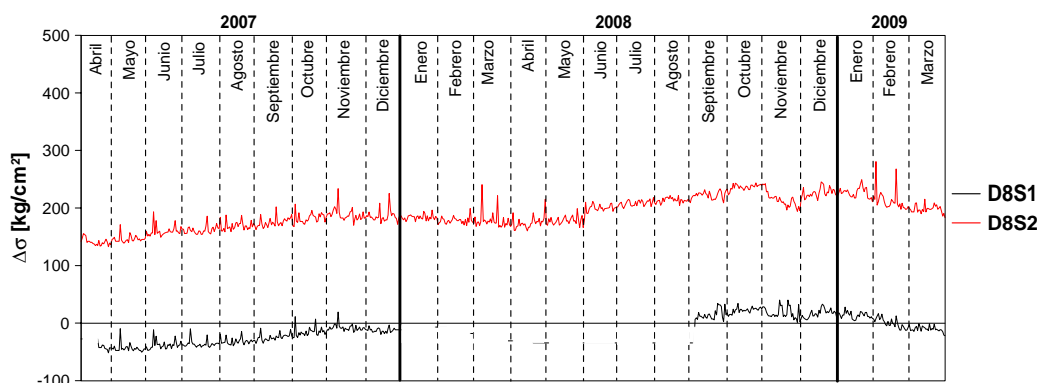


Figura E.12: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

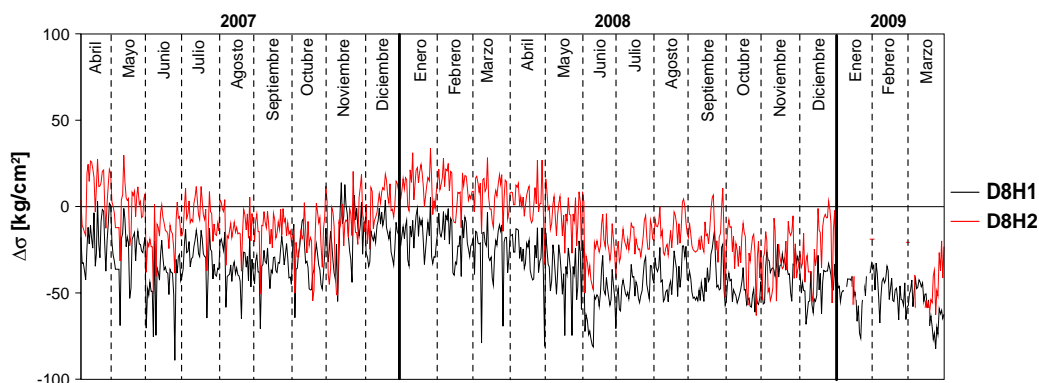


Figura E.13: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

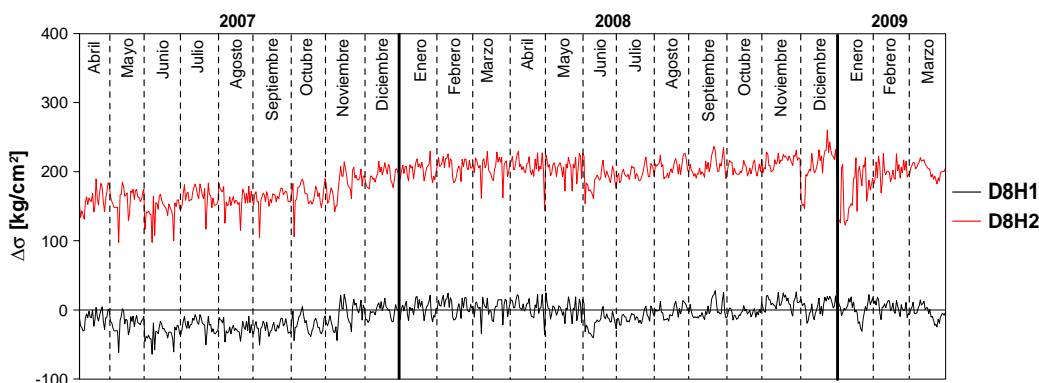


Figura E.14 Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

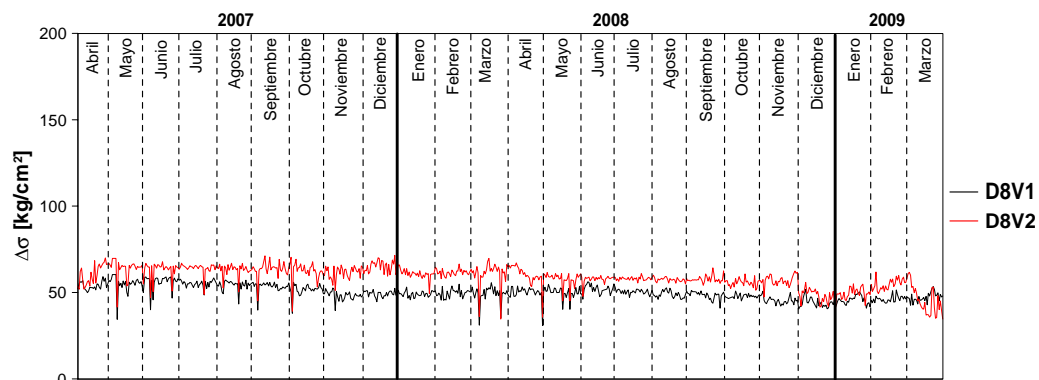


Figura E.15: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

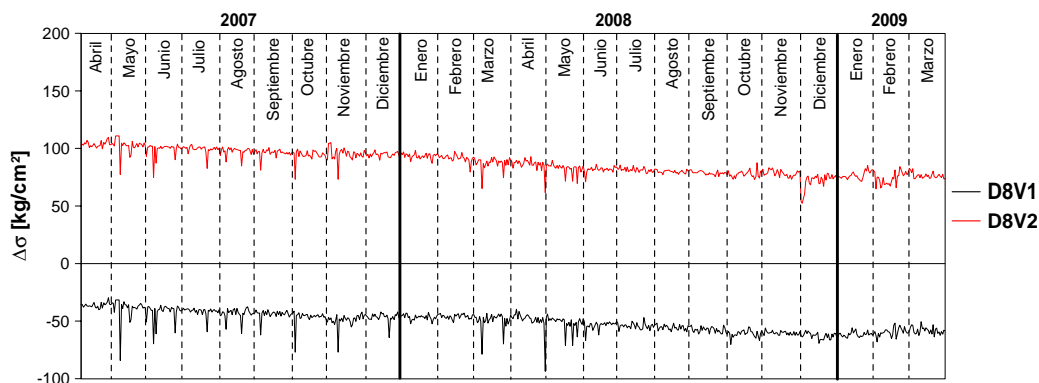


Figura E.16: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

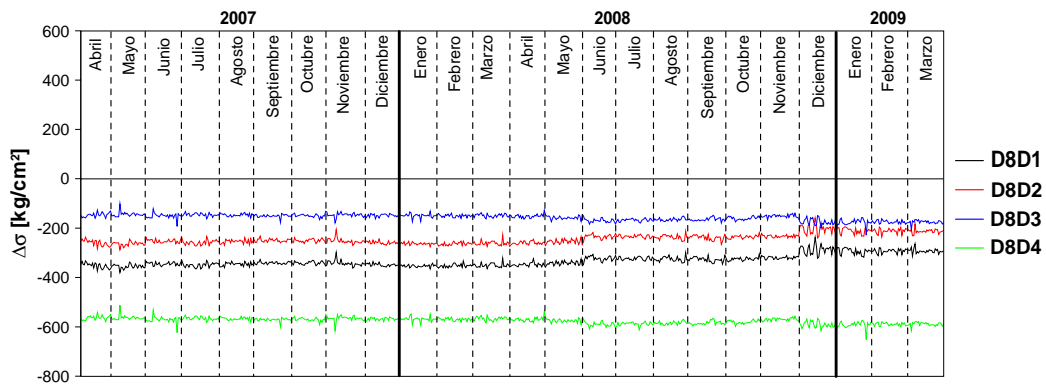


Figura E.17: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

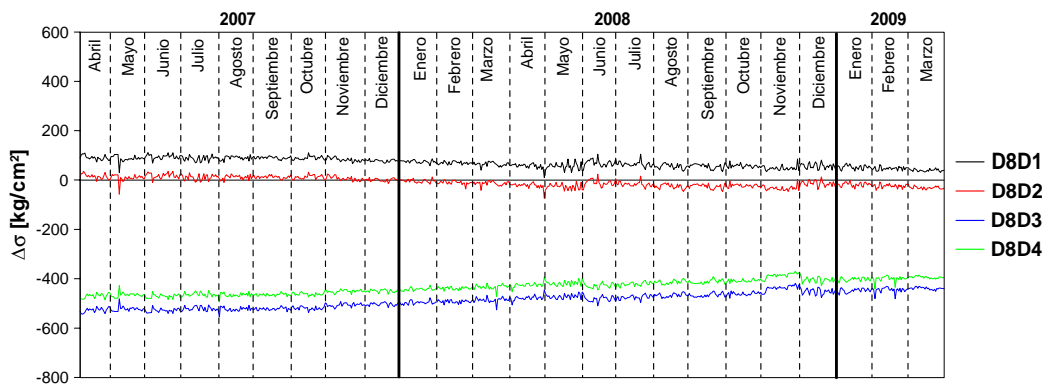


Figura E.18: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

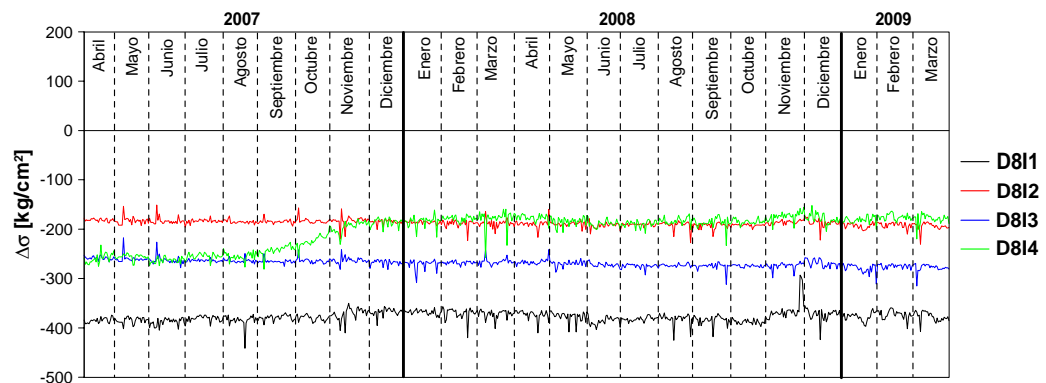


Figura E.19: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

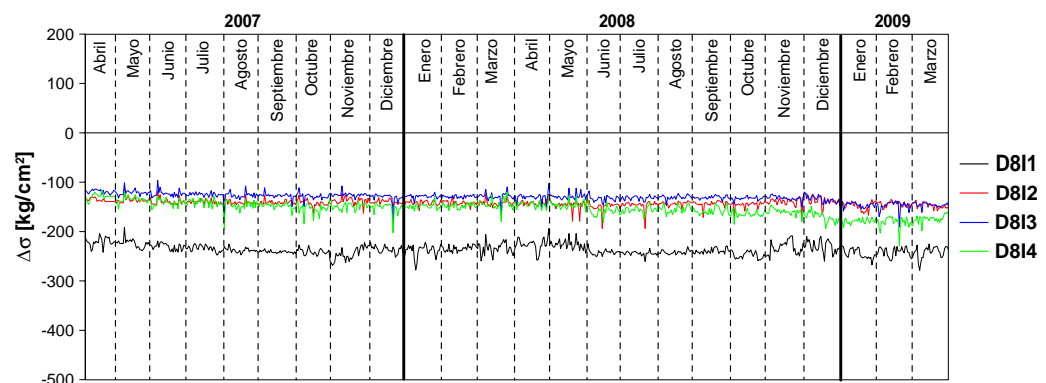


Figura E.20: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

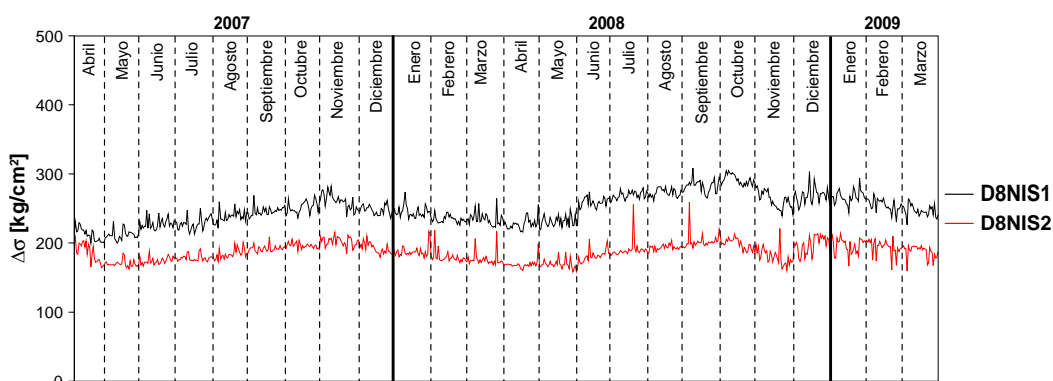


Figura E.21: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

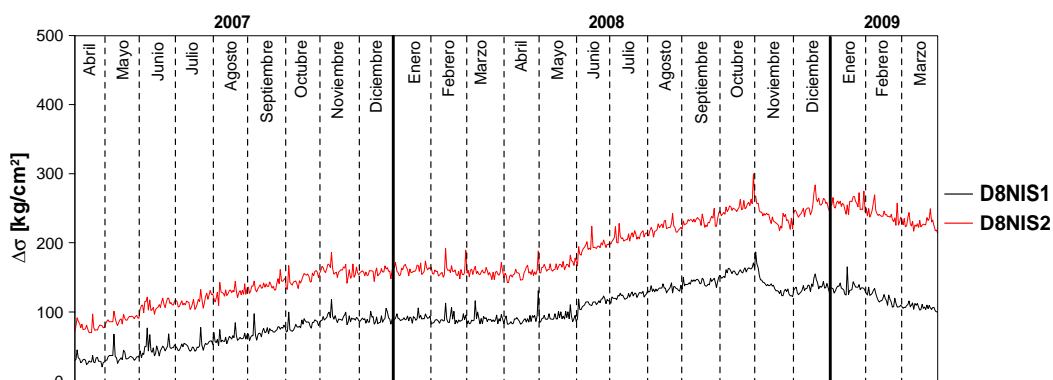


Figura E.22: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

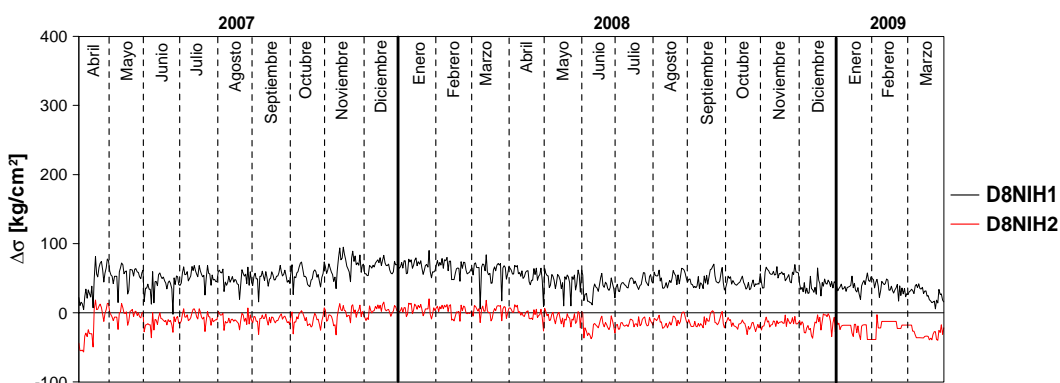


Figura E.23: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

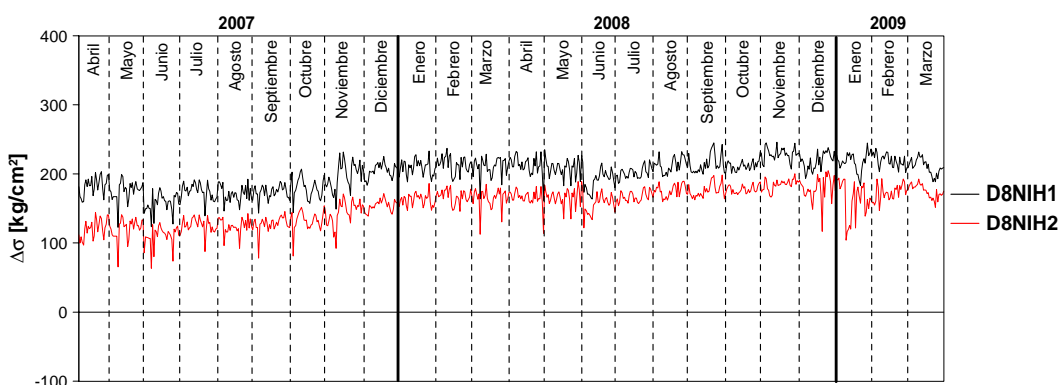


Figura E.24: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

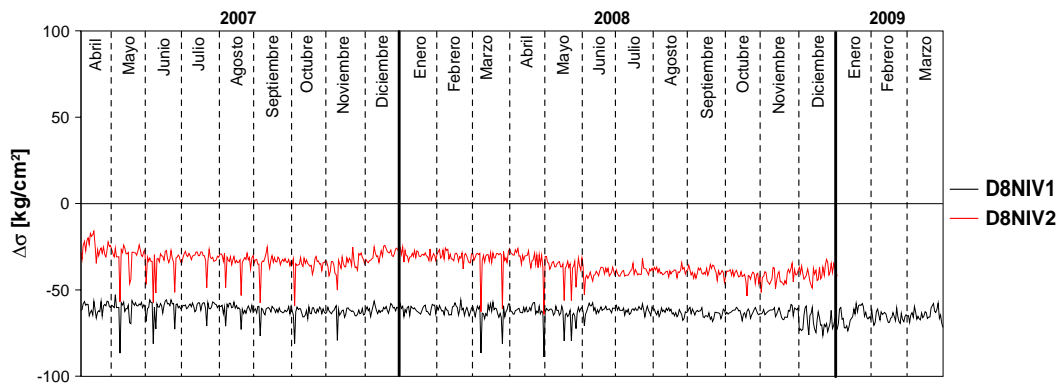


Figura E.25: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

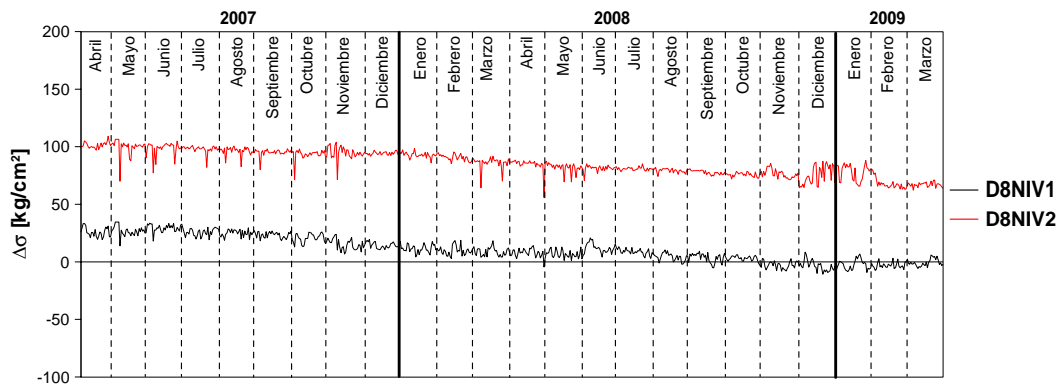


Figura E.26: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

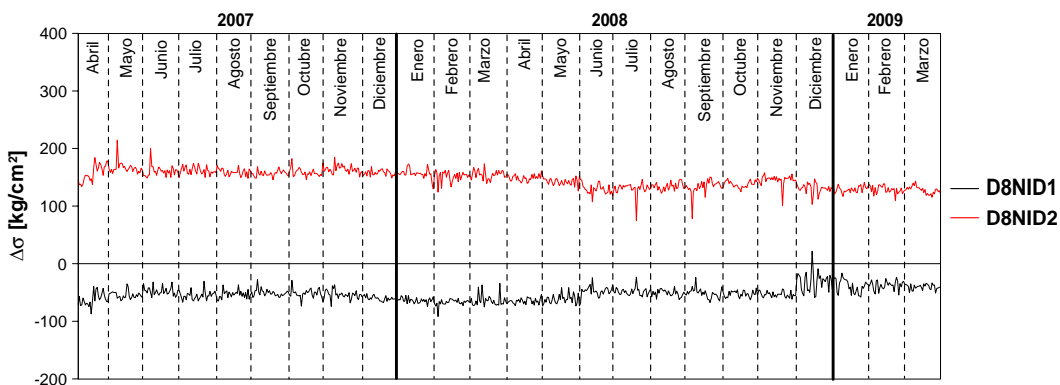


Figura E.27: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

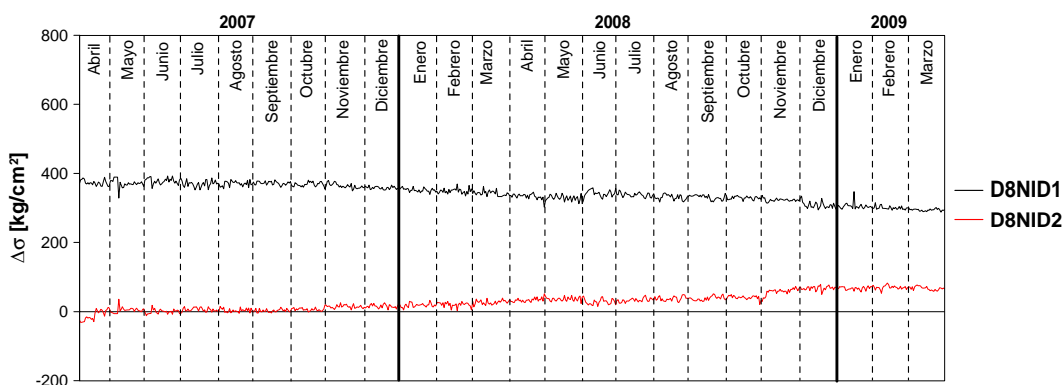


Figura E.28: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

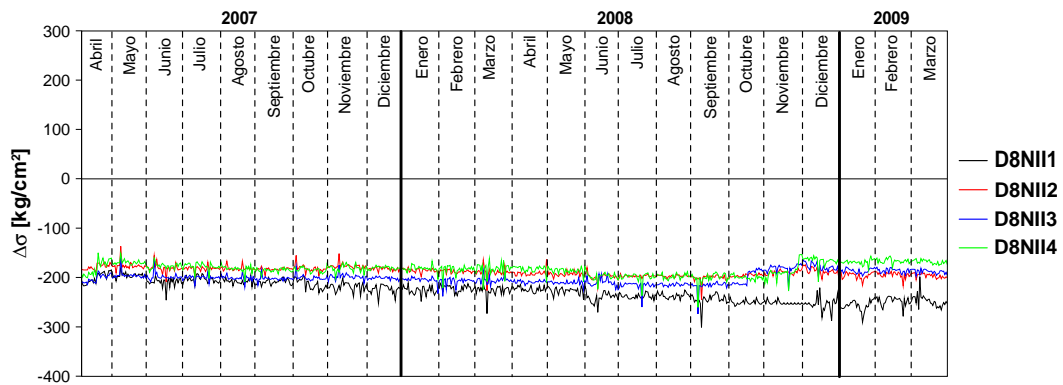


Figura E.29: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

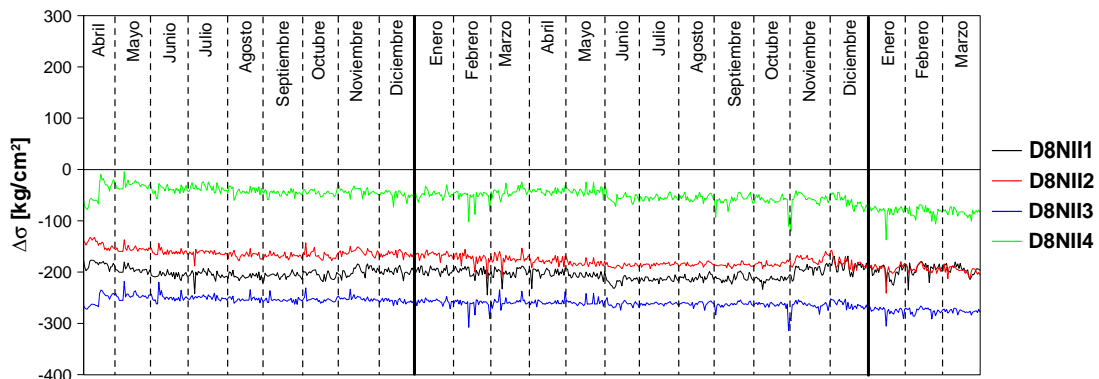


Figura E.30: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

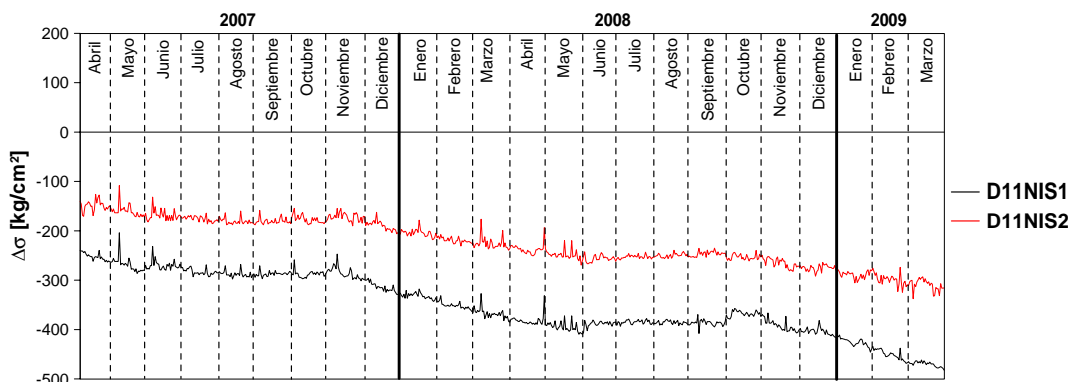


Figura E.31: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

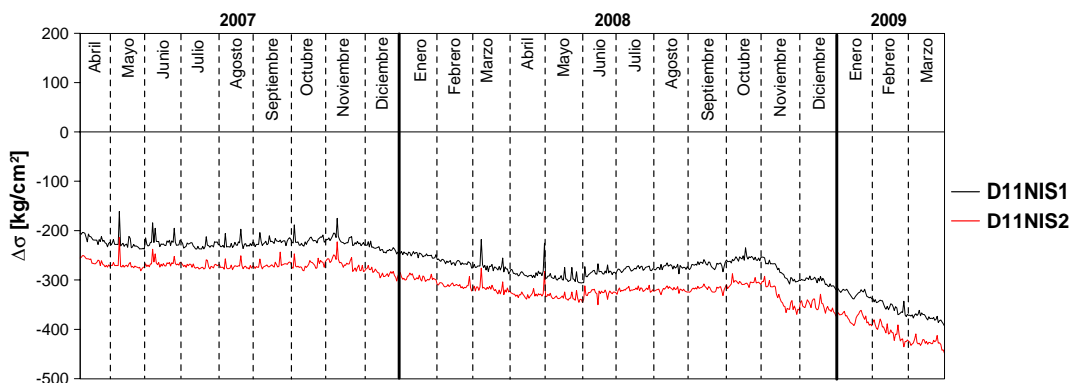


Figura E.32: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D11, lado San Cristóbal

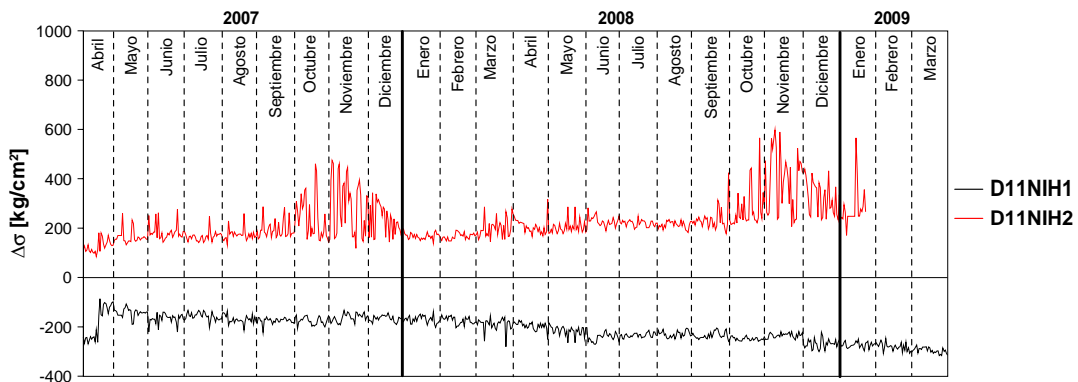


Figura E.33: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

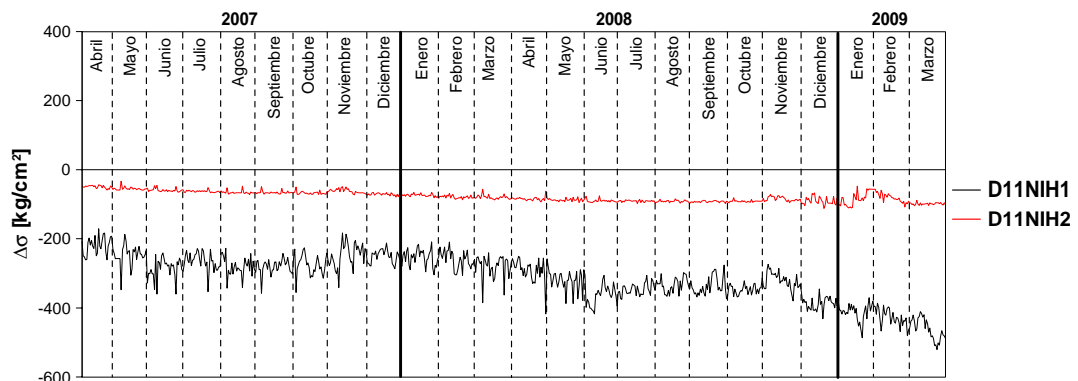


Figura E.34: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D11, lado San Cristóbal

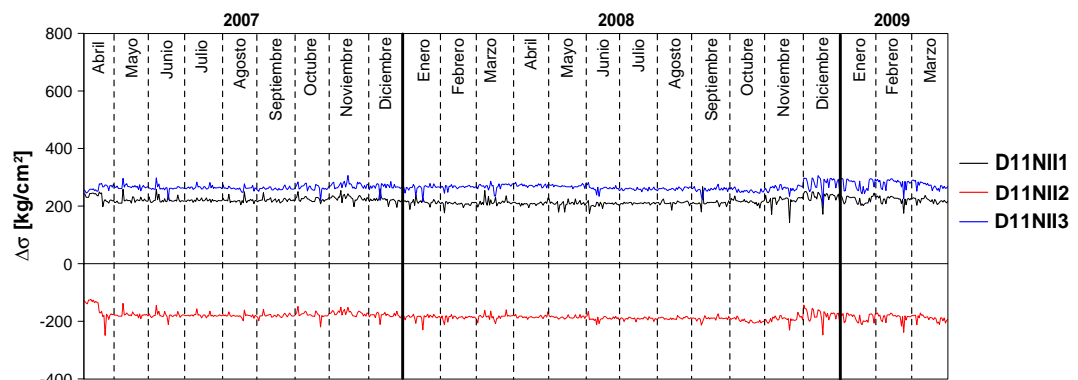


Figura E.35: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

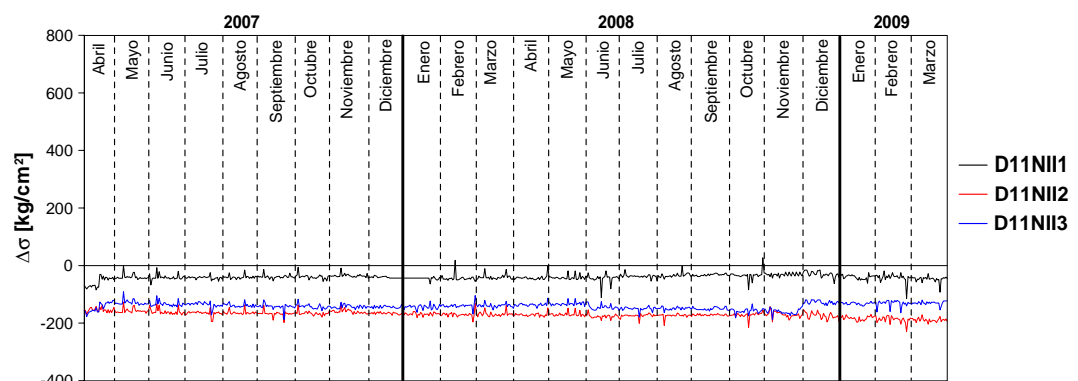


Figura E.36: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D11, lado San Cristóbal

APÉNDICE F. Incrementos de esfuerzo corregidos, medidos a las 20:00 hrs.

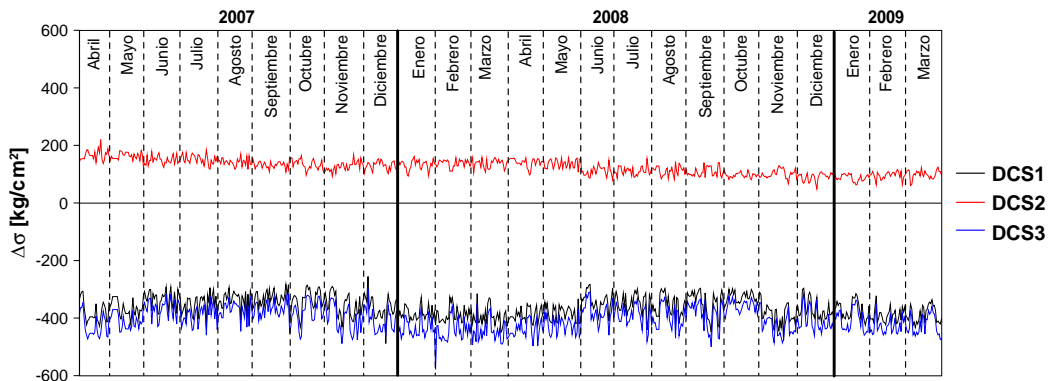


Figura F.1: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela central

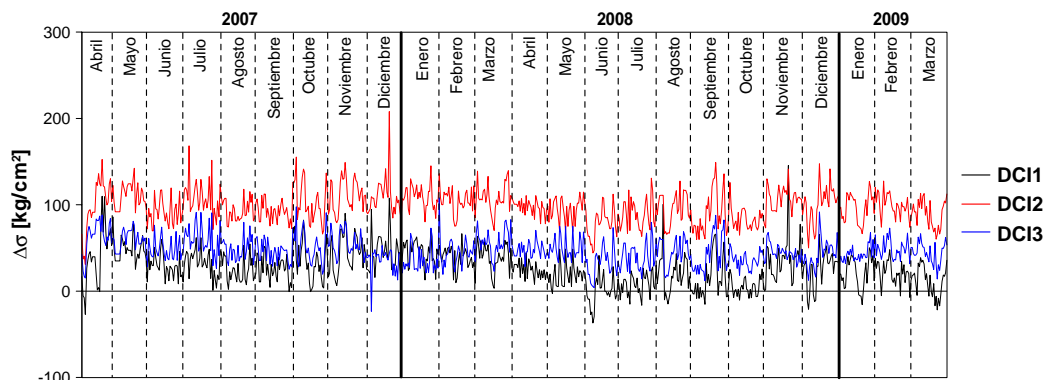


Figura F.2: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela central

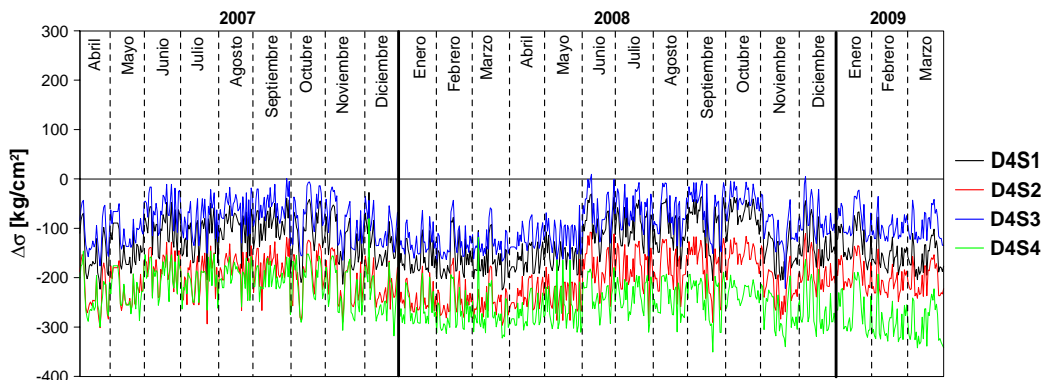


Figura F.3: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

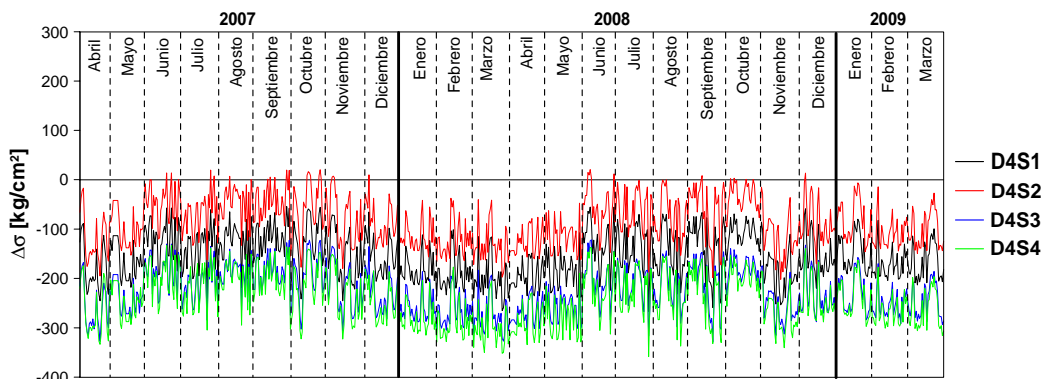


Figura F.4: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D4, lado San Cristóbal

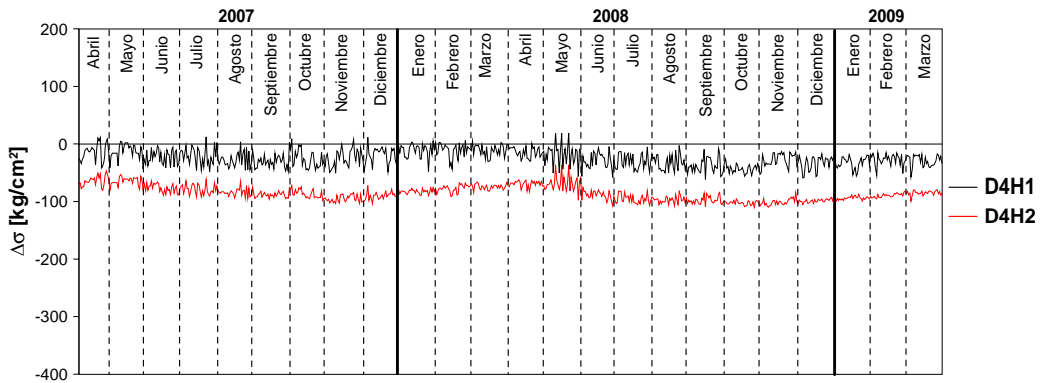


Figura F.5: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

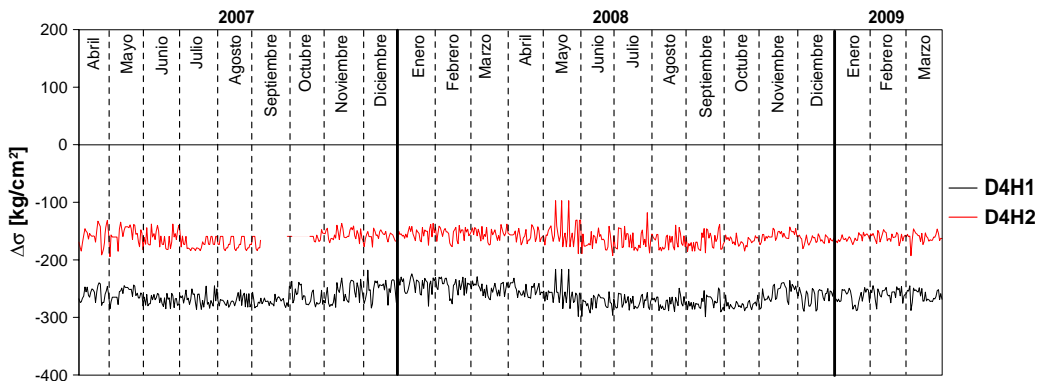


Figura F.6: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D4, lado San Cristóbal

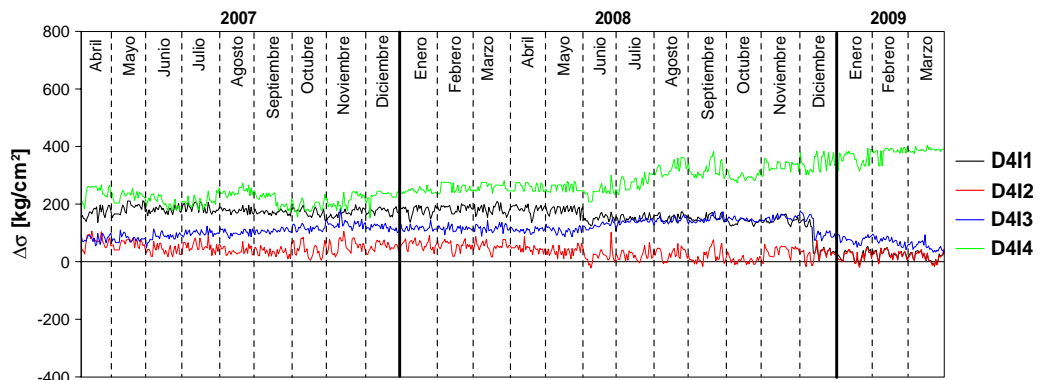


Figura F.7: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

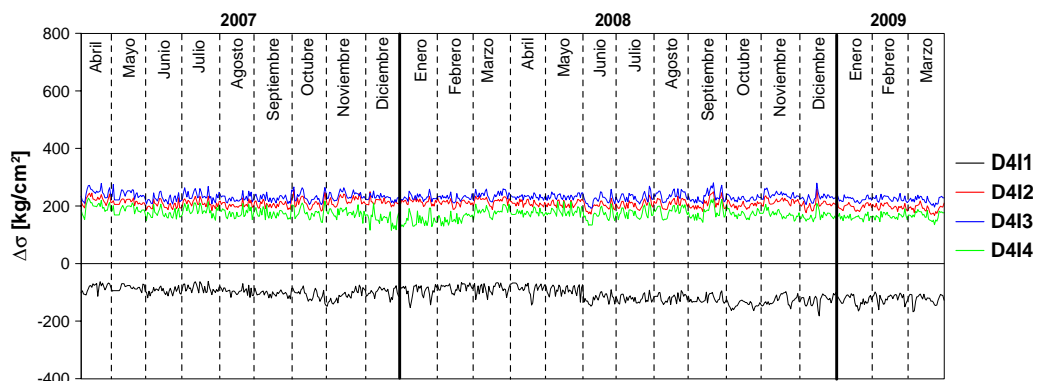


Figura F.8: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D4, lado San Cristóbal

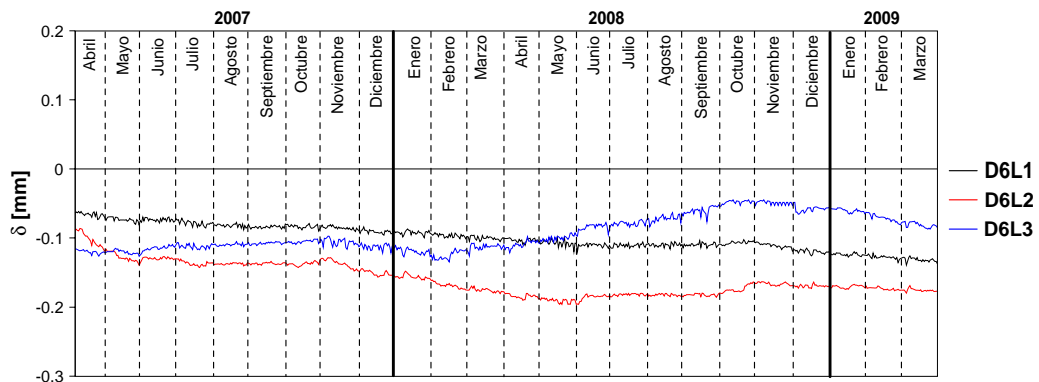


Figura F.9: Desplazamiento relativo, zona de transición, lado Tuxtla Gutiérrez

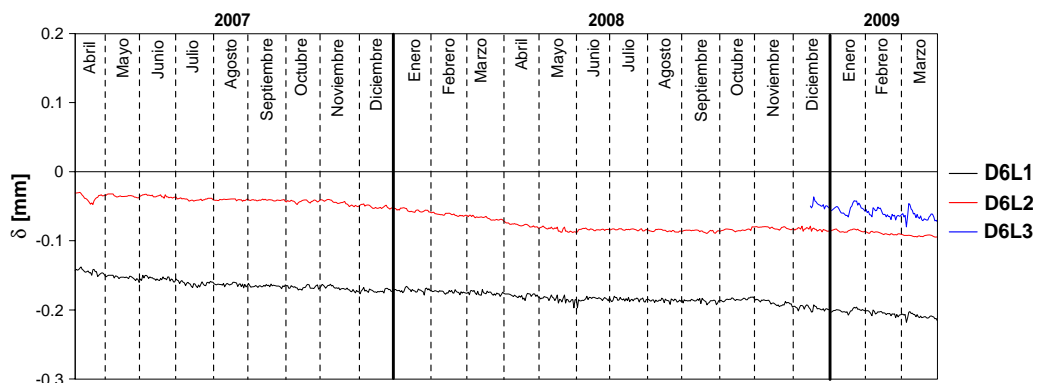


Figura F.10: Desplazamiento relativo, zona de transición, lado San Cristóbal

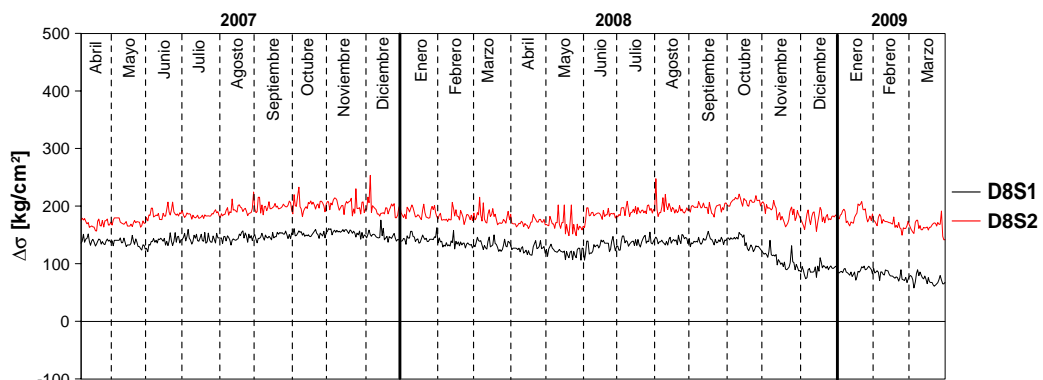


Figura F.11: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

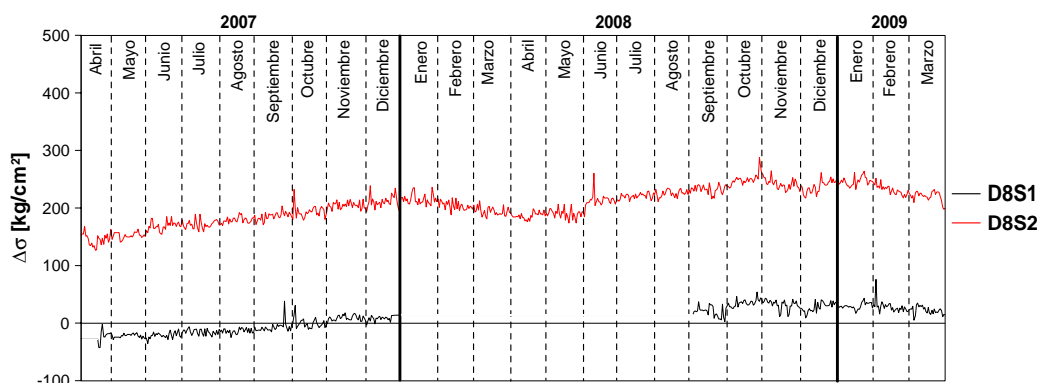


Figura F.12: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

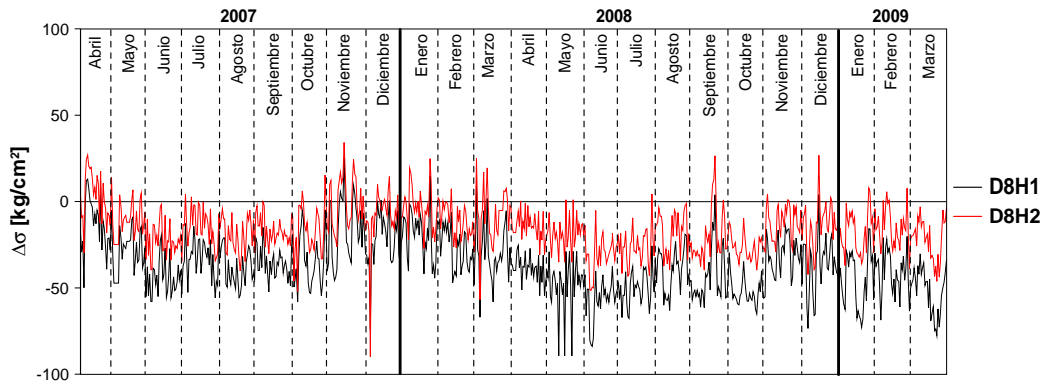


Figura F.13: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

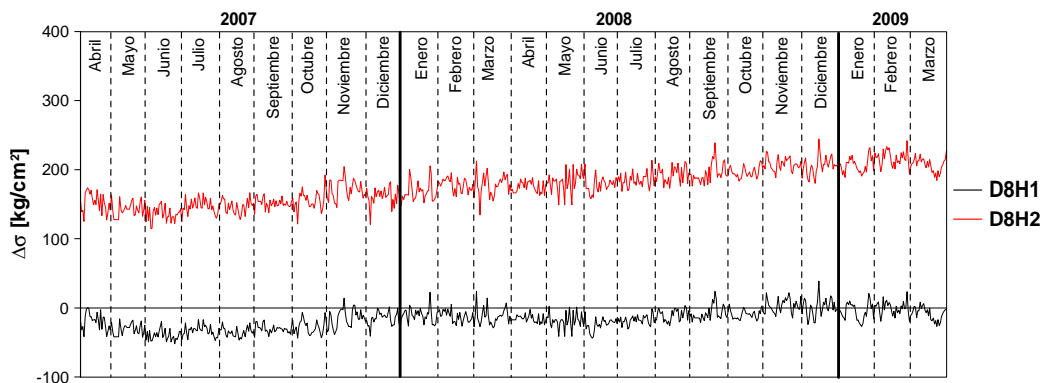


Figura F.14 Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

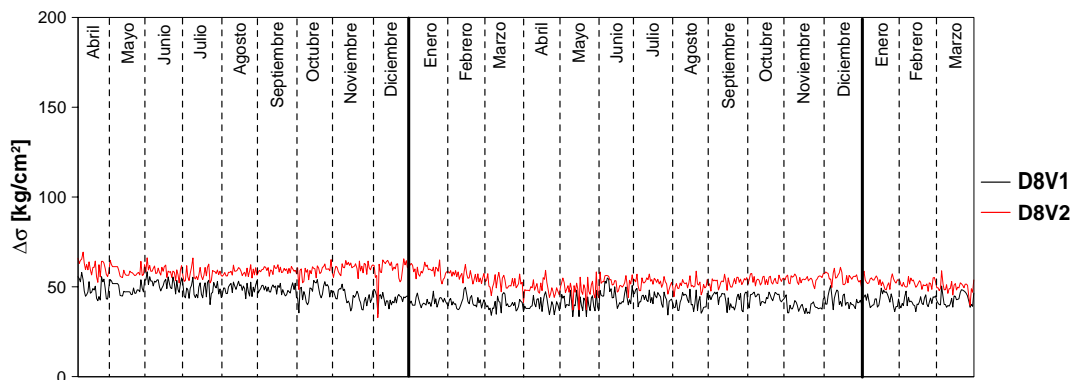


Figura F.15: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

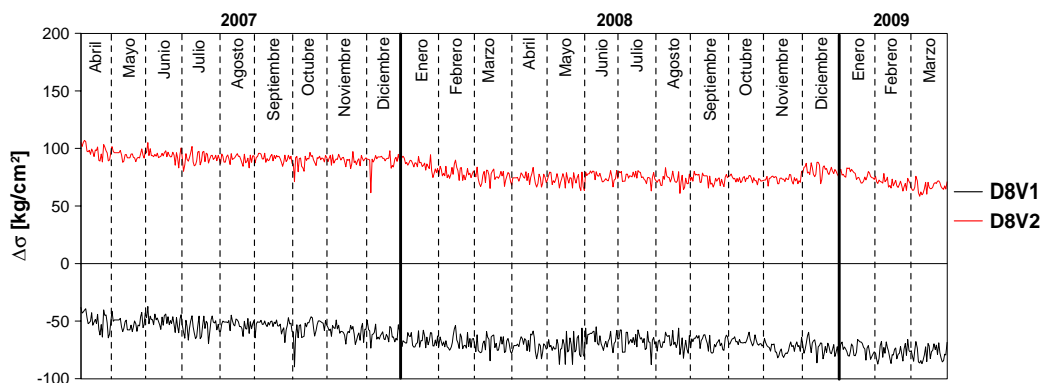


Figura F.16: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

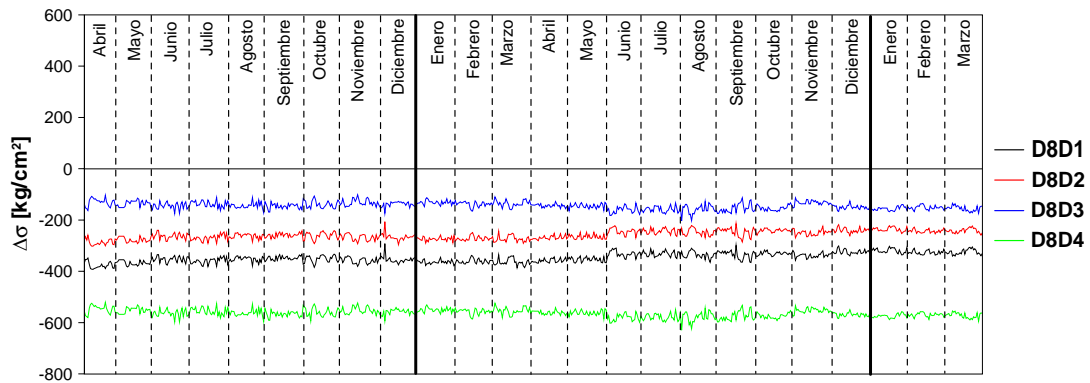


Figura F.17: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

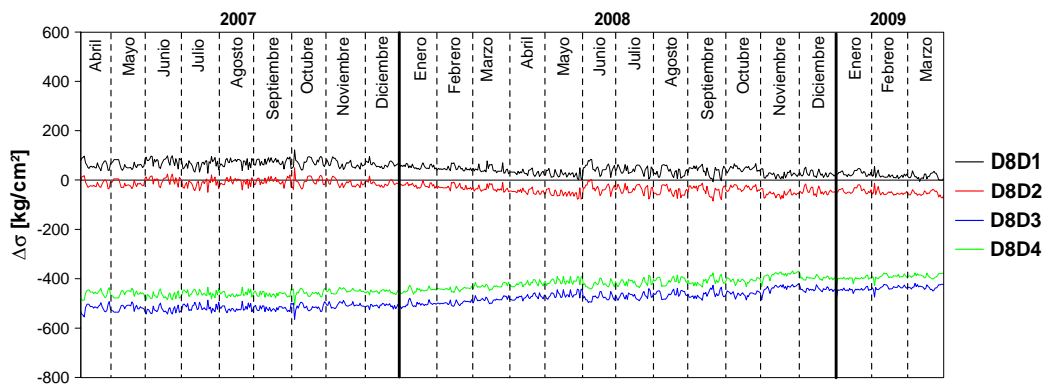


Figura F.18: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

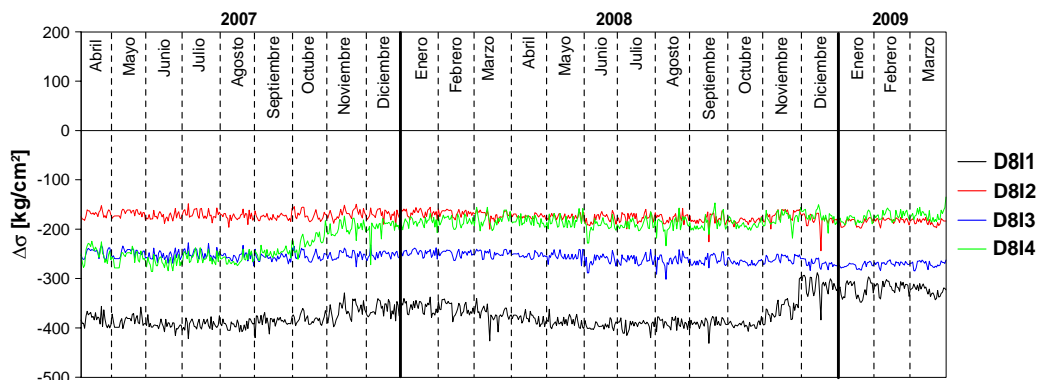


Figura F.19: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

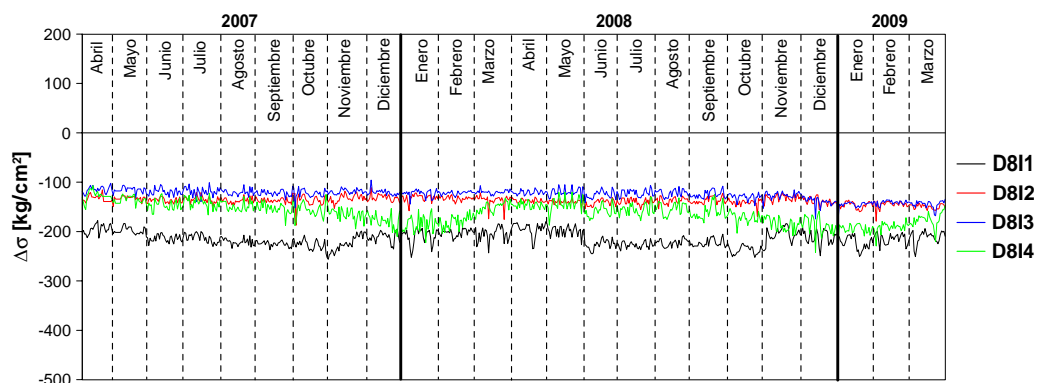


Figura F.20: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

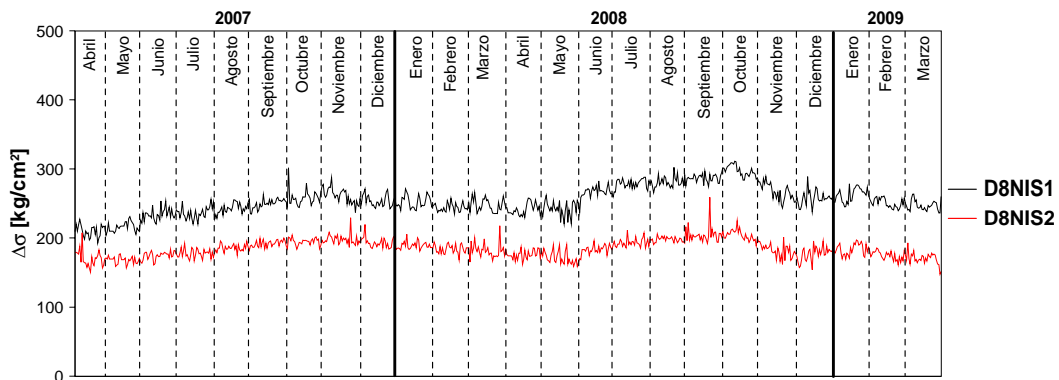


Figura F.21: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

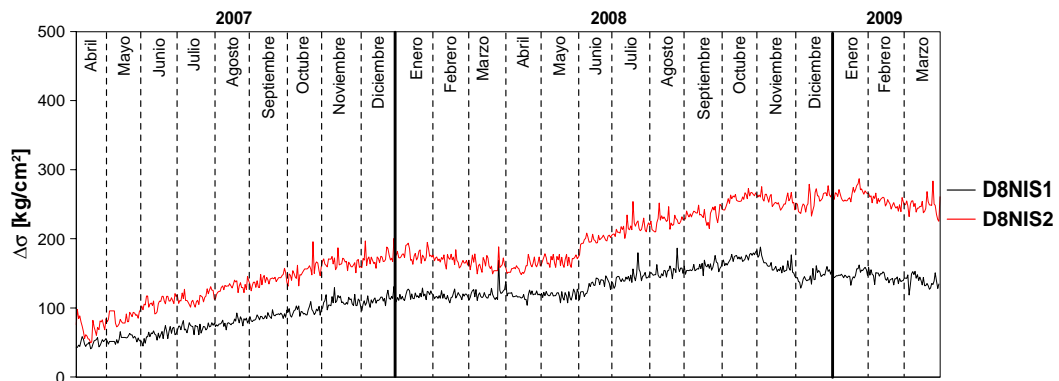


Figura F.22: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

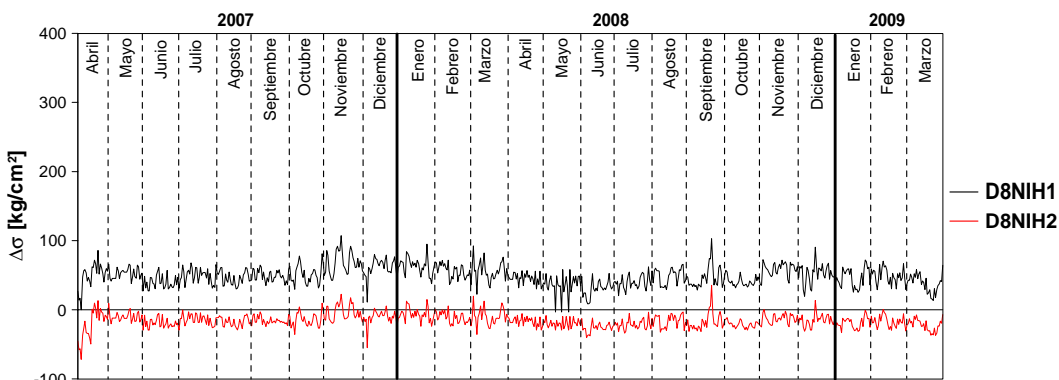


Figura F.23: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

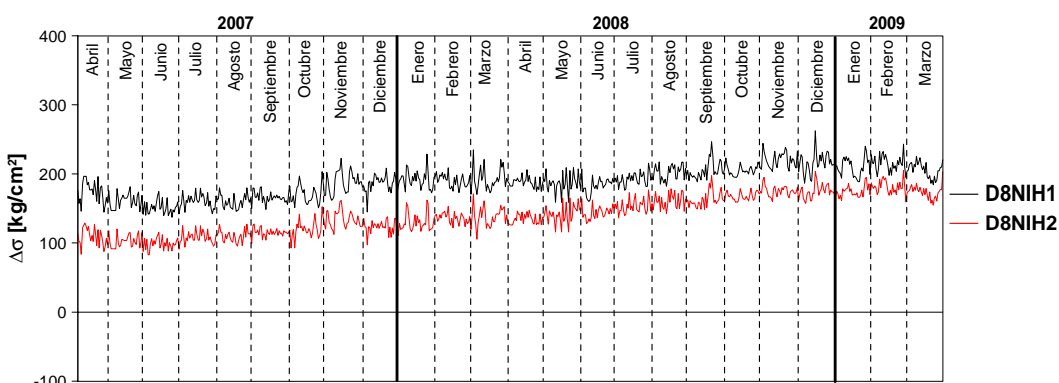


Figura F.24: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

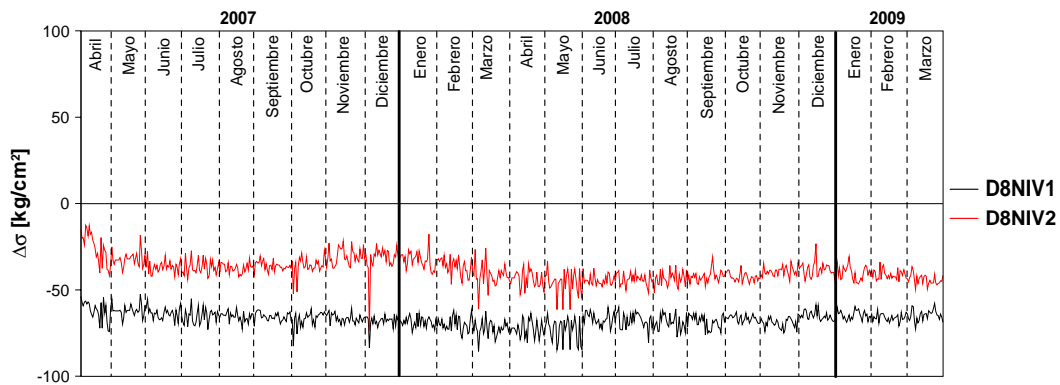


Figura F.25: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

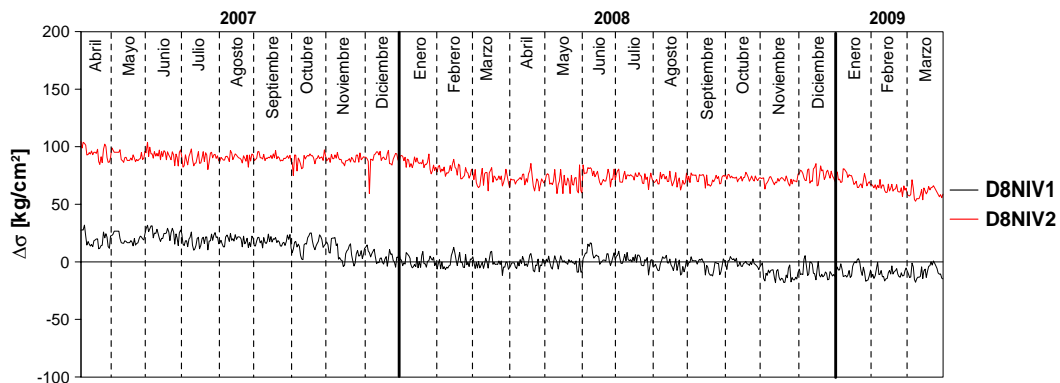


Figura F.26: Incremento de esfuerzo, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

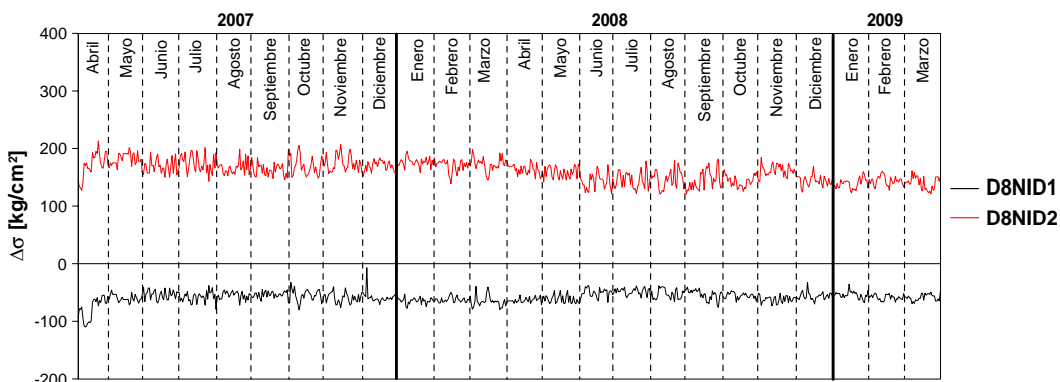


Figura F.27: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

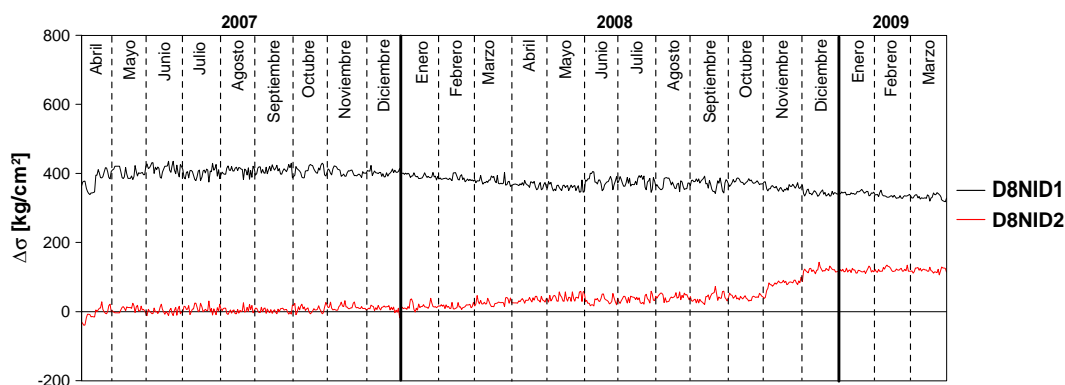


Figura F.28: Incremento de esfuerzo, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

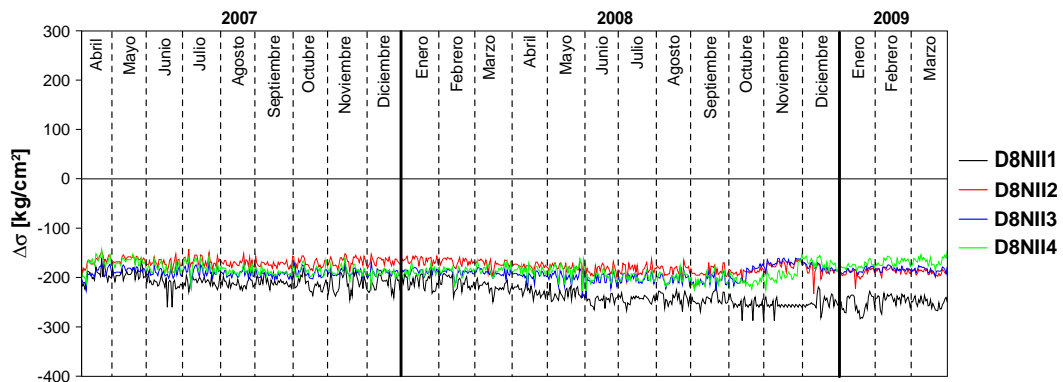


Figura F.29: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

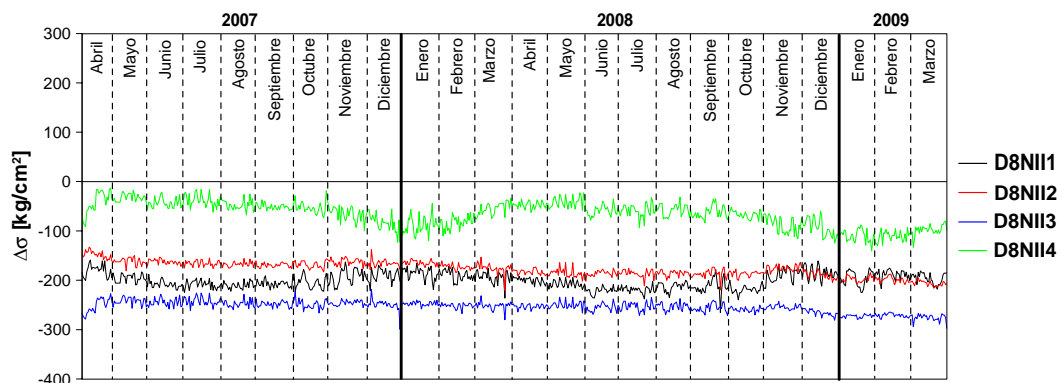


Figura F.30: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

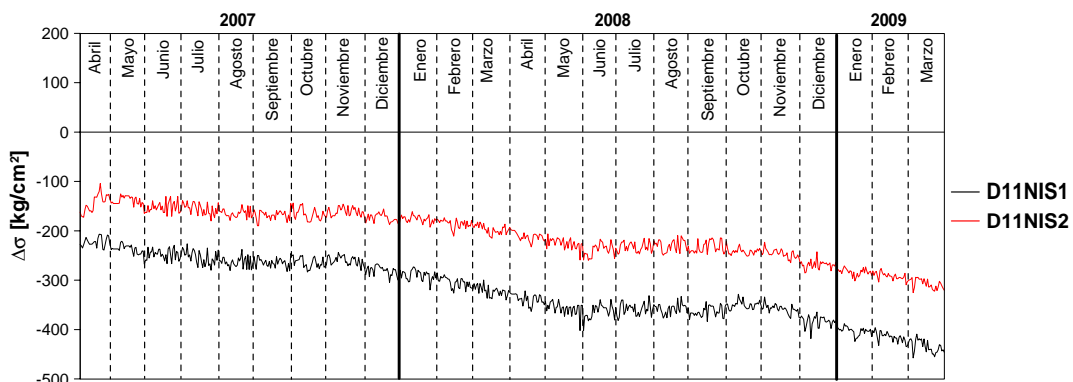


Figura F.31: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

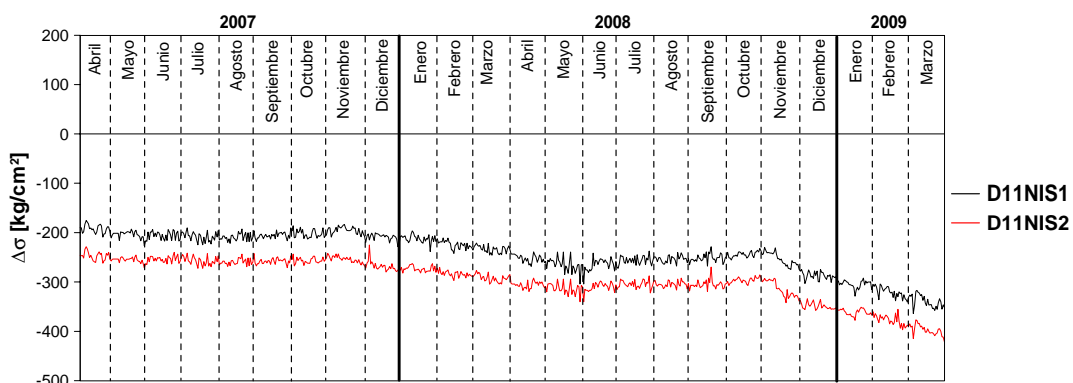


Figura F.32: Incremento de esfuerzo, lecho superior, dovela D11, lado San Cristóbal

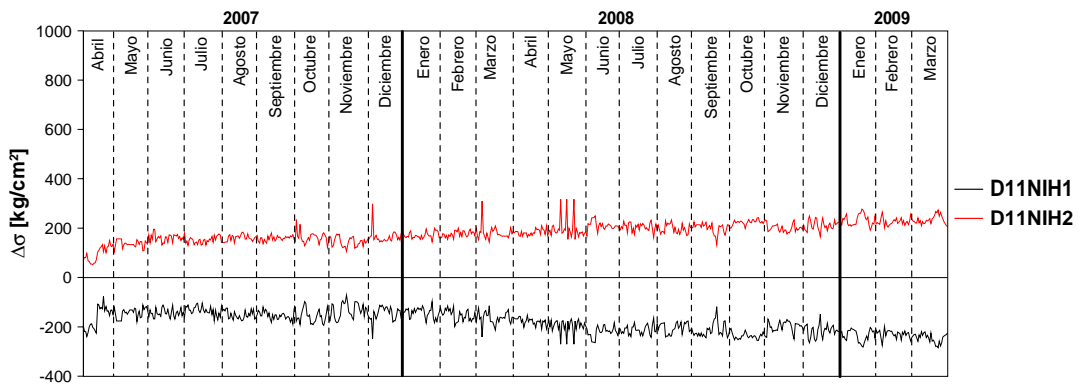


Figura F.33: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

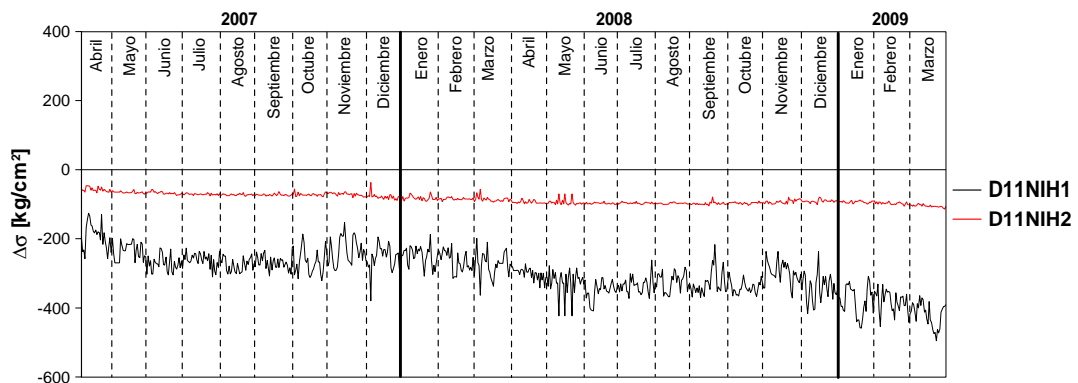


Figura F.34: Incremento de esfuerzo, posición horizontal, dovela D11, lado San Cristóbal

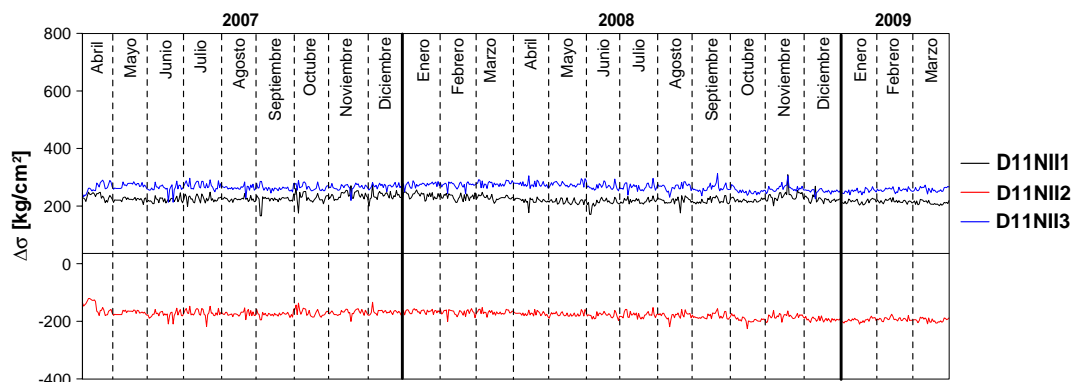


Figura F.35: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

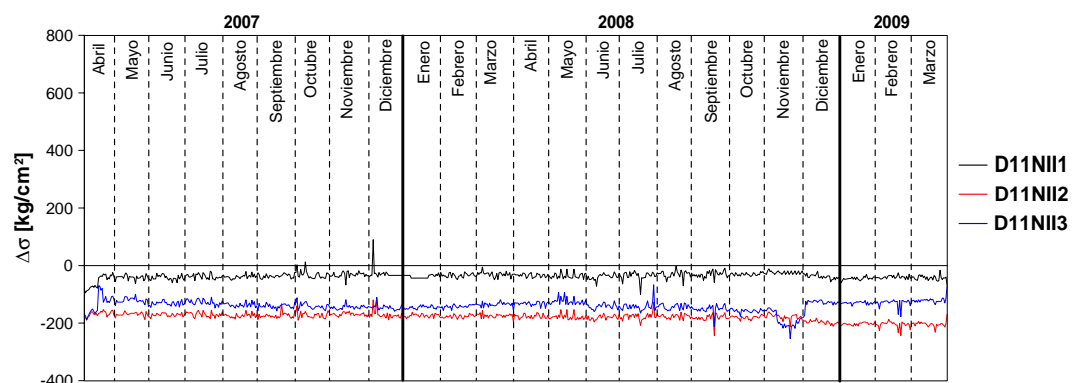


Figura F.36: Incremento de esfuerzo, lecho inferior, dovela D11, lado San Cristóbal

APÉNDICE G. Temperaturas corregidas, medidas a las 8:00 hrs.

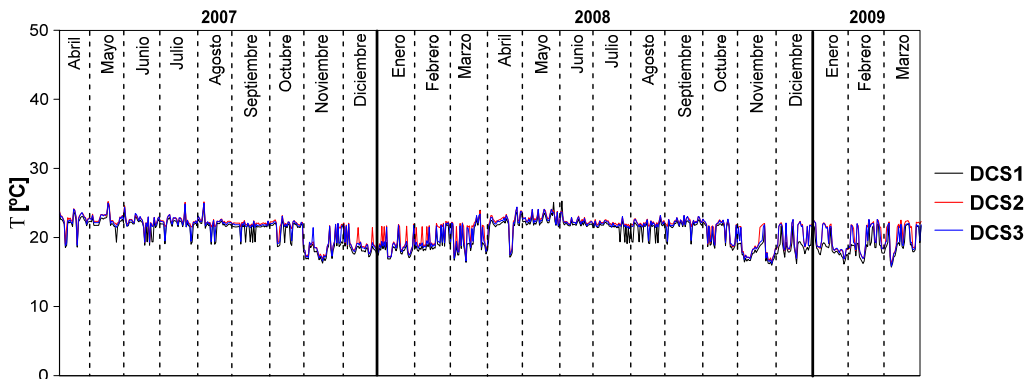


Figura G.1: Temperatura, lecho superior, dovela central

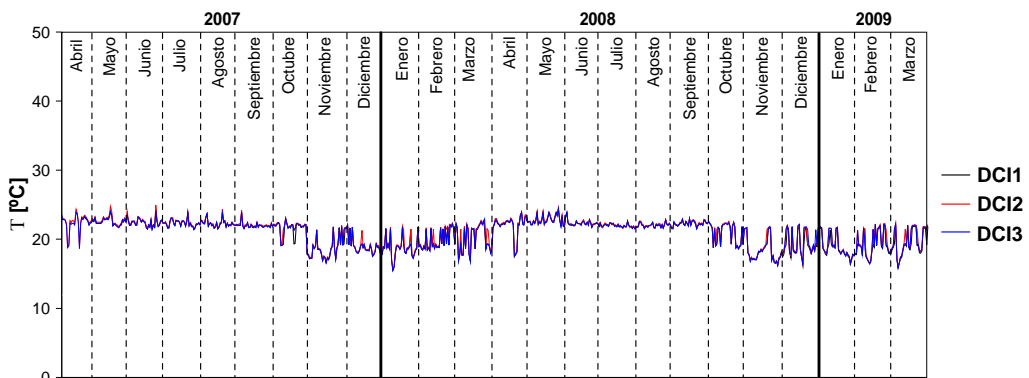


Figura G.2: Temperatura, lecho inferior, dovela central

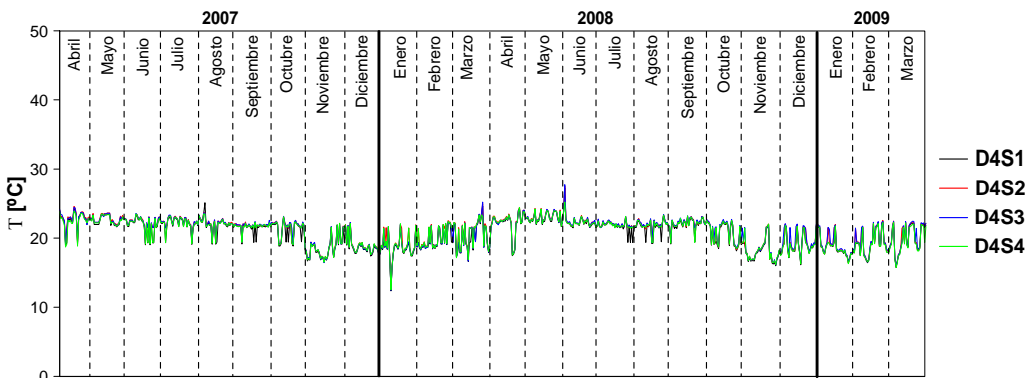


Figura G.3: Temperatura, lecho superior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

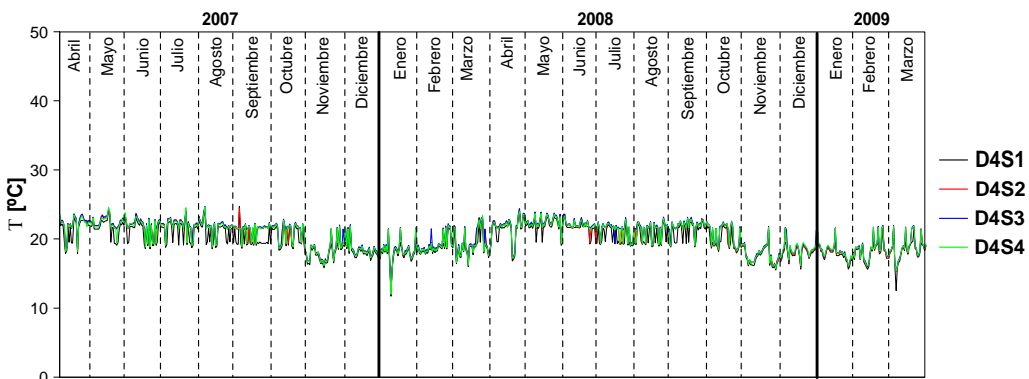


Figura G.4: Temperatura, lecho superior, dovela D4, lado San Cristóbal

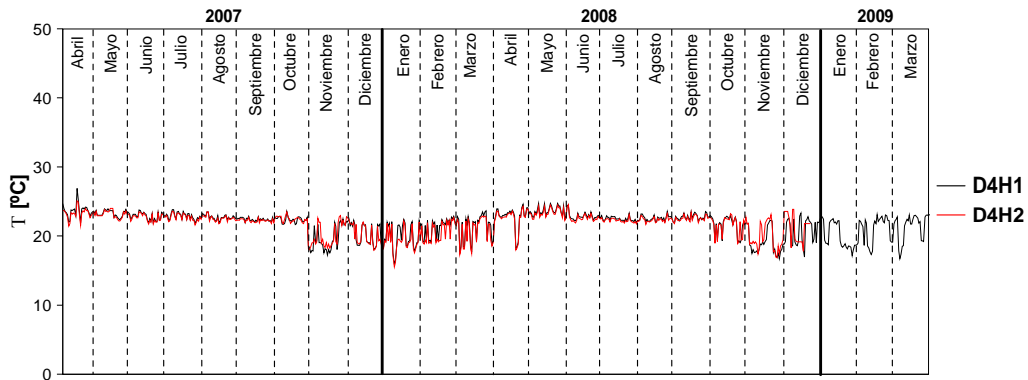


Figura G.5: Temperatura, posición horizontal, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

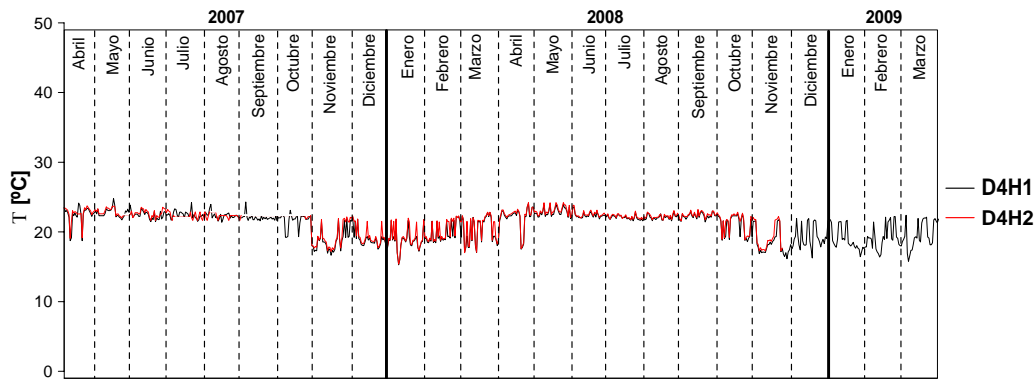


Figura G.6: Temperatura, posición horizontal, dovela D4, lado San Cristóbal

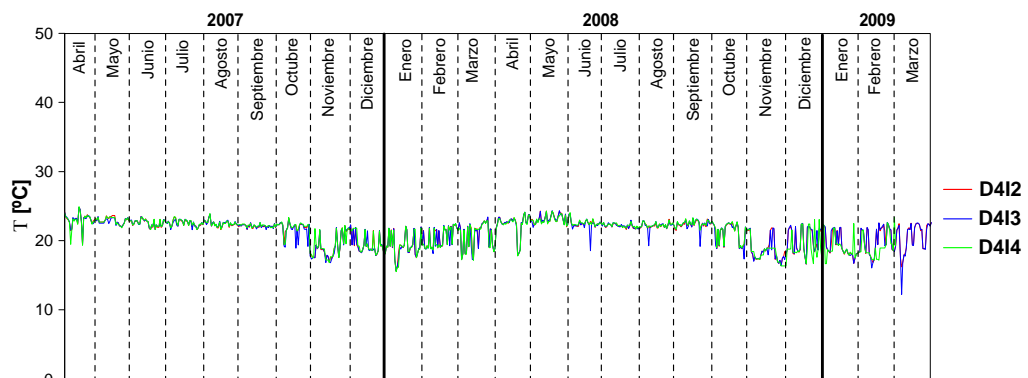


Figura G.7: Temperatura, lecho inferior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

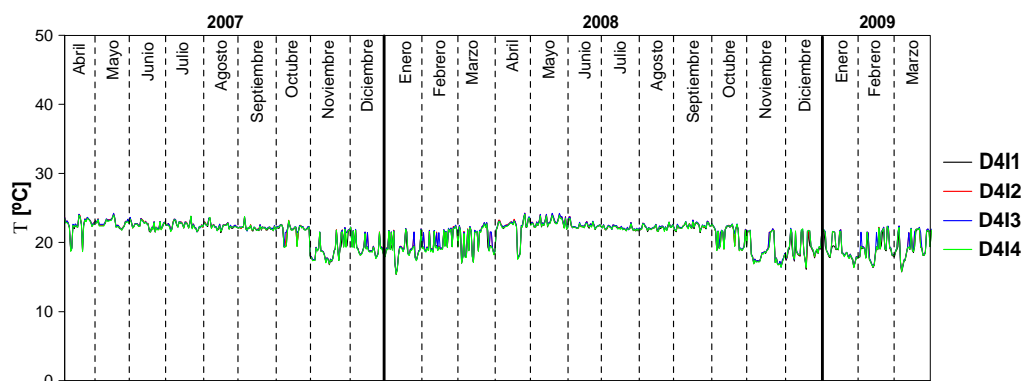


Figura G.8: Temperatura, lecho inferior, dovela D4, lado San Cristóbal

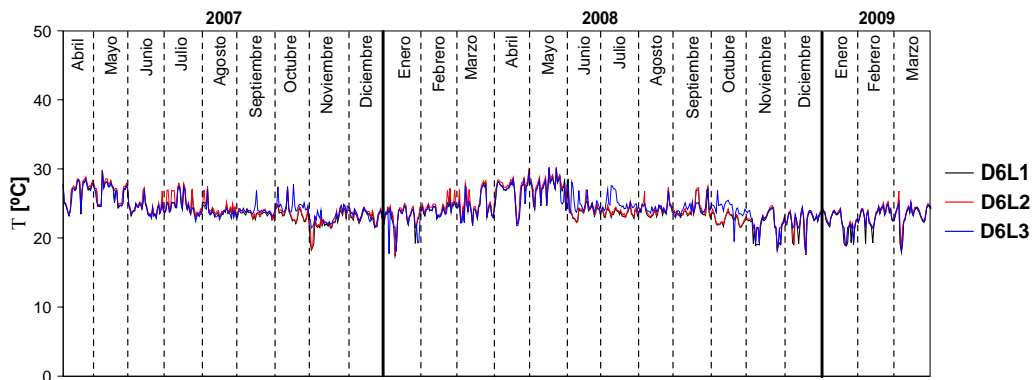


Figura G.9: Temperatura, zona de transición, lado Tuxtla Gutiérrez

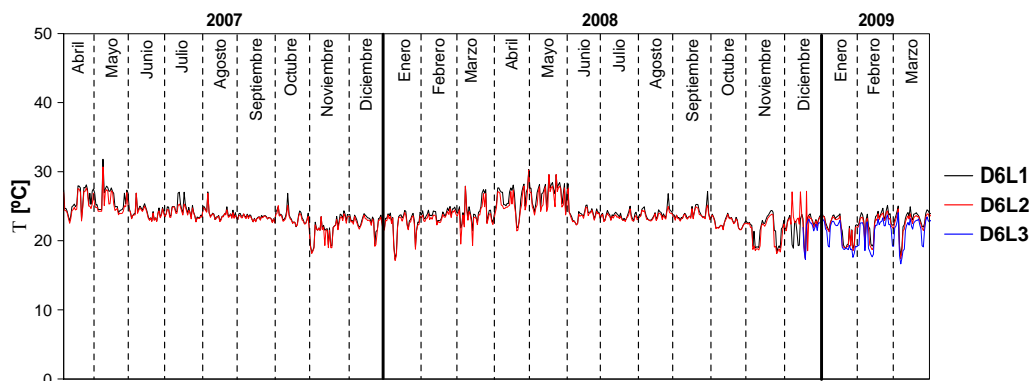


Figura G.10: Temperatura, zona de transición, lado San Cristóbal

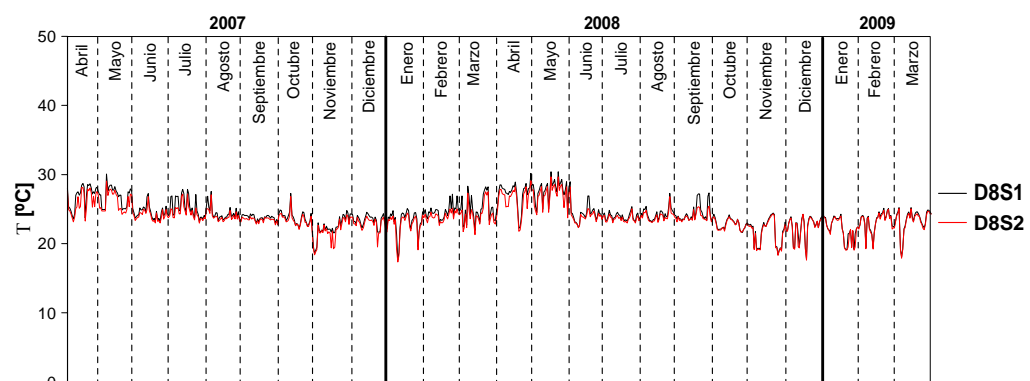


Figura G.11: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

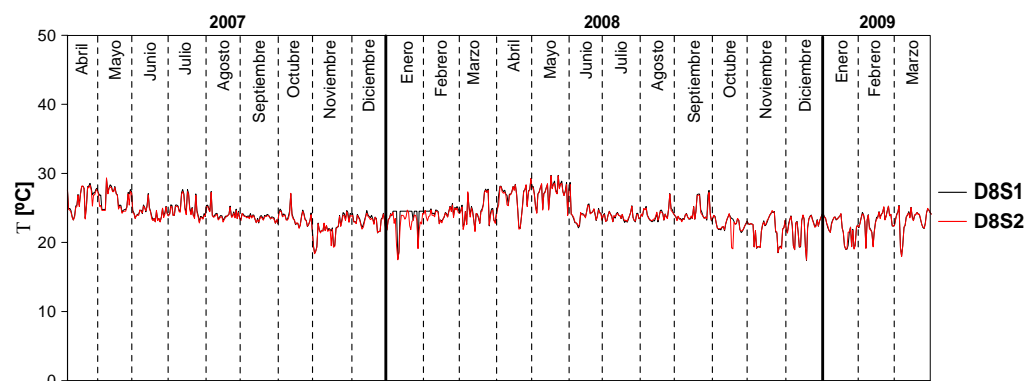


Figura G.12: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

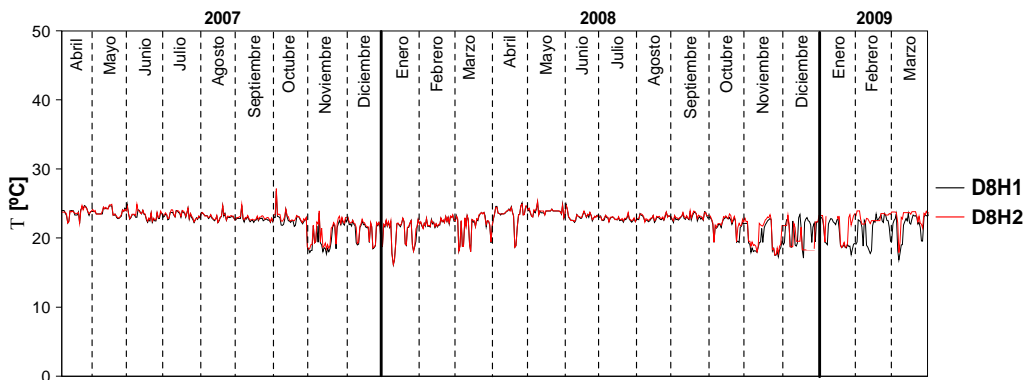


Figura G.13: Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

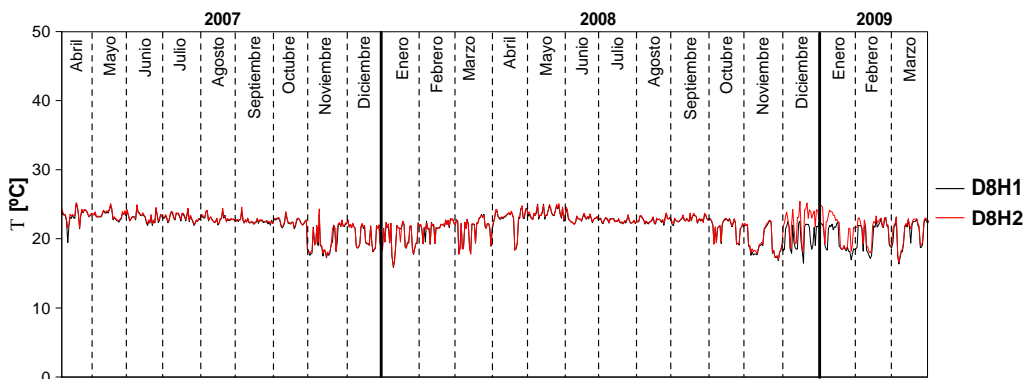


Figura G.14 Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

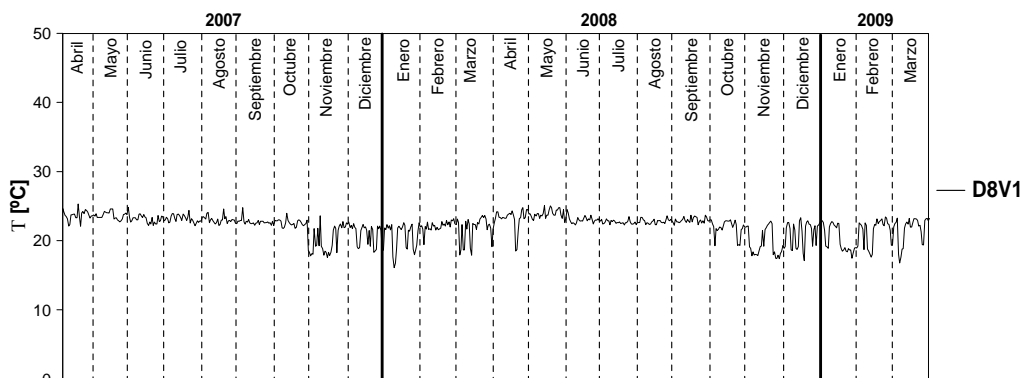


Figura G.15: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

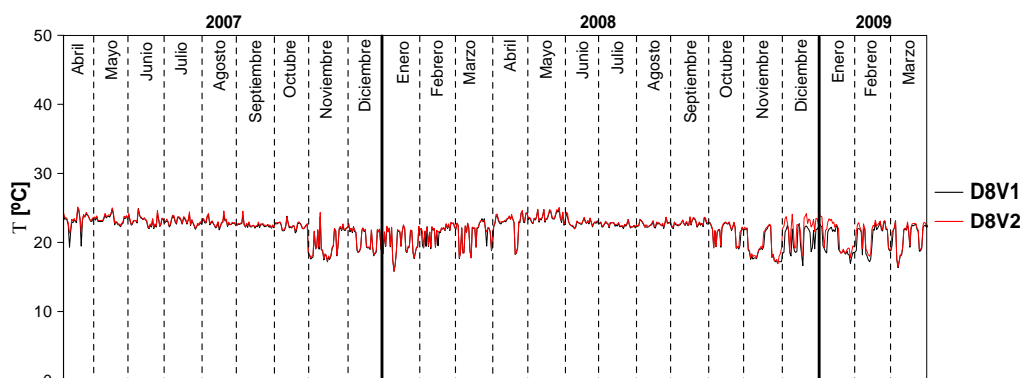


Figura G.16: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

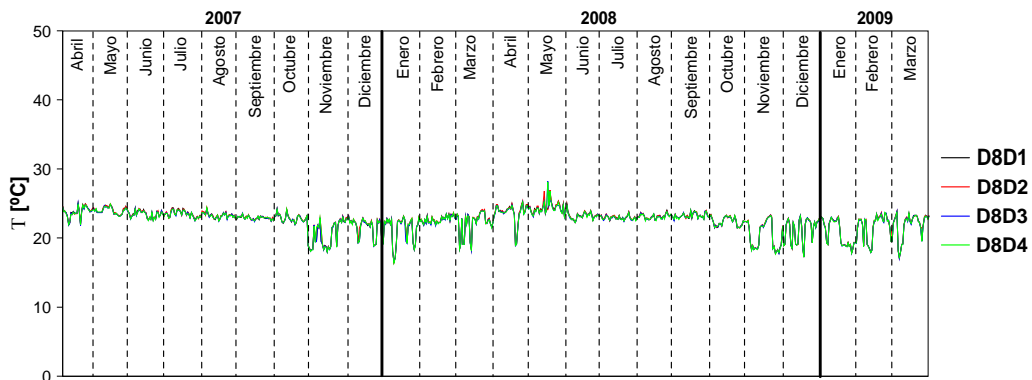


Figura G.17: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

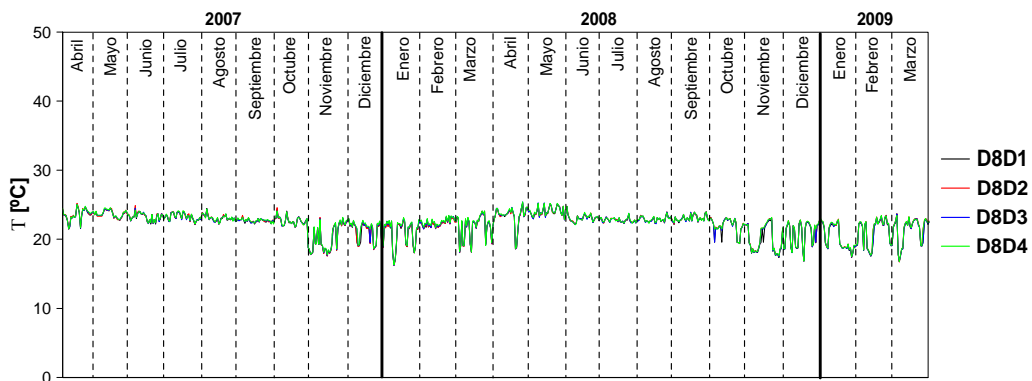


Figura G.18: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

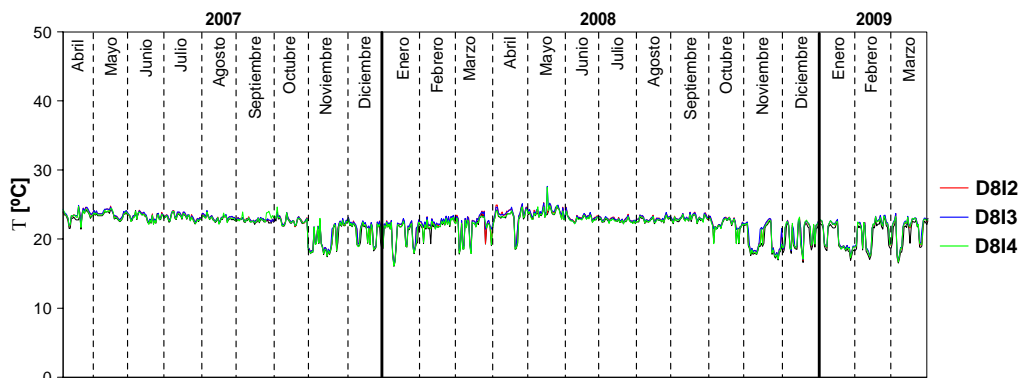


Figura G.19: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

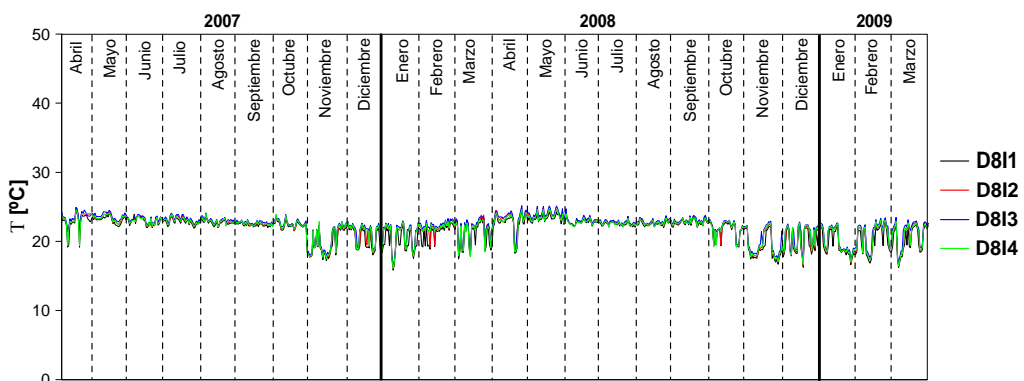


Figura G.20: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

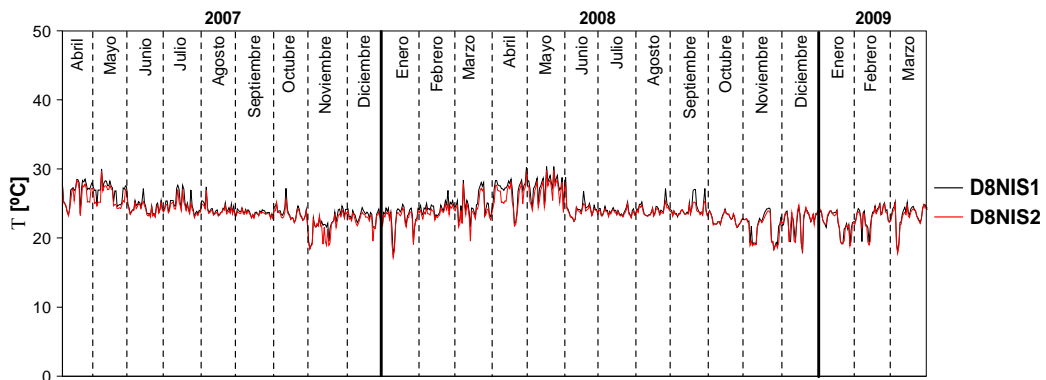


Figura G.21: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

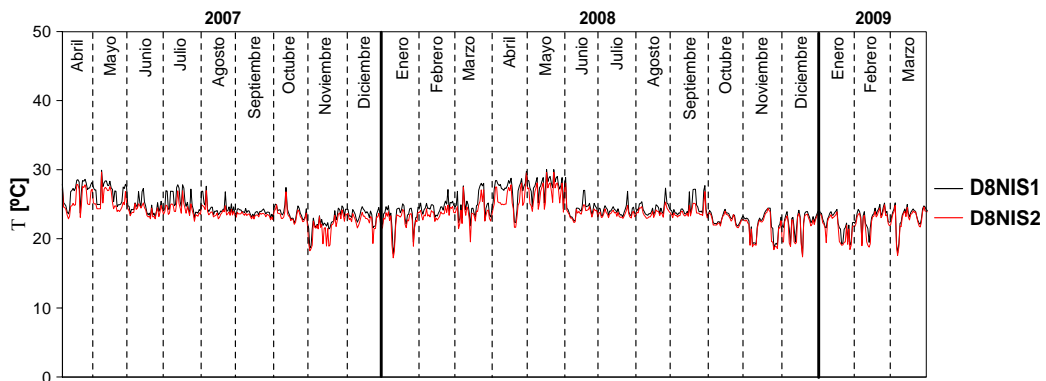


Figura G.22: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

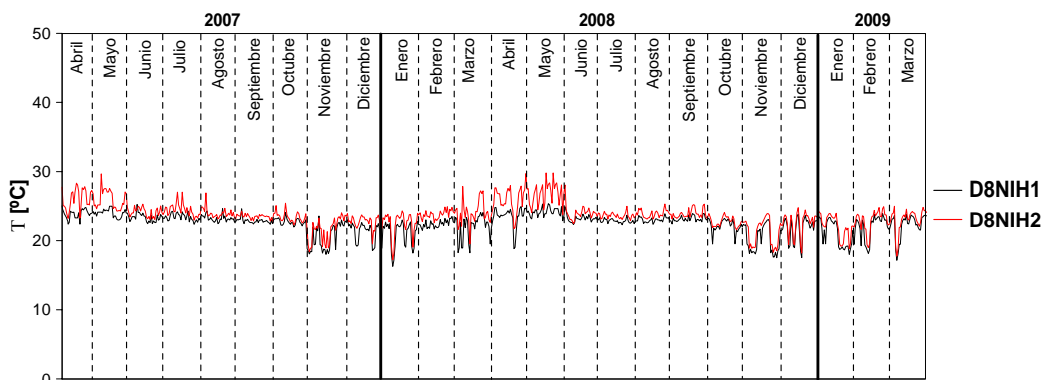


Figura G.23: Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

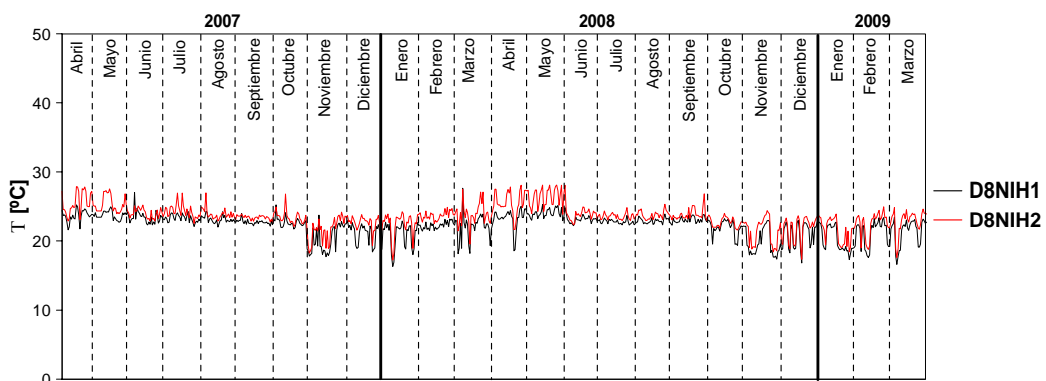


Figura G.24: Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

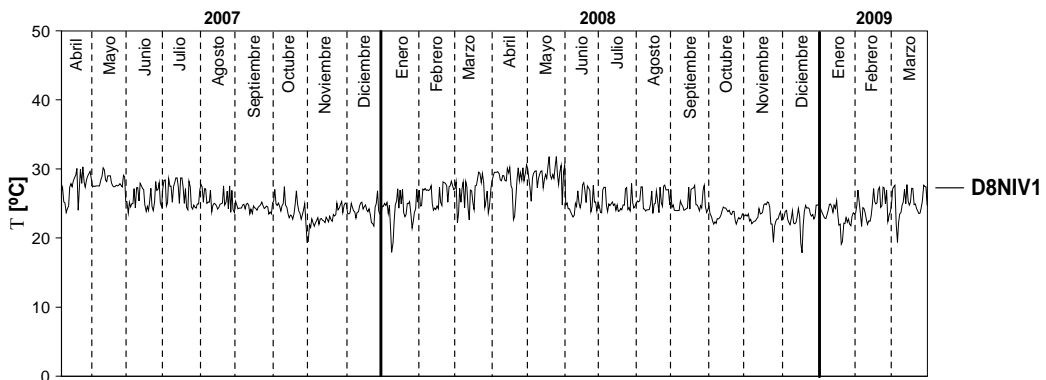


Figura G.25: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

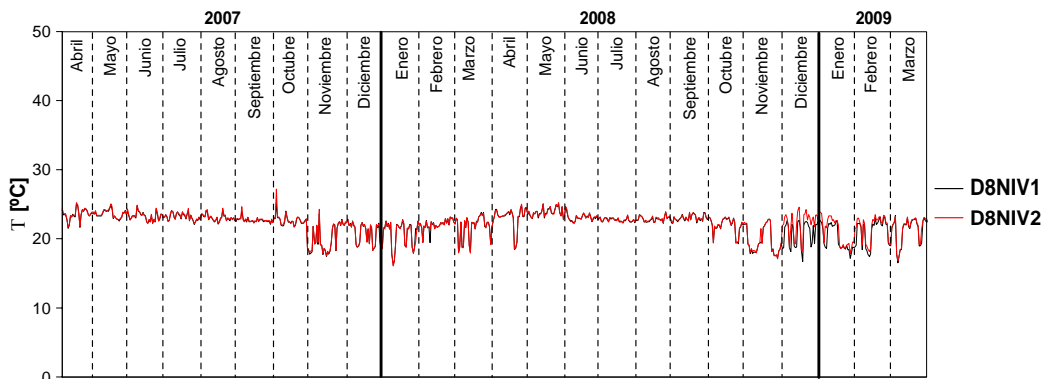


Figura G.26: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

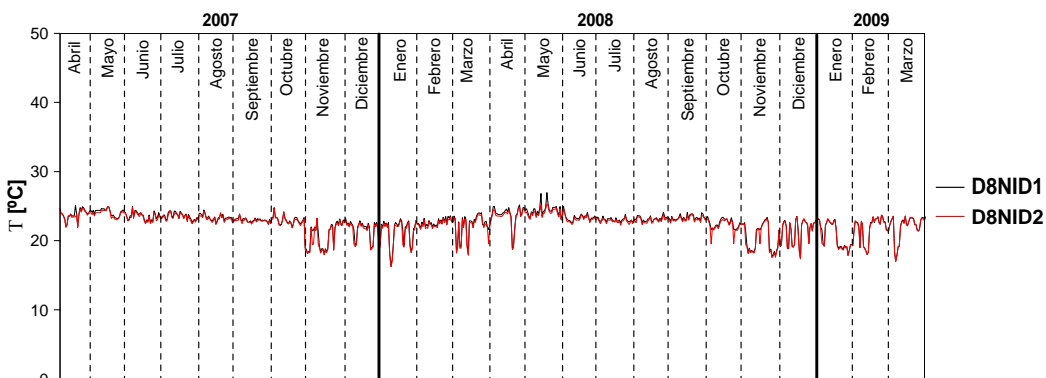


Figura G.27: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

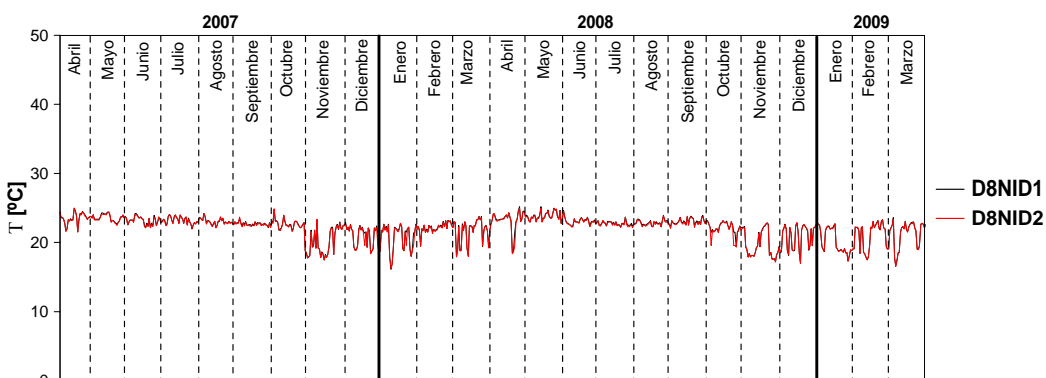


Figura G.28: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

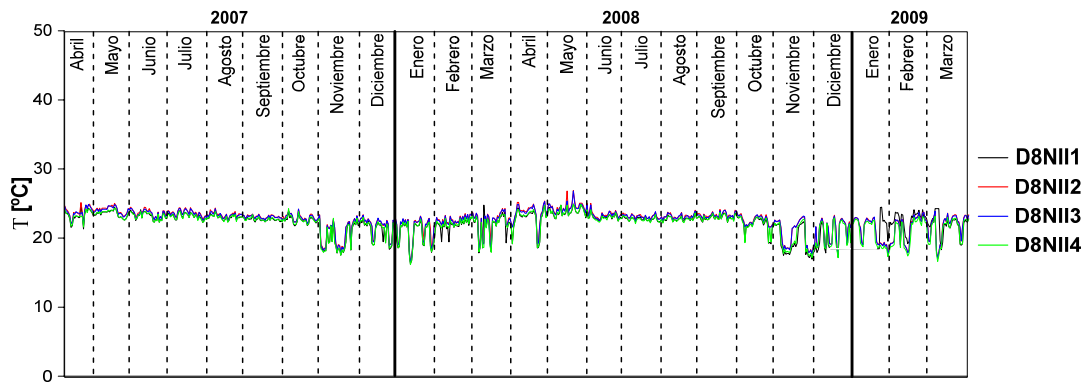


Figura G.29: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

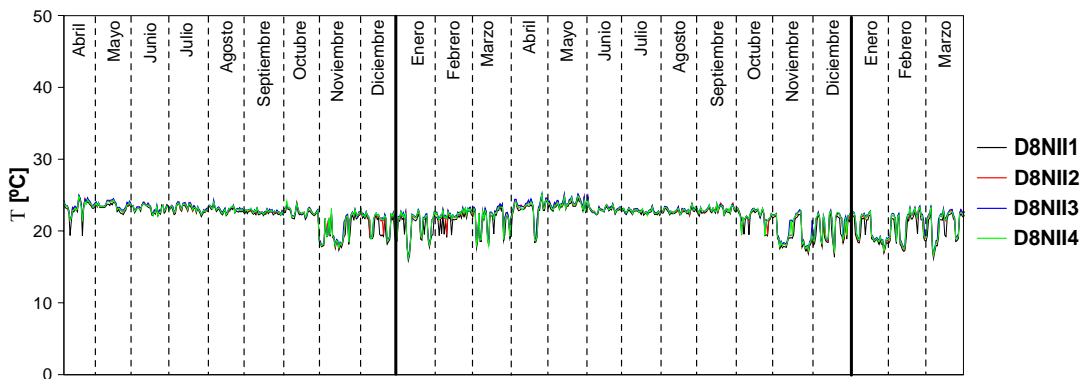


Figura G.30: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

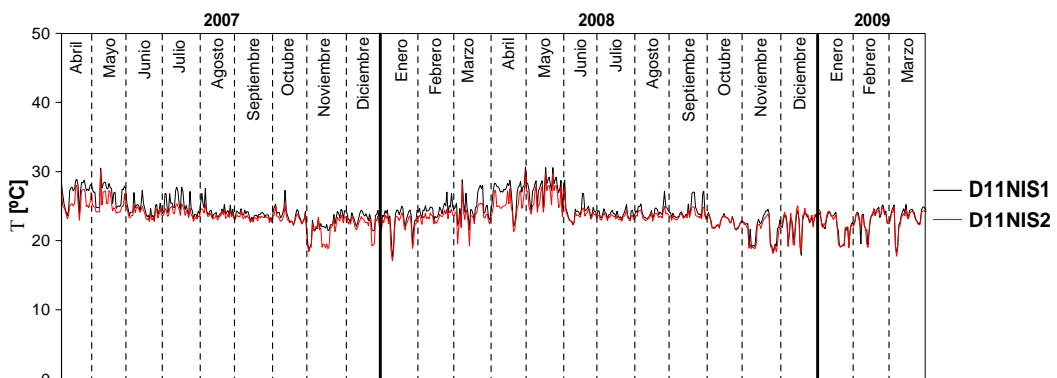


Figura G.31: Temperatura, lecho superior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

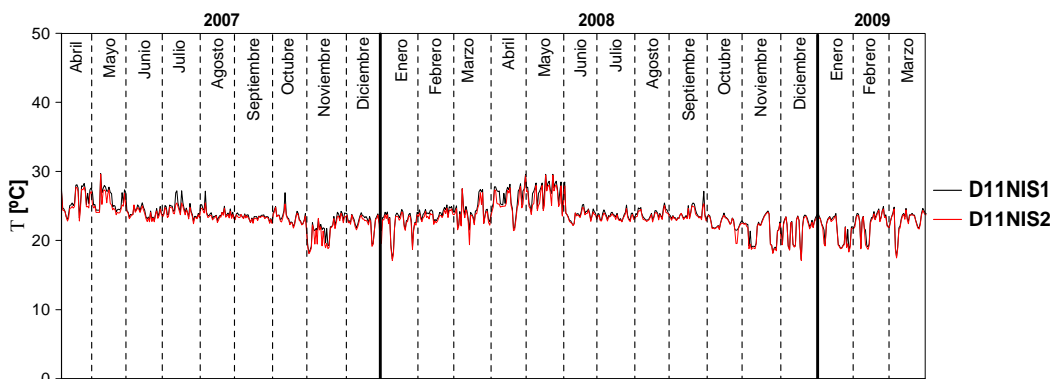


Figura G.32: Temperatura, lecho superior, dovela D11, lado San Cristóbal

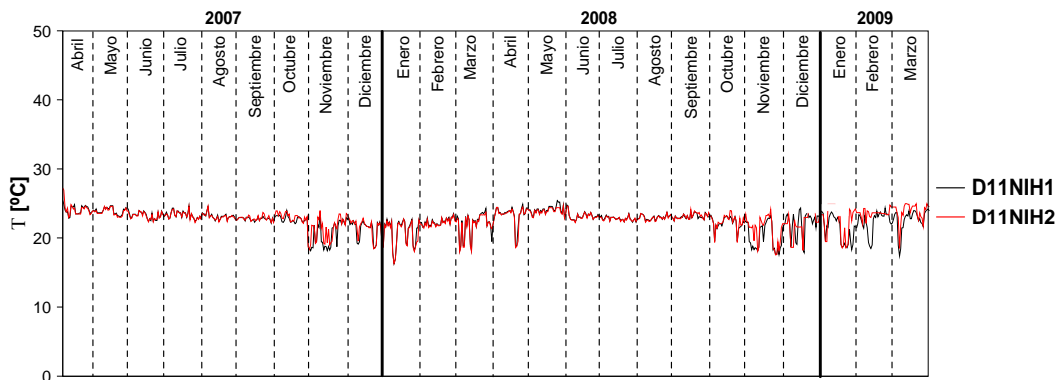


Figura G.33: Temperatura, posición horizontal, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

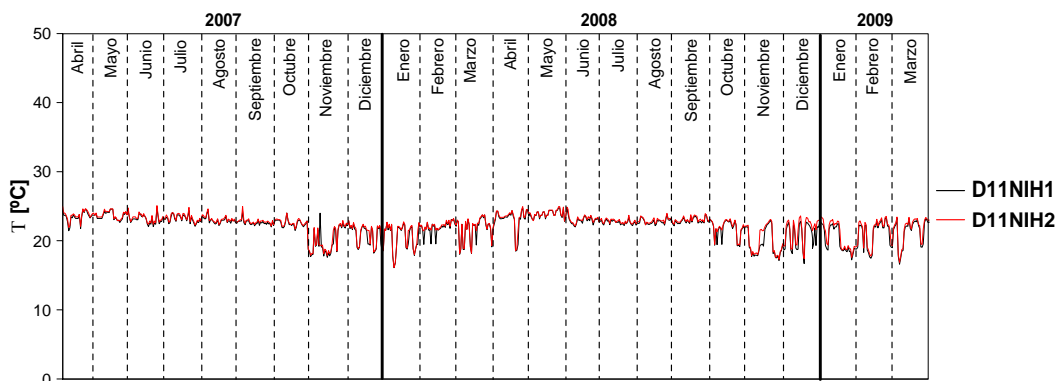


Figura G.34: Temperatura, posición horizontal, dovela D11, lado San Cristóbal

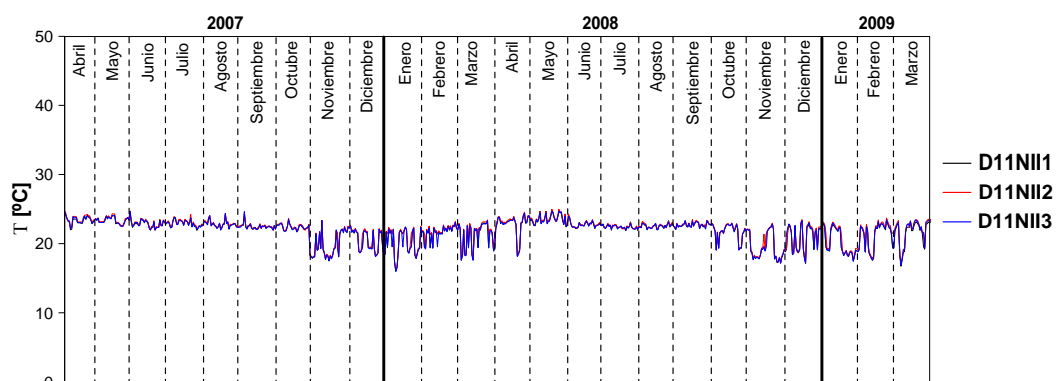


Figura G.35: Temperatura, lecho inferior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

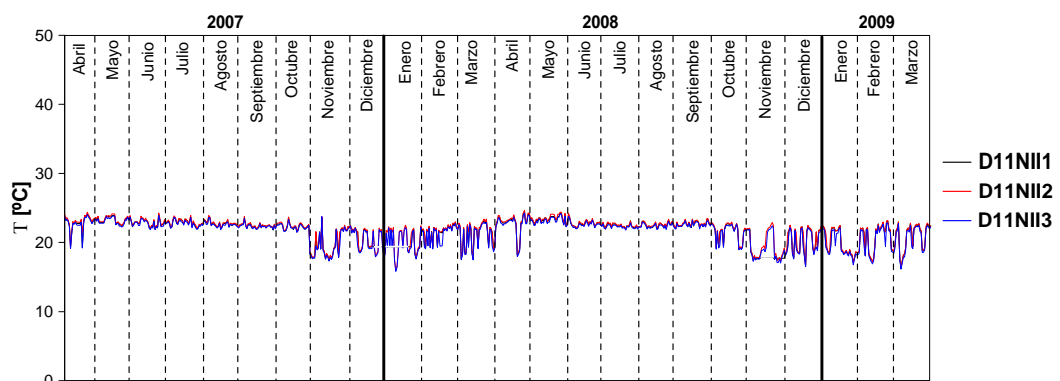


Figura G.36: Temperatura, lecho inferior, dovela D11, lado San Cristóbal

APÉNDICE H. Temperaturas corregidas, medidas a las 20:00 hrs.

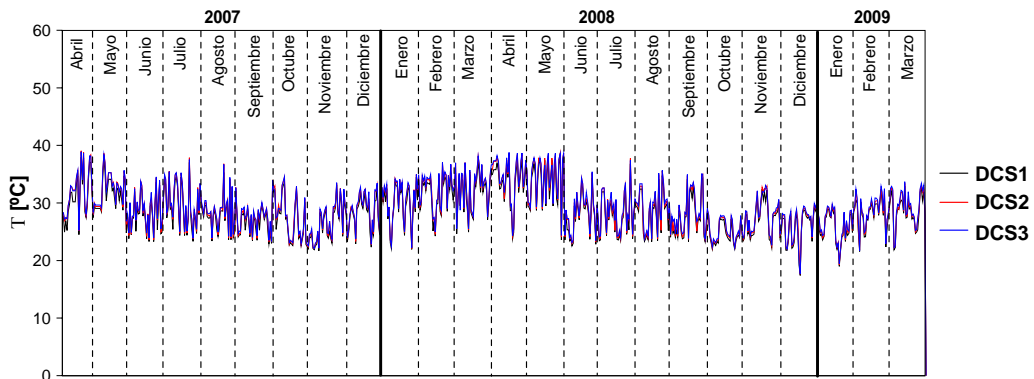


Figura H.1: Temperatura, lecho superior, dovela central

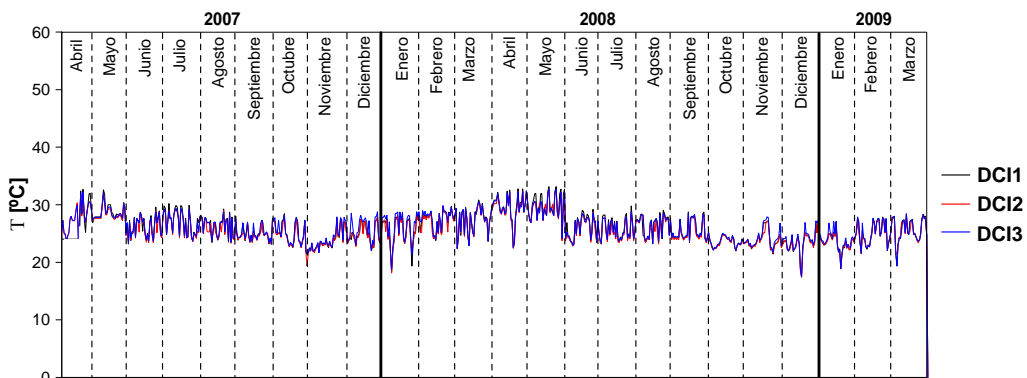


Figura H.2: Temperatura, lecho inferior, dovela central

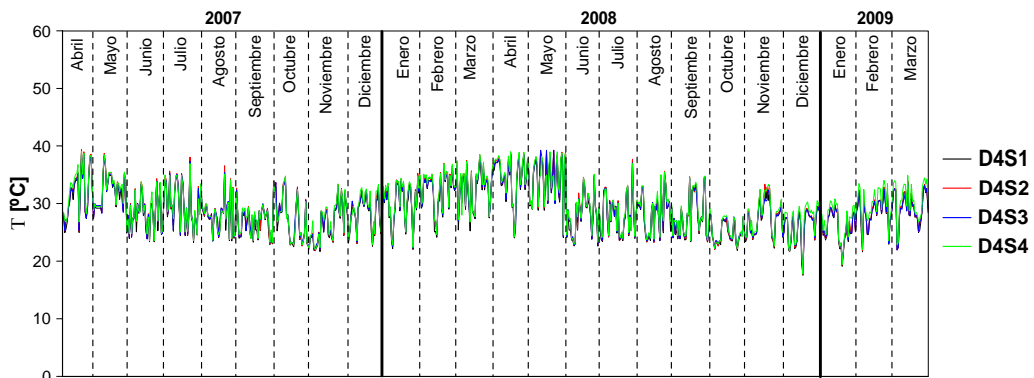


Figura H.3: Temperatura, lecho superior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

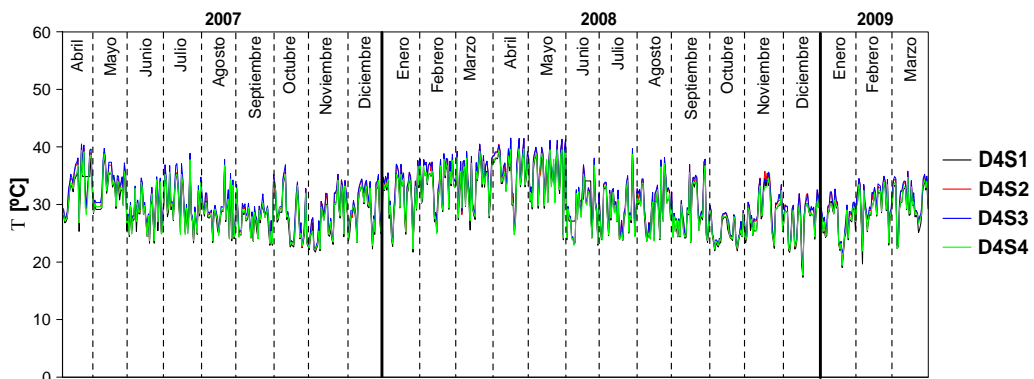


Figura H.4: Temperatura, lecho superior, dovela D4, lado San Cristóbal

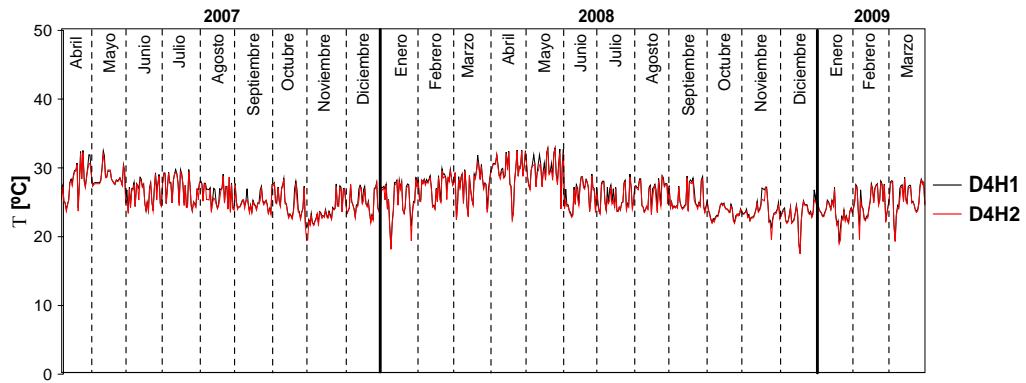


Figura H.5: Temperatura, posición horizontal, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

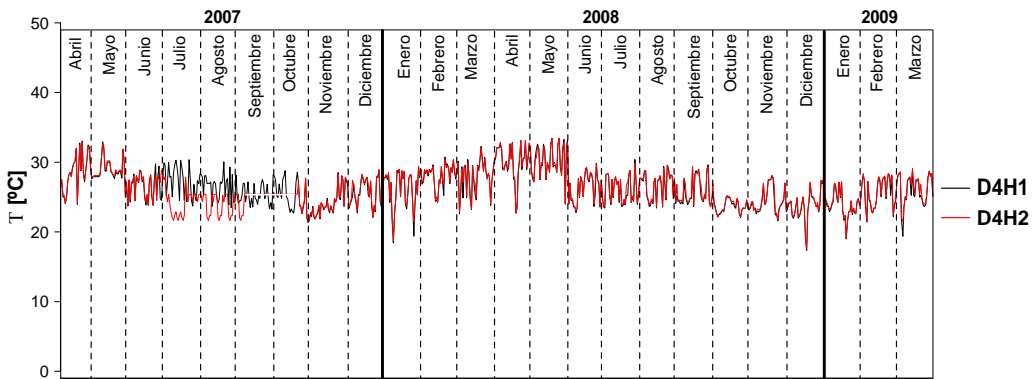


Figura H.6: Temperatura, posición horizontal, dovela D4, lado San Cristóbal

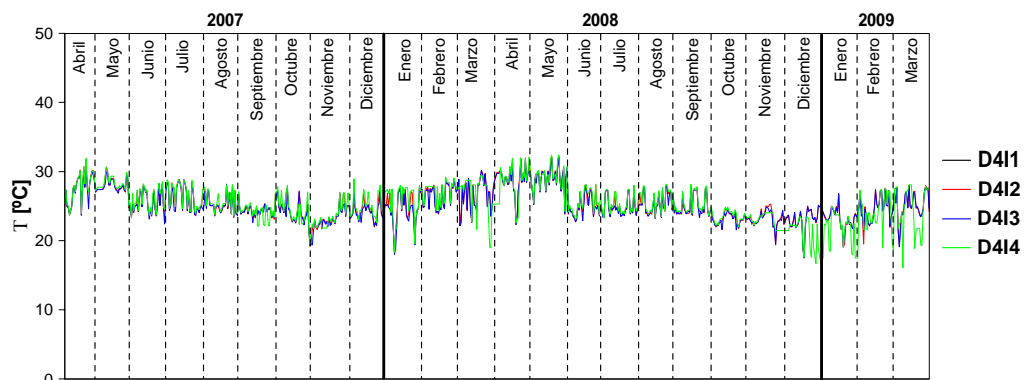


Figura H.7: Temperatura, lecho inferior, dovela D4, lado Tuxtla Gutiérrez

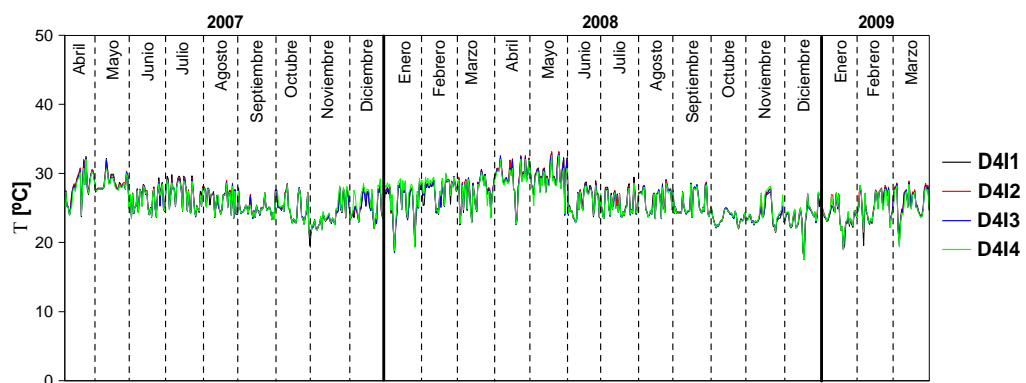


Figura H.8: Temperatura, lecho inferior, dovela D4, lado San Cristóbal

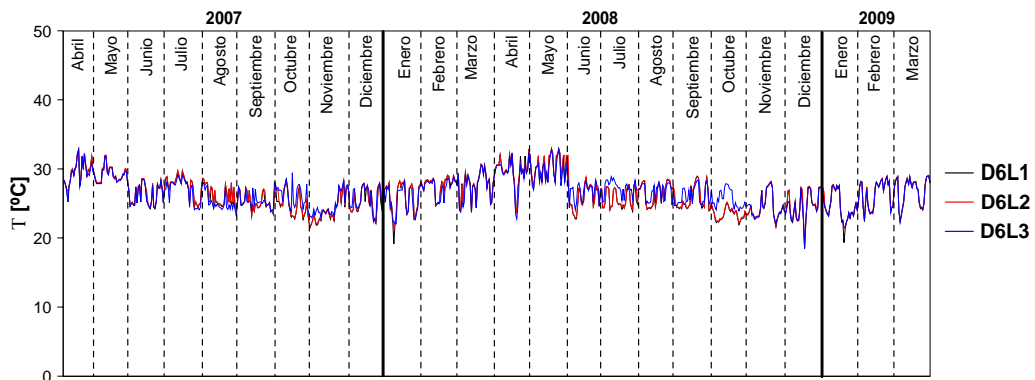


Figura H.9: Temperatura, zona de transición, lado Tuxtla Gutiérrez

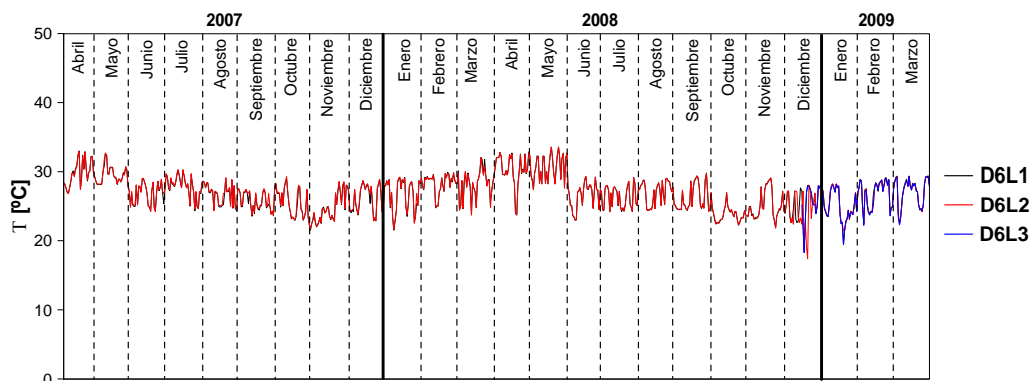


Figura H.10: Temperatura, zona de transición, lado San Cristóbal

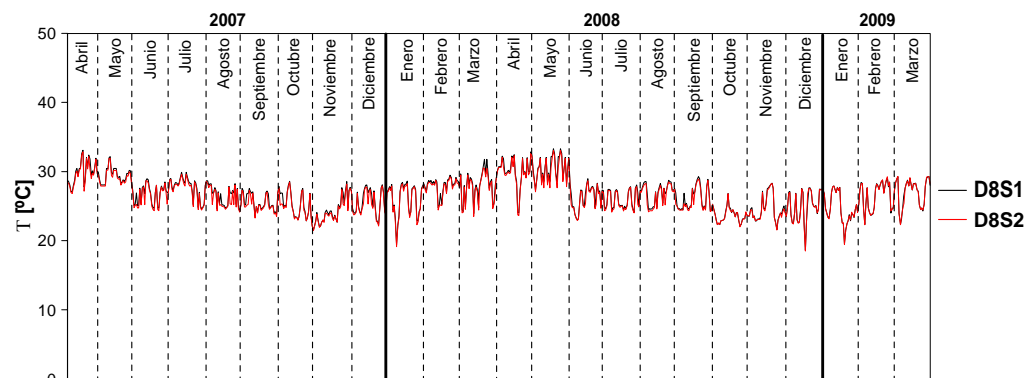


Figura H.11: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

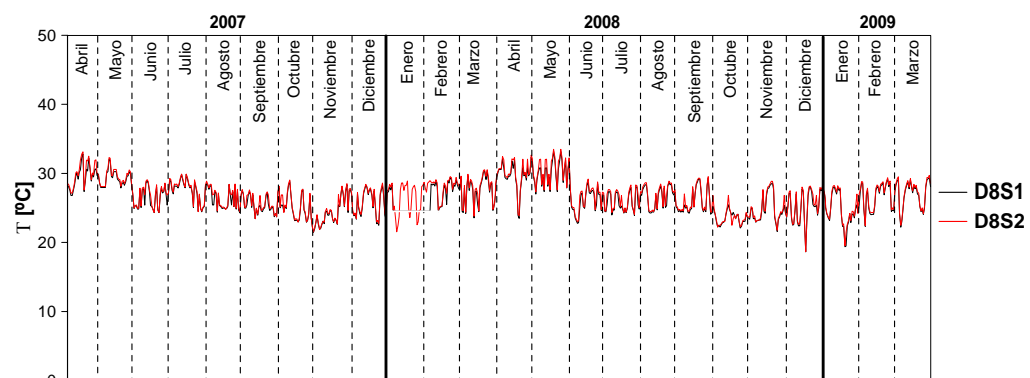


Figura H.12: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

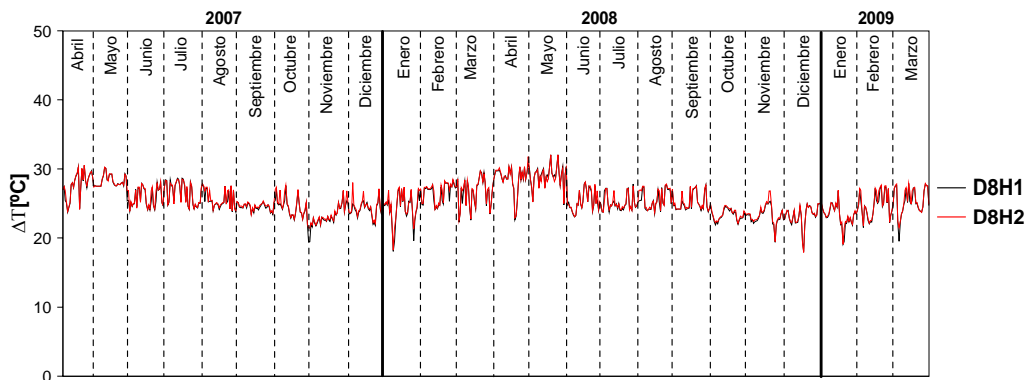


Figura H.13: Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

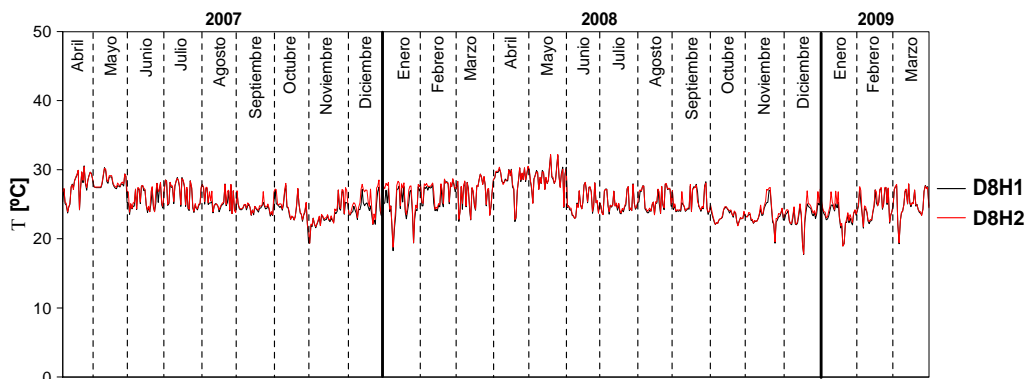


Figura H.14 Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

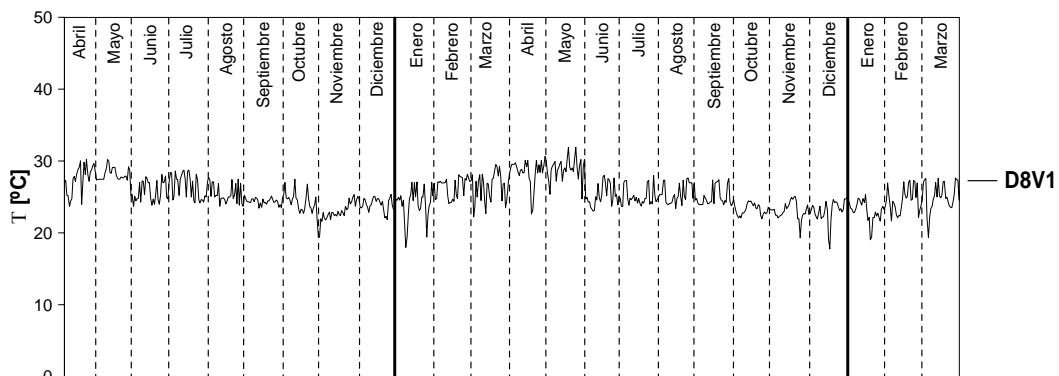


Figura H.15: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

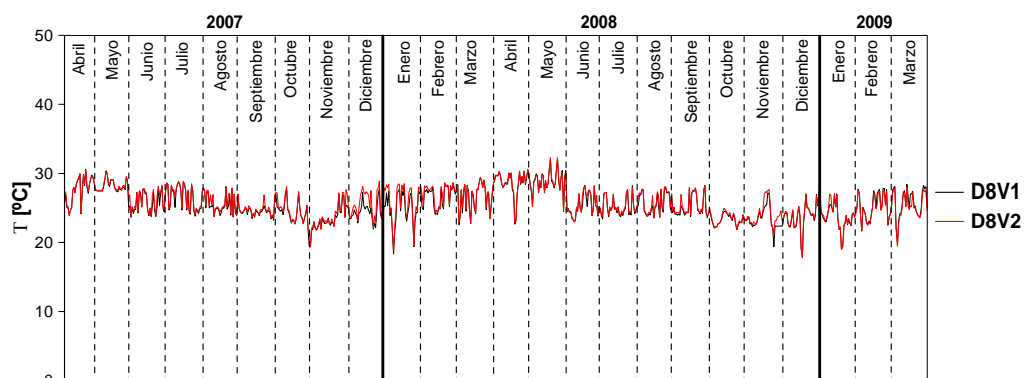


Figura H.16: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

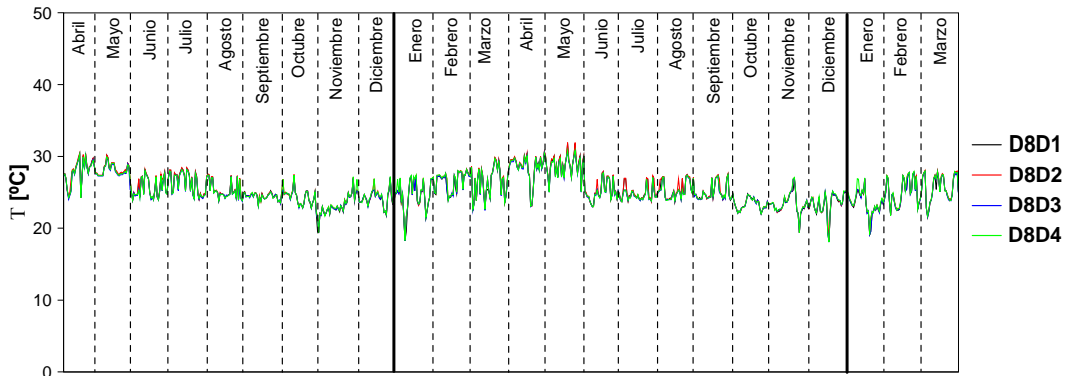


Figura H.17: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

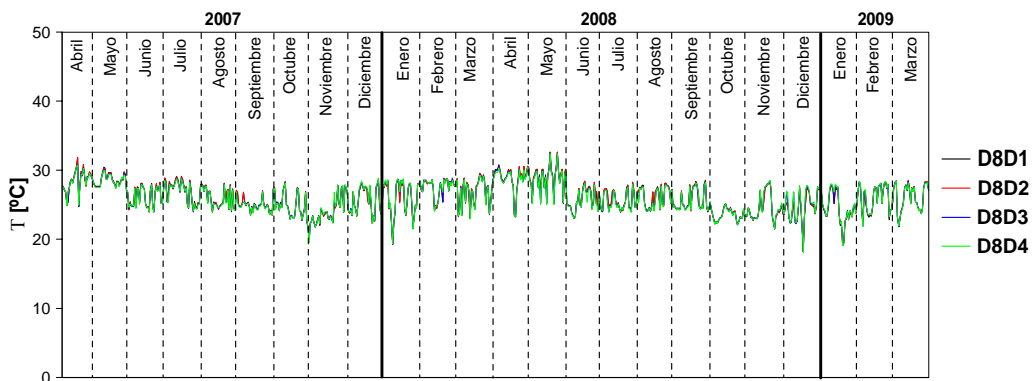


Figura H.18: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

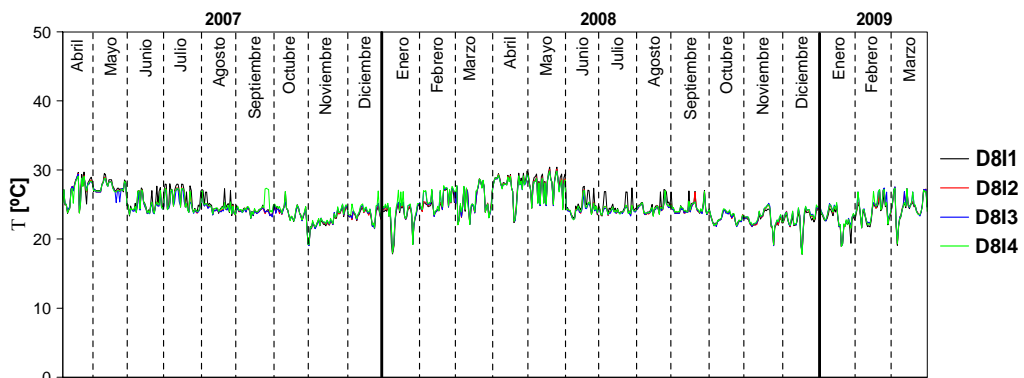


Figura H.19: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

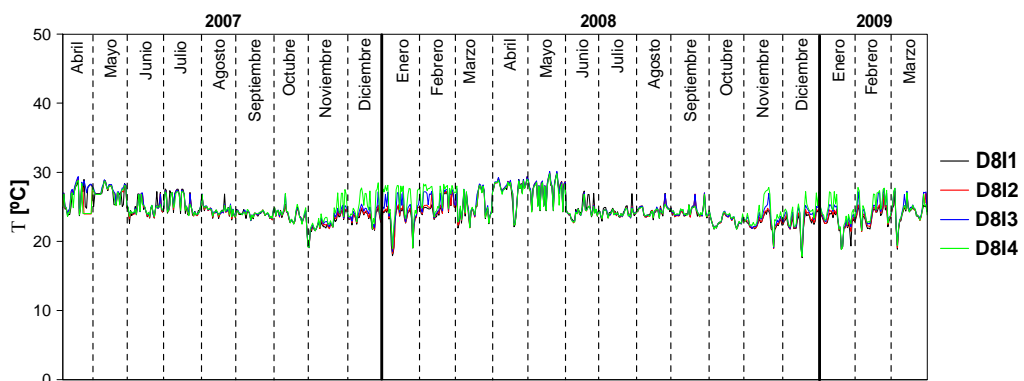


Figura H.20: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

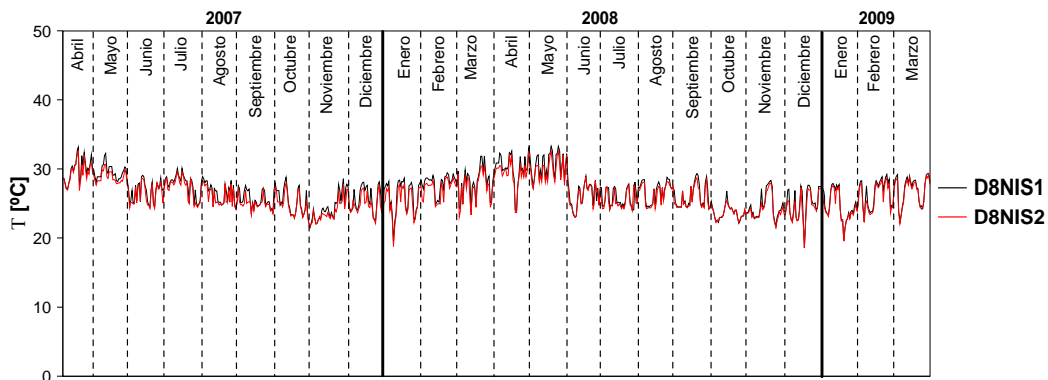


Figura H.21: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

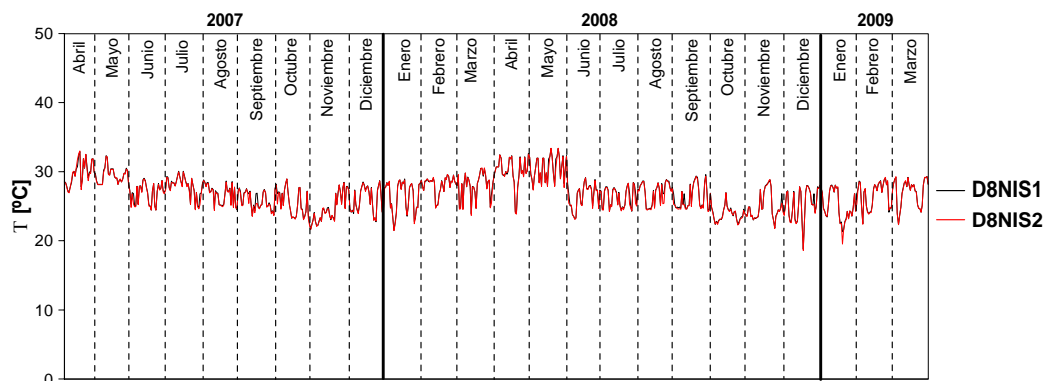


Figura H.22: Temperatura, lecho superior, dovela D8, lado San Cristóbal

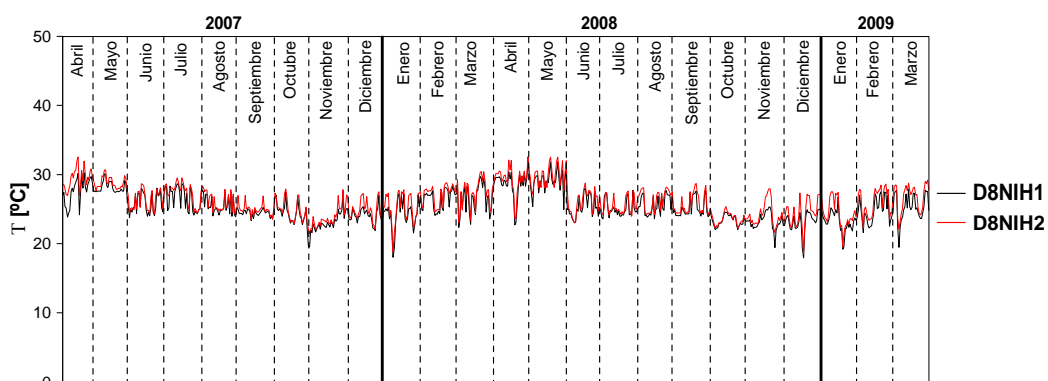


Figura H.23: Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

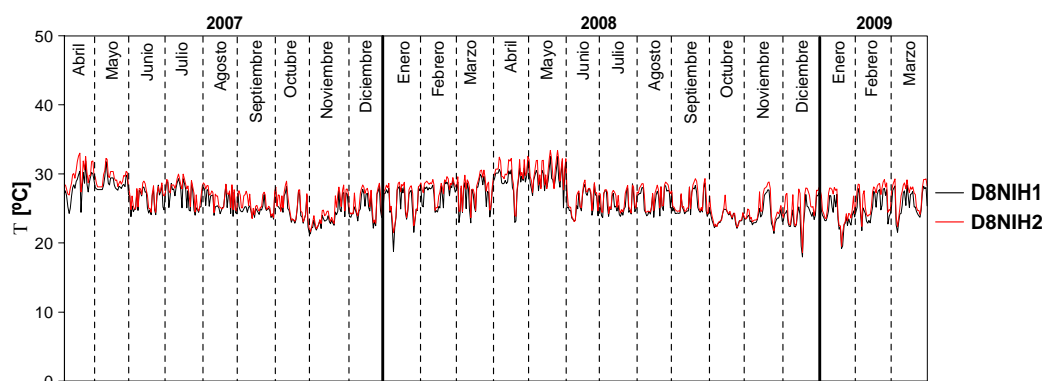


Figura H.24: Temperatura, posición horizontal, dovela D8, lado San Cristóbal

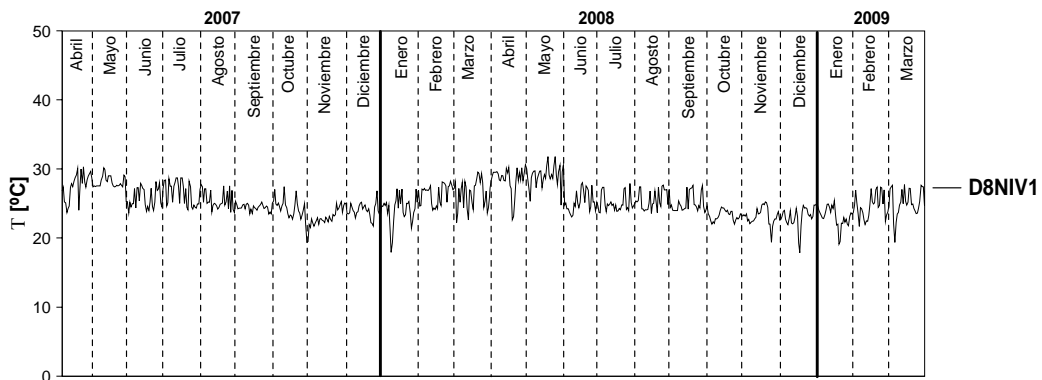


Figura H.25: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

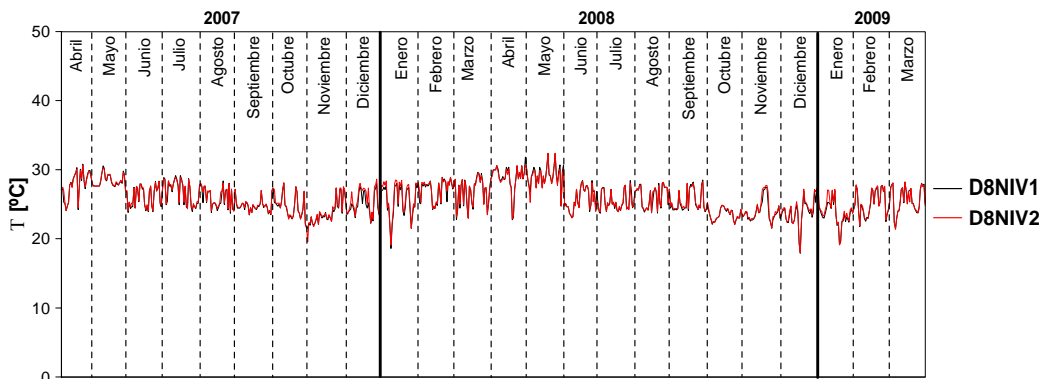


Figura H.26: Temperatura, posición vertical, dovela D8, lado San Cristóbal

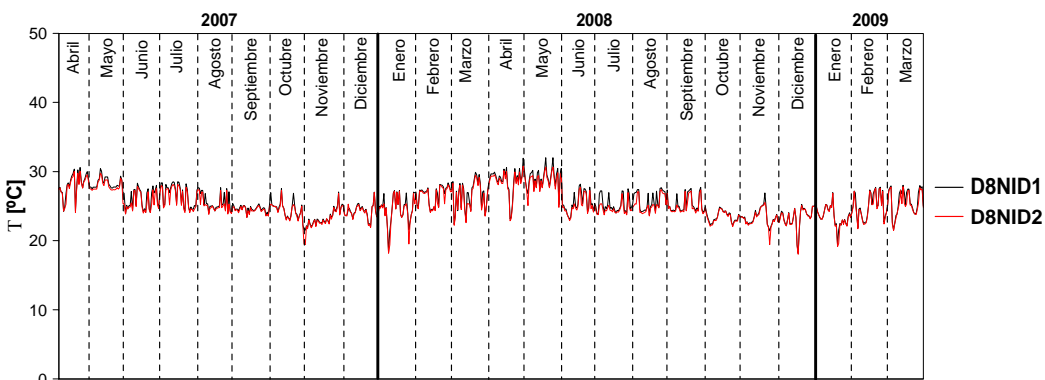


Figura H.27: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

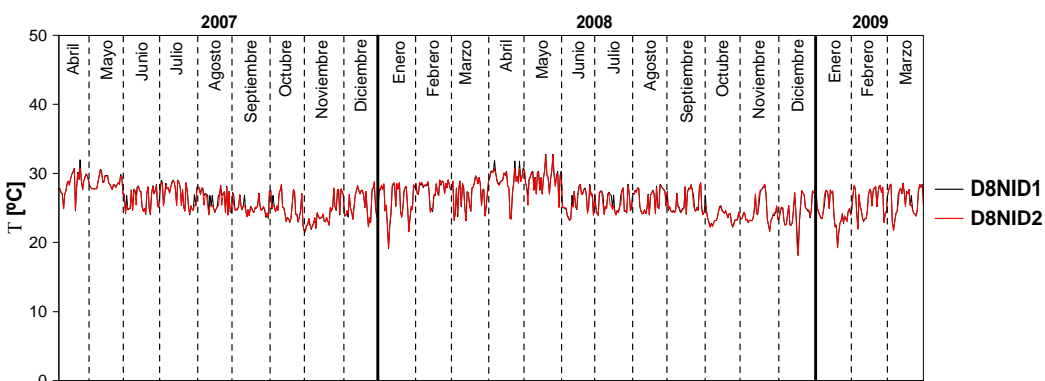


Figura H.28: Temperatura, diagonal de contraventeo, dovela D8, lado San Cristóbal

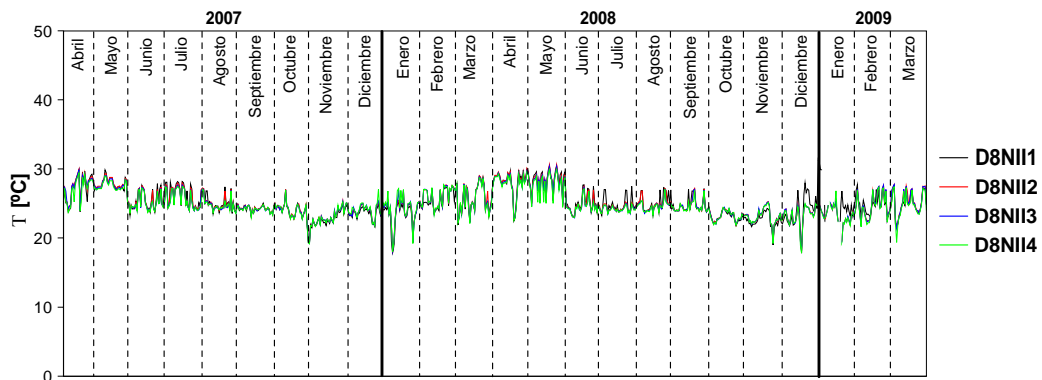


Figura H.29: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado Tuxtla Gutiérrez

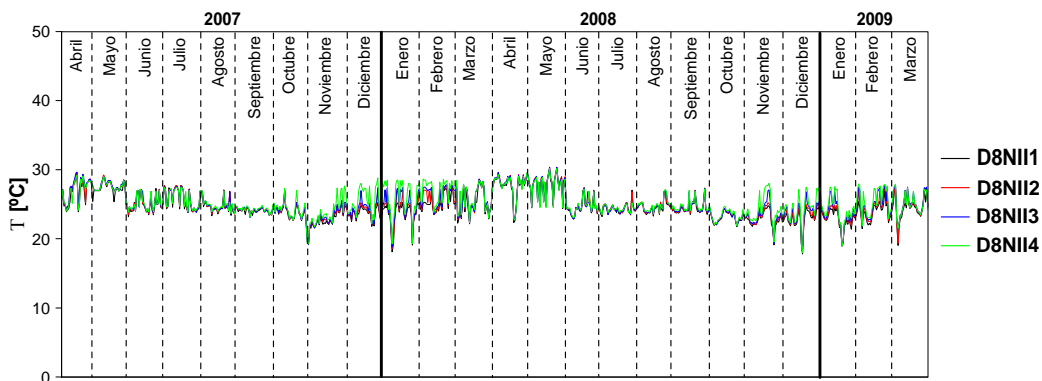


Figura H.30: Temperatura, lecho inferior, dovela D8, lado San Cristóbal

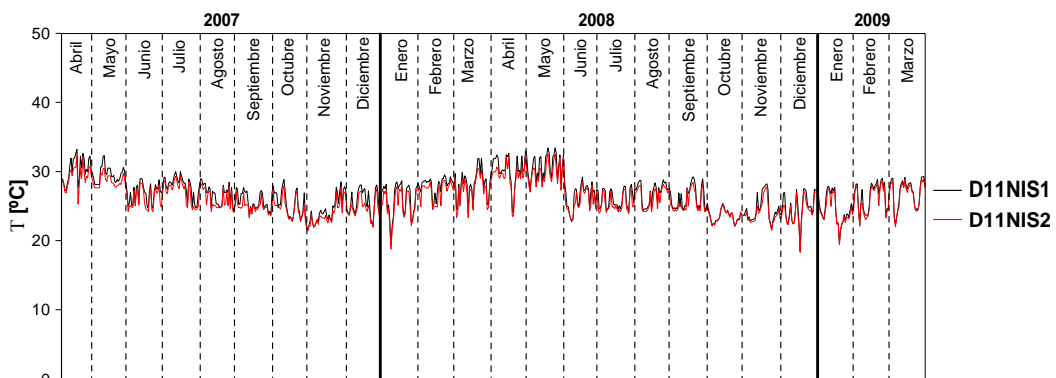


Figura H.31: Temperatura, lecho superior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

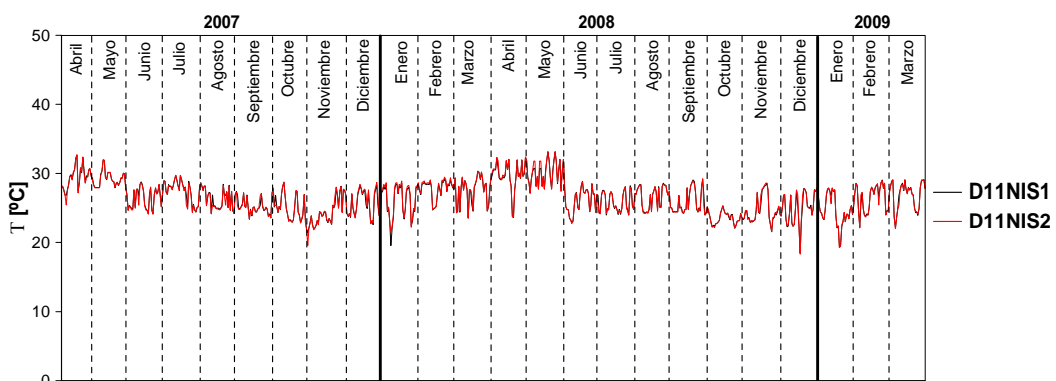


Figura H.32: Temperatura, lecho superior, dovela D11, lado San Cristóbal

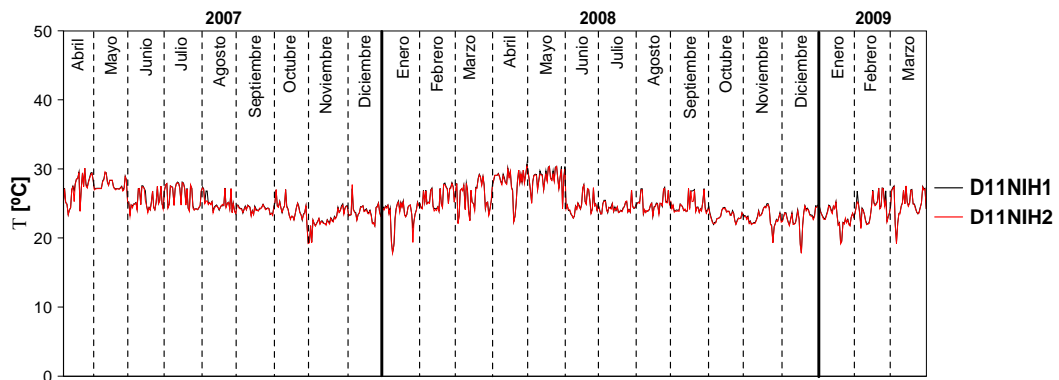


Figura H.33: Temperatura, posición horizontal, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

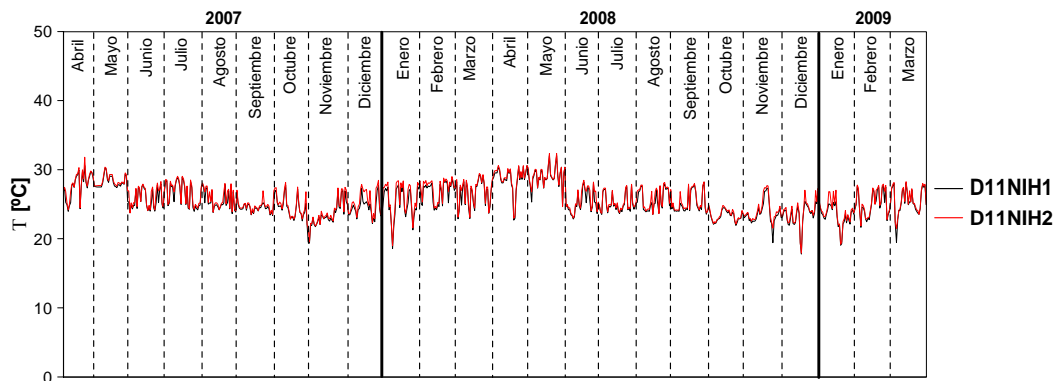


Figura H.34: Temperatura, posición horizontal, dovela D11, lado San Cristóbal

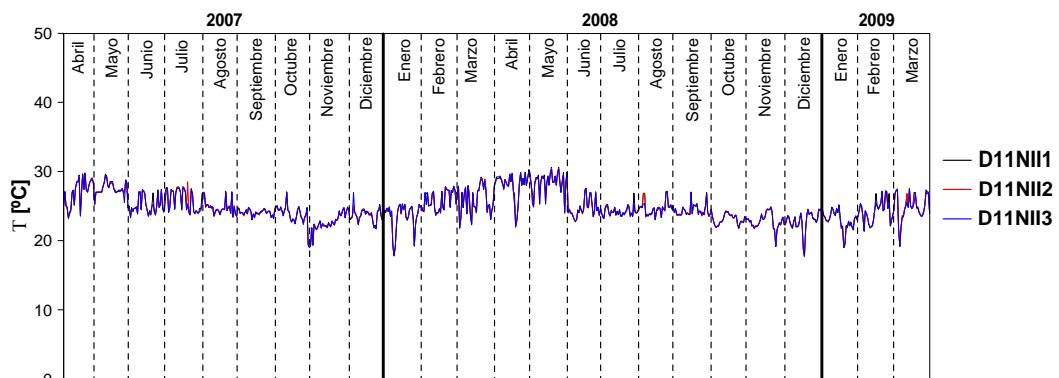


Figura H.35: Temperatura, lecho inferior, dovela D11, lado Tuxtla Gutiérrez

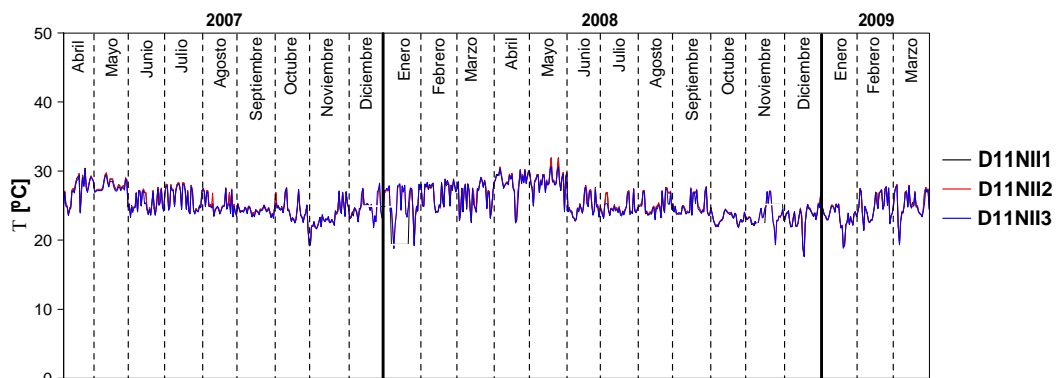
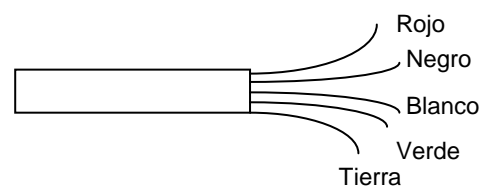


Figura H.36: Temperatura, lecho inferior, dovela D11, lado San Cristóbal

I.1 Verificación de impedancia de la cuerda vibrante y el termistor.

Para verificar el funcionamiento de la cuerda vibrante el fabricante recomienda medir de forma inicial la impedancia de la bobina y del termistor. Estas lecturas deben corresponder a los valores de fábrica para este modelo de cuerda vibrante.

La medición de la impedancia se realiza con el medidor de resistencia de un multímetro. El cable que tiene la cuerda vibrante es de cuatro hilos de diferente color y una tierra. En la figura I.1 se muestra la distribución de los hilos y su correspondencia a la conexión con la bobina y el termistor.



Cable Rojo – Positivo bobina
Cable Negro – Negativo bobina
Cable Blanco - Positivo termistor
Cable Verde – Negativo termistor

Figura I.1: Distribución del cable de conexión de la bobina y el termistor

Para medir la impedancia de la bobina es necesario conectar las puntas del multímetro a los cables rojo y negro. El valor que se debe leer en el multímetro es alrededor de 180 ohms con una variación no mayor a ± 10 Ohms. Si el sensor se ha conectado a un cable de una longitud mayor a la de fábrica (tres metros), el valor que se puede leer será mayor a 180 ohms en el orden de 48.5 ohms por cada mil metros de cable.

La misma prueba se realiza con los cables blanco y verde para leer la impedancia del termistor. Donde los valores deben estar por alrededor de los 3000 ohms, dado que para una temperatura de 20°C, el valor es de 3700 ohms. La variación de un grado centígrado de temperatura equivale a una variación de por lo menos 120 ohms. En el manual de la cuerda vibrante viene una tabla de equivalencias donde muestran el valor de temperatura y su equivalente valor en ohms. La tendencia es que mientras menor sea el valor de la resistencia del termistor mayor es el valor de temperatura. Como por lo regular las temperaturas en las que estará la cuerda vibrante estarán entre los 0 °C y 80 °C, los valores que se deben leer deben estar entre 10 000 y 400 ohms. Valores fuera de este intervalo se pueden considerar erróneos y que el termistor está mal.

Esta es la forma de verificar que los valores de impedancia del transductor de cuerda vibrante y el termistor estén bien. Además esto ayuda a comprobar que los cables empleados en las mediciones correspondan a la lectura realizada con la cuerda vibrante o el termistor.

Para constatar que la cuerda vibrante está funcionando correctamente es necesario conectar la cuerda a un equipo lector y verificar que los valores que se están observando se encuentran dentro del intervalo de operación especificado por el fabricante.

1.2 Verificación del funcionamiento de una cuerda vibrante con el equipo GK-403.

El equipo GK-403 es un lector de cuerdas vibrantes portátil que se puede conectar a una sola cuerda vibrante o a un multiplexor donde se pueden conectar varias cuerdas vibrantes a la vez. En este caso se explica cómo se debe hacer la verificación de una sola cuerda vibrante conectando a este equipo. En la figura 1.2 se muestra el equipo GK-403 y a partir de esta imagen se explicará las opciones de lectura y verificación de las cuerdas vibrantes.

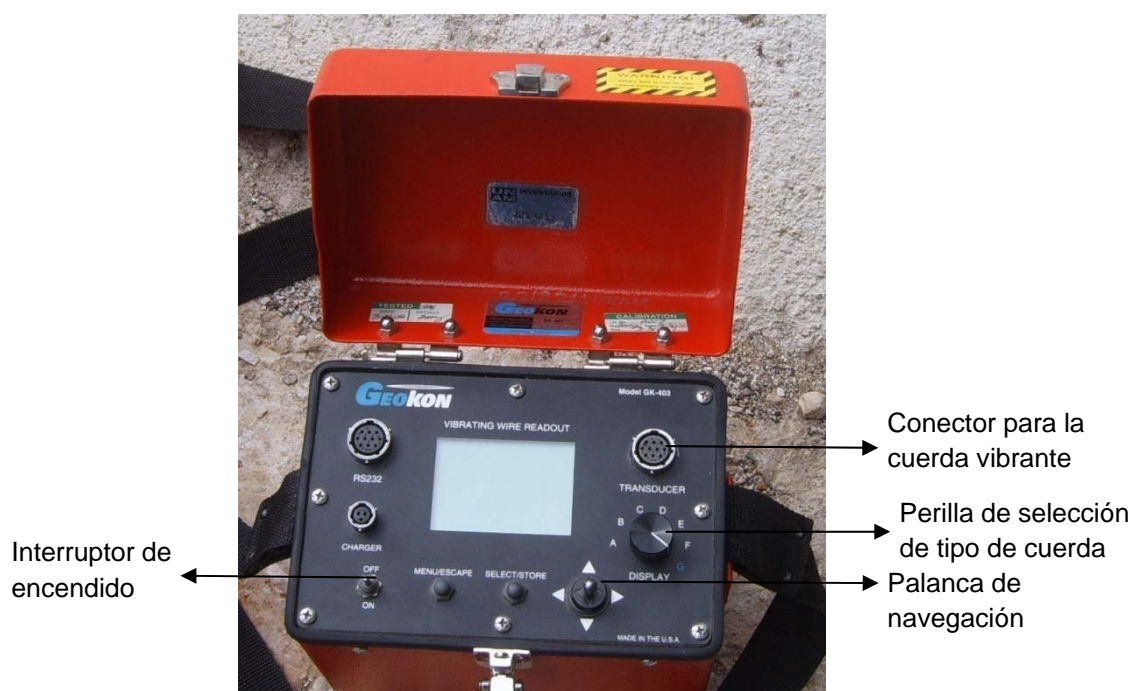


Figura 1.2: Componentes del lector de cuerdas vibrantes GK-403

El equipo GK-403 cuenta con tres conectores, uno para conectar la cuerda vibrante, otro para conectar el equipo a la computadora y el último para conectar el cargador de la batería. Además de esto cuenta con los botones de menú, selección y una palanca para elegir las opciones del menú o cambiar el espacio de memoria. También cuenta con una perilla que permite escoger el modelo de cuerda vibrante que se vaya a utilizar o en su caso, determinar si esta será conectada a un multiplexor. Para conocer la medición de una cuerda vibrante conectada directamente, la perilla se debe girar seleccionando la letra "B" para el modelo 4050 empleado en el puente Baluarte o la letra "C" para el modelo 4000 que se utiliza en el puente San Cristóbal.

Existen dos cables para conectar las cuerdas, el primero es un cable verde que viene con el equipo y que permite conectar las cuerdas vibrantes que no tienen conector. El segundo cable se utiliza para conectar las cuerdas mediante el conector. Se debe seleccionar el cable adecuado para cada caso.

I.2.1 Procedimiento para verificar el funcionamiento de una cuerda vibrante.

1. Se enciende el equipo
2. Se conecta la cuerda al conector del transductor por medio del cable seleccionado.
3. Verificar que la perilla de selección de cuerda vibrante este en la posición correcta ("B" para el modelo 4050 y "C" para el modelo 4000).
4. Verificar que la lectura de la cuerda este dentro del intervalo correspondiente al modelo que se muestra en la tabla I.1.
5. Verificar que la lectura de temperatura sea correcta.
6. Aplicar una pequeña tensión a los extremos de la cuerda y verificar que los valores de deformación cambian dentro del intervalo de cada modelo.

Tabla I.1: Valores característicos para las cuerdas modelo 4000 y 4050 de Geokon

Modelo:	4000	4050
Perilla:	C	B
Unidades:	Microdeformación ($\mu\epsilon$)	Dígitos ($f^2 \times 10^{-3}$)
Intervalo de frecuencia:	400-1000 Hz	1400-3200 Hz
Lectura media:	2500 $\mu\epsilon$	6000 dígitos
Lectura mínima:	1000 $\mu\epsilon$	2000 dígitos
Lectura Máxima:	4000 $\mu\epsilon$	10000 dígitos

El procedimiento anterior es para verificar el funcionamiento de cualquier tipo de cuerda y solamente cambiarán los intervalos de lectura y la selección de la posición de la perilla dependiendo del modelo.

La verificación se debe hacer en el último punto de conexión. Si en este punto hay problemas se debe ir verificando cada uno de los puntos donde se tenga una conexión intermedia o empalmado de cable, con el fin de ubicar donde está el problema.

BIBLIOGRAFÍA.

Alcántara et al. La red de registro de sismos fuertes en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Pasado presente y futuro. México DF, XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 2005, 26 p.

Bennetts Toledo Felipe. Seguimiento de las principales propiedades estructurales de la superestructura del Puente San Cristóbal. México, 2008. 117 p. Tesis de Maestría (Maestría en ingeniería Civil). UNAM, Instituto de Ingeniería

Branko Glišić y Daniele Inaudi. Fibre optic methods for structural Health monitoring. Gran Bretaña. Wiley, 2007. 261 p.

Bolton W. Mecatrónica. 2ª ed. México. Alfaomega, 2006. 537 p.

Eriksson R., "Indoor navigation with pseudolites (fake GPS sat.)", <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:20395/FULLTEXT01> (Consulta: 18/10/2010)

Geokon. Cuerdas vibrantes. http://www.entornoseguro.com/ensesa/M_Geokon.php# (Consulta: 1/10/2010)

Geokon. Instruccion manual Model 4000 vibrating wire strainage. USA, 2005, 27p.

Gómez Roberto, et al. The Chiapas bridge. Technical articles. The Monitor. USA, 2 p. Marzo, 2008

Gómez Roberto, et al. The San Cristóbal bridge. Technical articles. The Monitor. USA, 2 p. Marzo, 2008

GPS image <http://www.google.com.mx/imgres?imgurl=http://www.mendibike.net/wp-content/uploads/2009/04/gpscomofunciona.jpg&imgrefurl/> (Consulta 01/02/2011)

Lázaro Manuel, et al. "Breve historia de la instrumentación electrónica". Instrumentación virtual. Adquisición, procesado y análisis de la señal. Barcelona, Ediciones UPC, 2001. 21-24 p.

Leica Geosystems. User manual ScanStation 2. Versión 1.0. Suiza, 2007. 100p.

López Morales José Daniel Transmisión y recepción punto a punto con fibra óptica. México, 2005. 92 p. Tesis de licenciatura (Ingeniería Mecánica Eléctrica, Área Eléctrico-Electrónica). UNAM, Facultad de Ingeniería

Meli Roberto. Diseño estructural. 2ª ed. México. Limusa 2008. 594 p.

Mendoza García Miguel Angel. Instrumento virtual para la medición de vibración ambiental. México, 1997. 127 p. Tesis de Licenciatura (Licenciatura en Ingeniería Mecánica Eléctrica). UNAM, Facultad de Ingeniería

Mendoza García Miguel Angel. Manual de revisión para cuerdas vibrantes. México, Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2009. 5 p.

Muriá Vila, et al. Experiencia mexicana sobre la instrumentación sísmica de edificios. México. Academia de Ingeniería A.C., 2007. 50 p.

Muriá Vila, et al. Instrumentación del Centro Cultural Universitario de Tlatelolco México. Proyecto 7524. Patrocinado por el Gobierno del Distrito Federal. Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2009. 64 p.

National Instruments. Accelerometers. <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/12> (Consulta: 27/05/2010)

Ogaja Clement, et al. Journal of applied geodesy 2007 Advantages in structural monitoring with Global Positioning System technology 1997-2006. Alemania. De Gruyter Global Reference, 2007. 171-179 p.

Ramos Pascual Francisco. Redes de sensores inalámbricos. España. Universidad Politécnica de Valencia, 2011, 5 p.

Soteras Escofet Jaume, et al. Óptica Geométrica. Barcelona. Editorial Ariel, 2004. 296 p.

Velasco María Guadalupe. Sensor y/o transductor. Querétaro, Qro. MIDE, 2007. 2 p.

Wolf Paul, et al. Topografía. 11ª edición. México. Alfoomega Grupo Editor, 2008. 952 p.

Wolf Stanley, et al. Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio. Traducción Ing. Virgilio González Pozo. México. Prentice Hall, 2001. 584 p.