

**UNIVERSIDAD CENTRAL  
VICERRECTORÍA ACADÉMICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**APLICACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE TÉCNICAS DE  
MONITOREO EN TIEMPO REAL PARA EL CONTROL DE  
ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y DEFORMACIONES EN LA  
PARROQUIA DE SAN ISIDRO LABRADOR**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN  
INGENIERÍA CIVIL**

**MIRIAM MORA HERRERA**

**ING. MIGUEL ANGULO SEGURA**

**SEDE CENTRAL  
NOVIEMBRE, 2024**

## Índice de contenido

Índice de tablas .....	V
Índice de figuras .....	VI
Dedicatoria y agradecimiento.....	1
Capítulo 1: Introducción.....	3
1.1. Planteamiento del problema .....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Objetivo General.....	4
1.4. Objetivos Específicos .....	4
1.5. Justificación.....	5
1.6. Alcance .....	6
1.7. Limitaciones .....	7
1.8. Antecedentes.....	7
Capítulo II: Marco Teórico.....	12
2.1. Monitoreo estructural en tiempo real.....	12
2.2. Parroquia San Isidro Labrador (Iglesia Vázquez de Coronado).....	14
2.3. Equipos de medición .....	18
2.4. Diseño de redes.....	21
2.5. Procesamiento y ajuste de datos .....	26

2.6. Software ARGE® .....	30
2.7. Test estadístico T de Student .....	31
Capítulo III: Marco Metodológico .....	33
3.1. Enfoque de la investigación.....	33
3.2. Método de la investigación.....	37
3.3. Fuentes de información .....	38
3.4. Variables o categorías de análisis .....	39
3.5. Instrumentos .....	41
3.6. Proceso para la recolección y análisis de datos .....	43
Capítulo IV: Análisis de resultados .....	45
4.1. Reconocimiento de campo.....	45
4.2. Simulación de red .....	50
4.3. Determinación de puntos a medir.....	57
4.4. Red conformada para medición.....	71
4.5. Procesamiento de datos para primera época de medición .....	74
4.6. Procesamiento de datos para segunda época de medición .....	83
4.7. Revisión de deformaciones.....	91
4.8. Caso hipotético .....	104
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones .....	108

5.1. Conclusiones.....	108
5.2. Recomendaciones .....	111
Apéndices .....	119

## Índice de tablas

Tabla 1. Variables de la investigación.....	41
Tabla 2. Observaciones sometidas a simulación libre.....	52
Tabla 3. Coordenadas y errores de los puntos de simulación libre .....	53
Tabla 4. Observaciones sometidas a simulación amarrada .....	56
Tabla 5. Coordenadas y errores de los puntos de simulación amarrada.....	56
Tabla 6. Observaciones ajustadas para ajuste libre, época 1 .....	76
Tabla 7. Coordenadas de la red para ajuste libre, época 1.....	77
Tabla 8. Valor de elipses para puntos ajustados en red libre, época 1 .....	78
Tabla 9. Observaciones ajustadas para ajuste amarrado, época 1 .....	80
Tabla 10. Coordenadas de la red para ajuste amarrado, época 1.....	81
Tabla 11. Valor de elipses para puntos ajustados en red amarrada, época 1.....	82
Tabla 12. Observaciones ajustadas para ajuste libre, época 2.....	85
Tabla 13. Coordenadas de la red para ajuste libre, época 2.....	86
Tabla 14. Valor de elipses para puntos ajustados en red libre, época 2 .....	87
Tabla 15. Observaciones ajustadas para ajuste amarrado, época 2 .....	89
Tabla 16. Coordenadas de la red para ajuste amarrado, época 2.....	90
Tabla 17. Valor de elipses para puntos ajustados en red amarrada, época 2.....	90
Tabla 18. Posicionamientos para época 1 y época 2 de la zona de estudio.....	91
Tabla 19. Error estándar para cada punto por época de medición.....	101
Tabla 20. Error estándar total para cada punto.....	102
Tabla 21. Valor calculado T .....	103
Tabla 22. Valor estadístico T hipotético.....	105

## Índice de figuras

Figura 1. Fachada iglesia Vázquez de Coronado .....	16
Figura 2. Estructura metálica de la parroquia en construcción.....	17
Figura 3. Templo en construcción .....	17
Figura 4. Equipos topográficos de medición .....	18
Figura 5. Representación de coordenadas planas .....	22
Figura 6. Metodología de triangulación .....	23
Figura 7. Diagrama de estimación por mínimos cuadrados .....	28
Figura 8. Interfaz de programa ARGE <sup>®</sup> .....	30
Figura 9. Construcción conceptual de variables o categorías.....	39
Figura 10. Estado de la acera en sector oeste a la iglesia .....	46
Figura 11. Estado de la acera en sector norte a la iglesia .....	47
Figura 12. Estado de la acera en sector sur a la iglesia .....	48
Figura 13. Estado de la acera en sector este de la iglesia .....	49
Figura 14. Vista panorámica del punto 1.....	57
Figura 15. Vista frontal del punto 1.....	58
Figura 16. Vista panorámica del punto 2.....	59
Figura 17. Vista frontal del punto 2.....	60
Figura 18. Vista panorámica del punto 3.....	61
Figura 19. Vista frontal del punto 3.....	62
Figura 20. Vista panorámica del punto 4.....	63
Figura 21. Vista frontal del punto 4.....	64
Figura 22. Ubicación del punto 5 .....	65

Figura 23. Ubicación ampliada del punto 5.....	66
Figura 24. Ubicación del punto 6 .....	67
Figura 25. Ubicación ampliada del punto 6.....	68
Figura 26. Ubicación del punto 7 .....	69
Figura 27. Ubicación ampliada del punto 7.....	70
Figura 28. Red de medición final .....	73
Figura 29. Vista en planta del desplazamiento para el punto 5 (columna izquierda).....	91
Figura 30. Pandeo vista frontal Este para punto 5 (columna izquierda) .....	92
Figura 31. Pandeo vista frontal Norte para punto 5 (columna izquierda) .....	93
Figura 32. Vista en planta del desplazamiento para el punto 6 (columna central).....	94
Figura 33. Pandeo vista frontal Este para punto 6 (columna izquierda).....	95
Figura 34. Pandeo vista frontal Norte para punto 6 (columna izquierda) .....	96
Figura 35. Vista en planta del desplazamiento para el punto 7 (columna derecha) .....	97
Figura 36. Pandeo vista frontal Este para punto 7 (columna izquierda) .....	98
Figura 37. Pandeo vista frontal Norte para punto 7 (columna izquierda) .....	99
Figura 38. Reforzamiento de columnas con camisas de acero y fibras de carbono .....	107

## **Dedicatoria y agradecimiento**

Principalmente me gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado y me supliste con todo lo necesario para lograr mis objetivos, siempre me das todo cuanto necesito y mucho más.

A la Universidad Central, por darme la oportunidad de estudiar y ser una profesional.

No puedo dejar de lado el agradecimiento a mis profesores durante toda la carrera profesional, pues todos han aportado con un granito de arena a mi formación, gracias por sus consejos, su enseñanza y más que todo por su amistad.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

## **Resumen**

En este proyecto de graduación se planteó generar un procedimiento de técnicas de monitoreo en tiempo real con el que se puede establecer un control para el análisis estructural y deformaciones al utilizar como zona de estudio la Parroquia de San Isidro Labrador de Vázquez de Coronado. Se eligió dicha estructura para poder ser estudiada al ser una representación fiel de construcción antigua.

Para esto, se comenzó generando una red de control, la cual contempla tres puntos sobre los ejes axiales de tres columnas de la iglesia. La red, medida con estación total, permite obtener las posiciones precisas en el momento de medición de toda la zona de estudio. Este proceso se debe realizar en dos momentos distintos, ya que de ahí se obtendrá el resultado de diferencia o deformación.

También, como parte del proyecto, y con el fin de obtener datos exactos y depurados, se generó un ajuste sobre los parámetros medidos; dicho ajuste permite que la determinación de la deformación o cambio entre ambos momentos de medición se deba solamente a los cambios estructurales que pueda poseer el elemento de estudio en el período estudiado.

Finalmente, se realizó un análisis de prueba estadístico para poder establecer si la diferencia encontrada en el período de medición para cada una de las columnas estudiadas será un indicador de deformación relevante el cual deberá requerir un reforzamiento estructural.

## **Capítulo 1: Introducción**

### **1.1. Planteamiento del problema**

El comportamiento de las estructuras constructivas comprende desde su materialización hasta su destrucción, ya sea porque llegan al final de su vida útil o bien, porque aparece un estado de cargas tal que provoca la ruina de estas. De esta manera, el correcto estudio de las estructuras debe abarcar desde su comportamiento a temprana edad (conforme la estructura va creciendo y alcanzando fuerza y resistencia) hasta su ruina.

Contrario a los métodos de cálculo conocidos actualmente, existen opciones de observación de las estructuras a través de varios instrumentos, los cuales permiten análisis precisos. Este es el caso de la estación total, que permite generar un sistema de control sobre estructuras civiles y establecer de forma eficiente, económica y sencilla, la magnitud del movimiento de estas, según el período de medición que se establezca.

En Costa Rica, no se conoce que se haya trabajado en la implementación de sistemas de control de deformación de obras civiles, en donde exista una correlación entre el aspecto civil y el aspecto topográfico, que permita conocer con antelación la deformación generada por el paso del tiempo en una estructura; lo que, en definitiva, ayudaría a la creación de planes de acción para prevenir, en lo posible, el desmejoramiento de una estructura civil.

La presente investigación plantea como problema cómo generar un insumo metodológico preventivo, que pueda ser utilizado por los profesionales en ingeniería civil para determinar la deformación en una estructura con el paso del tiempo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.3. Objetivo General**

1. Aplicar un procedimiento para conocer los posibles desplazamientos estructurales en obras civiles, utilizando la técnica de monitoreo en tiempo real de topografía, tomando como base la estructura de la iglesia católica de Coronado, con el fin de conocer el grado de deformación de la estructura en un período de estudio, brindando así información preliminar para el desarrollo de trabajos profesionales en el área de la ingeniería civil.

### **1.4. Objetivos Específicos**

1. Establecer los puntos de medición para la estructura objeto de estudio, generando una red de control sobre la misma (iglesia de Coronado), que permitirá establecer los parámetros de posicionamiento, los cuales serán evaluados en el período de análisis.
2. Analizar si existe cambio o deformación en la estructura de estudio, comparando los resultados obtenidos en ambas épocas de medición, utilizando para esto distintos procedimientos de ajuste de datos.
3. Aplicar una prueba estadística, a efecto de determinar si las deformaciones encontradas se consideran significativas, esto, mediante la comparación de los datos tomados en el período de medición.

## **1.5. Justificación**

La carencia de métodos que ayuden a reflejar y analizar la proyección en el cambio de una estructura con el paso del tiempo ha sido la principal fuente de inspiración para esta investigación. Aunado a esto, se plantea la necesidad de brindar información preliminar para el desarrollo de trabajos profesionales en el área del análisis estructural, tomando como base parámetros de posiciones cambiantes en el tiempo sobre elementos construidos, tales como edificios, puentes y otros, que sean sometidos a cargas constantes. Es así como se propone aplicar una metodología para poder cubrir dicha carencia.

La propuesta consta fundamentalmente de dos líneas de aplicación y estudio. La primera, conlleva hacer la medición y el ajuste de una red de puntos ubicados estratégicamente en la iglesia de Coronado y alrededores. Esto generará un parámetro más exacto, al minimizar al máximo los errores de la medición y por ende obtener la mejor determinación de la red. La red, además, será medida en dos fechas diferentes, con un lapso de un mes entre cada una.

La segunda línea de trabajo radica en el análisis comparativo de las coordenadas finales que se obtuvieron de la primera línea de trabajo. Dicho análisis estadístico permitirá conocer si en el tiempo de estudio (1 mes), ha existido una deformación estructural considerable sobre la estructura. De esta forma, se facilitará a un ingeniero civil, conocer con anticipación suficiente, si el elemento en estudio necesitará un mejoramiento estructural o no.

## **1.6. Alcance**

El proyecto que realizar inicia con el reconocimiento en campo, a efecto de determinar cuáles serán los puntos para medir dentro y fuera de la zona en estudio (iglesia de Coronado), siendo que entre ellos debe existir visibilidad, y que, además, deben permanecer inamovibles en el tiempo, debido a la metodología que busca aplicar esta investigación.

Al establecer y analizar la forma de la red, y una vez generada la medición, se iniciará con el proceso de ajuste de los datos, el cual consiste en establecer la mejor aproximación de los puntos ubicados en la iglesia, es decir, las coordenadas.

Los insumos mencionados, serán los que permitirán conocer si ha existido diferencia en las coordenadas en el lapso de aplicación de la metodología, al realizar la comparativa de datos obtenidos al inicio y cierre del período analizado.

Por último, la información obtenida del proceso de medición será analizada con la aplicación de una prueba estadístico, de forma tal que podrá validarse si las diferencias entre los datos que arrojó la investigación en ambos períodos resultan significativas o no.

## 1.7. Limitaciones

Debido al tiempo que se debe considerar para la realización del proyecto de graduación, las épocas de medición se deben efectuar con un mes de diferencia. Sin embargo, entre mayor sea el tiempo entre cada medición, es probable que exista mayor desplazamiento (dependiendo de las cargas a las cuáles estará sometida la estructura de estudio), lo que permitiría conocer más profundamente si existe o no deformación significativa sobre la estructura que se vaya a estudiar. Es decir, la deformación, en este tipo de metodología es dependiente del tiempo de estudio que se elija, a mayor tiempo, mayor probabilidad de variación.

## 1.8. Antecedentes

A continuación, se muestra la explicación de algunos libros y artículos científicos que permiten conocer referencias sobre el proyecto a ejecutar:

- *Análisis comparativo topográfico sobre levantamiento altimétricos con RTK GNSS, Estación Total y Drone en Manta elaborado por Javier Baque-Solis y Luisa Cuadrado-Torres*

Este proyecto ofrece una comparación de resultados tanto en planimetría como en altura con distintos instrumentos de medición, entre ellos la estación total (instrumento que se utiliza para la presente investigación).

El estudio permite así conocer que, al medir con estación total, los resultados fueron mejores que, con el resto de los instrumentos, esto para el escenario en dónde se trabajó con

edificios de distinta altura (Solis et ál.,2022). Esto indica un preludio sobre la elección del instrumento de medición para la realización del estudio de deformación a realizar.

- *Geodesia de precisión aplicada al control de movimientos y deformaciones de la Caldera del Teide elaborado por R. Vieira, M.J. Sevilla, A.G. Camacho y M.D. Martin*

El archivo muestra la metodología empleada para poder conocer cómo se ha desplazado o movido la Caldera del Teide, también demuestra ciertos teoremas sobre el análisis y resultados dependiendo de la medición que se efectúe.

Para generar el estudio parten del hecho de una medición topográfica y para esto deben de generar una red de medición estableciendo cuáles puntos medir y que tengan concordancia con el propósito del estudio (Vieira et ál., 1986). Además, muestra cómo en zonas sísmicas es posible que la actividad y movimiento de las estructuras o zonas de estudio, sea mayor, generando un desplazamiento variable.

- *Stability of historical buildings elaborado por Jan Zalesky, Jaromir Prochazka, Tomas Jirikovsky y Jan Salak*

La idea de este artículo científico es desarrollar una metodología sobre el análisis de estabilidad para las edificaciones históricas, utilizando mediciones topográficas, monitoreo estructural y mediciones geotécnicas, a fin de conocer mejor la interacción de la estructura (Castillo de Praga) con el subsuelo.

Encontrando así que según Zalesky et ál. (2008) en su estudio describe dentro de sus conclusiones la necesidad de tener alta precisión en las mediciones, para que la variabilidad que se presente sea solo producto del movimiento propio de la estructura, lo que concuerda con el ajuste de coordenadas que se realizará dentro del estudio.

- *Structural deformation surveying elaborado por el US Army Corps of Engineers*

La idea de este manual es capacitar y proveer una guía técnica de procedimientos para conocer deformaciones estructurales de manera precisa, su base es en desplazamientos de estructuras hidráulicas, sin embargo, permite generar una base para cualquier estructura que se quiera estudiar.

Dentro del manual se establecen también otros instrumentos de medición como el láser o el GPS, permitiendo conocer la posibilidad de realizar este tipo de comparativas con otros instrumentos a futuro, sin dejar de lado la buena operación de los equipos más clásicos como la estación total o incluso el teodolito.

- *Análisis del impacto en las deformaciones axiales de edificios altos de concreto reforzado al considerar el proceso constructivo y envejecimiento elaborado por María Laura Zúñiga Gamboa*

La tesis presenta un método de análisis estructural con metodología por secuencia constructiva y envejecimiento, lo que permite conocer una propuesta de metodología distinta a la que se estima en este proyecto de graduación.

Dentro de su proyecto, Zúñiga (2017), demostró que el elemento estudiado poseía o no deformaciones estructurales por elemento, en el momento, a través de dos tipos de metodología; sin embargo, no se realizó un estudio del cambio que podría sufrir la estructura con el paso del tiempo, permitiendo que la metodología que se propone en esta investigación se proyecte a futuros trabajos o uniones de trabajos similares que se complementen.

- *Monitoring and assessing structural damage in historic buildings elaborado por Julia Armesto, Pedro Arias, Javier Roca y Henrique Lorenzo*

El artículo propone un procedimiento para poder evaluar la estabilidad del daño estructural de un edificio histórico utilizando fotogrametría.

Si bien la fotogrametría es una práctica distinta a la que se propone en este proyecto, permite conocer que existen otras maneras de determinar con el paso del tiempo si la estructura presenta deformaciones físicas y estructurales que sean significativas y sobre las cuáles se deban tomar medidas de reforzamiento para la estructura en estudio.

De igual manera, según Armesto et. ál (2008) el objetivo de este tipo de proyectos de monitoreo es la detección temprana de daños para poder reaccionar a tiempo de manera apropiada y a tiempo, promoviendo la fotogrametría como un registro continuo que permite un enfoque más completo, económico, portátil y flexible.

- *Estudio del movimiento de estructuras dinámicas mediante el uso de GPS elaborado por Juan Serpas, Manuel Ramírez y Ricardo Colomer*

Este artículo permite conocer la investigación realizada sobre el puente del río Tempisque en Costa Rica, en dónde, a través de metodología GPS, se estableció una metodología para determinar el movimiento dinámico sobre estructuras civiles.

El estudio, realizado por personal de la Universidad Nacional, tuvo como objetivo determinar cambios en posición y forma con respecto al tiempo, para de igual manera prevenir o anticipar posibles daños estructurales antes de que ocurran (Serpas et ál. 2004).

- *Structural deformation monitoring surveys of new administrative building of federal school of surveying, Oyo – Nigeria elaborado por Ibrahim Mohammed y Nura Abdulmumini*

El artículo científico muestra distintas técnicas de monitoreo y postproceso para el análisis estructural de la deformación, en este caso para un edificio administrativo.

Con el objetivo de mejorar la seguridad de los habitantes, Mohammed y Abdulmumini (2016), mediante técnicas de medición con Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y estación total, generaron una red de control topográfica para medir con precisión la estructura tanto a nivel vertical como horizontal y determinar así si era seguro o no habitar en el edificio.

## Capítulo II: Marco Teórico

### 2.1. Monitoreo estructural en tiempo real

El monitoreo estructural en tiempo real o SHM según sus siglas en inglés (Structural Health Monitoring), es una técnica de ingeniería que utiliza sensores o dispositivos de medición para evaluar el estado de una estructura de manera continua o en intervalos regulares. Esta metodología es especialmente relevante para estructuras críticas como puentes, presas, edificios altos, túneles o estructuras con muchos años de construidas, donde el monitoreo de deformaciones, vibraciones, o daños puede anticipar fallos antes de que ocurran colapsos (Farrar & Worden, 2012).

El sistema de SHM combina mediciones, análisis de datos y modelos predictivos para proporcionar una evaluación en tiempo real del estado estructural. Estos sistemas detectan cambios en la respuesta de la estructura debido a factores como:

- a) Cargas dinámicas: Ejemplos de este son el tráfico pesado en puentes o vibraciones sísmicas.
- b) Degradación de materiales: Ejemplos de esto son la corrosión, fatiga de materiales y deterioro.
- c) Movimientos del terreno: Deslizamientos o asentamientos diferenciales. (Farrar & Worden, 2021)

De igual manera, el monitoreo en tiempo real se realiza mediante una red en la que se podría medir diferentes parámetros como:

- a) Acelerómetros: Miden vibraciones y aceleraciones
  
- b) Deformaciones: Miden alargamientos o contracciones en los elementos estructurales
  
- c) GNSS, estaciones y drones: Monitorean desplazamientos de alta precisión en grandes infraestructuras (Doebeling et al., 1996)

Existen varias ventajas del monitoreo en tiempo real, tales como:

- a) Prevención de fallos estructurales: Permite la identificación temprana de fallos, lo que permite tomar medidas preventivas antes de que los problemas sean irreversibles.
  
- b) Optimización del mantenimiento: Reduce la necesidad de inspecciones físicas constantes, ya que los datos proporcionan datos en tiempo real.
  
- c) Seguridad: Mejora la seguridad en estructuras críticas al permitir un monitoreo continuo sin interrumpir las operaciones. (Lynch et al., 2006)

## **2.2. Parroquia San Isidro Labrador (Iglesia Vázquez de Coronado)**

El sitio de estudio para este proyecto es la Parroquia San Isidro Labrador, también conocida como la Iglesia de Coronado, que es una de las estructuras neogóticas más importantes de Costa Rica. Se encuentra ubicada en el distrito cero uno - San Isidro, en el cantón once - Vázquez de Coronado, a unos 12 kilómetros al Noreste de San José. Fue construida entre los años 1880 y 1935, con varias etapas de construcción que reflejan influencias europeas, especialmente del estilo gótico. Su diseño incluye elementos como arcos apuntados, ventanas con vitrales coloridos y contrafuertes voladores, típicos de las iglesias góticas. Dentro de sus características principales se encuentran:

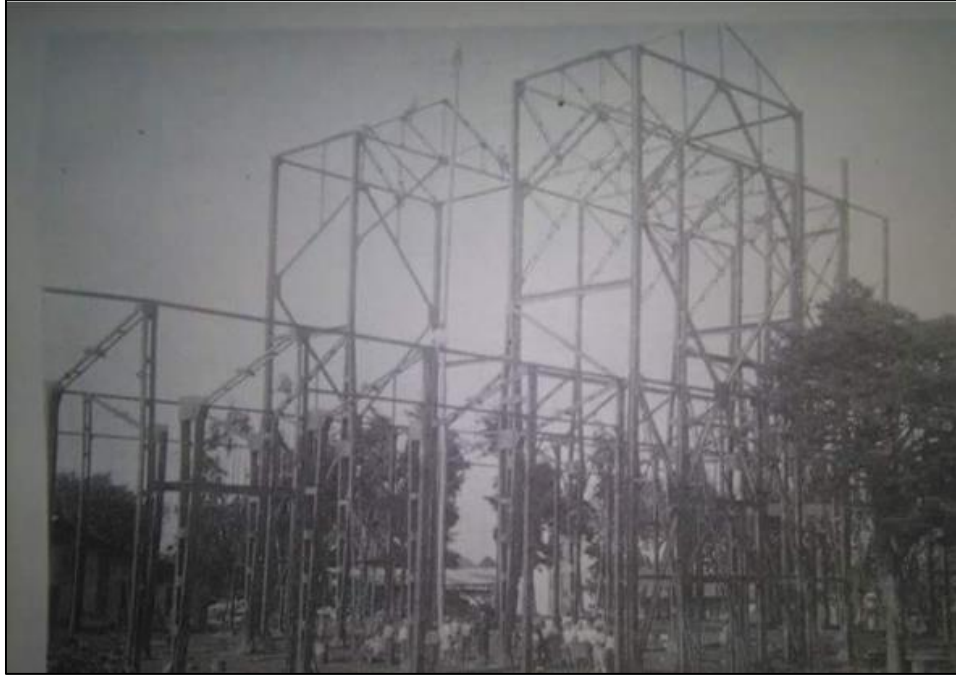
- **Estilo arquitectónico:** Gótico neoclásico, caracterizado por sus altos techos, ventanales con vitrales y detalles ornamentales tanto en el exterior como en el interior. La estructura busca generar una sensación de elevación y espiritualidad.
- **Materiales de construcción:** Se utilizaron materiales locales e importados, destacando la piedra, el hierro y el vidrio para los vitrales. En sus primeras fases, la construcción se hizo con técnicas tradicionales de albañilería.
- **Interior:** La iglesia tiene un altar de estilo neogótico, con detalles en madera tallada. Las paredes están decoradas con imágenes religiosas y vitrales que representan escenas bíblicas. (Castillo, 2017)

Además de lo anteriormente mencionado, es importante mencionar que la iglesia ha sido declarada patrimonio histórico de Costa Rica debido a su valor arquitectónico y su relevancia dentro del desarrollo urbano y religioso de la comunidad de Coronado. Su construcción refleja la influencia europea en el país durante el periodo de finales del siglo XIX y principios del siglo XX (Castillo, 2017).

La iglesia es un punto de referencia clave para la comunidad local y es sede de diversas actividades religiosas y culturales. Además, es un sitio turístico importante debido a su belleza arquitectónica y su valor histórico.



*Figura 1. Fachada iglesia Vázquez de Coronado  
Fuente: Castillo, 2017*



*Figura 2. Estructura metálica de la parroquia en construcción*  
*Fuente: Castillo, 2017*



*Figura 3. Templo en construcción*  
*Fuente: Castillo, 2017*

### 2.3. Equipos de medición

Con la finalidad de encontrar y determinar las coordenadas de los puntos de estudio, se hace uso de la topografía que es considerada como la ciencia, el arte y la tecnología que permite de mejor manera obtener las posiciones relativas de puntos situados por encima de la superficie de la Tierra, sobre dicha superficie o debajo de ella (Wolf & Ghilani, 2015).

Para determinar dichas posiciones, existen distintos tipos de equipo de medición topográfica, siendo que, actualmente el desarrollo de los equipos de topografía y de mapeo ha evolucionado hasta el punto en el cual los instrumentos tradicionales que se usaron hasta las décadas de los sesenta y los setenta (tránsito, teodolito, cinta de acero, entre otros), han sido reemplazados casi completamente por un grupo de instrumentos nuevos de alta tecnología, como los sistemas de posicionamiento global o instrumentos electrónicos de estación total estos últimos permitiendo ser usados para medir y registrar automáticamente las distancias horizontales y verticales, así como ángulos verticales y horizontales (Wolf & Giran, 2015).



*Figura 4. Equipos topográficos de medición  
Fuente: Elaboración propia*

Para este proyecto investigativo, se utilizó la estación total, que es un instrumento utilizado ampliamente y que combina un teodolito electrónico con un distanciómetro.

Este dispositivo mide ángulos horizontales, ángulos verticales y distancias con una alta precisión, lo que permite obtener datos tridimensionales de un área específica, dentro de sus componentes se tiene (Wolf y Ghilani, 2014):

- a) Teodolito electrónico: Permite medir ángulos horizontales y verticales con gran precisión. Estos ángulos se registran digitalmente y se almacenan para su posterior procesamiento.
- b) Distanciómetro: Emite un rayo láser o infrarrojo hacia un objeto o punto en el terreno y mide el tiempo que tarda en regresar al instrumento. Con este dato, se calcula la distancia entre la estación y el punto de interés.
- c) Unidad de procesamiento: La estación total cuenta con un procesador que, al combinar las mediciones angulares y la distancia, permite calcular coordenadas precisas de los puntos medidos, generalmente en un sistema de coordenadas tridimensional.

El funcionamiento de este dispositivo se explica a continuación (Uren y Price, 2010):

- a) Configuración: Se coloca la estación total sobre un trípode y se nivela para asegurar la precisión. El usuario selecciona un punto de referencia conocido (con coordenadas previamente determinadas) y establece la orientación del equipo.
- b) Medición de puntos: El operador apunta el láser hacia los puntos que desea medir (como límites de un terreno, estructuras o cualquier elemento relevante para la investigación) y registra las mediciones de ángulos y distancias.
- c) Procesamiento de datos: La estación total calcula automáticamente las coordenadas de cada punto medido y guarda la información, que luego, puede ser transferida a un software de topografía o CAD para análisis y diseño.

El uso de las estaciones totales dentro del ámbito profesional e investigativo y de desarrollo, generanuevas oportunidades para otros usuarios interesados, que no se encuentren familiarizados con el instrumento y la información que del uso de este se puede desprender, con lo cual se amplía el conocimiento de este, trayendo consigo ventajas como:

- a) Precisión: La estación total permite medir distancias y ángulos con una precisión en orden de milímetros, lo que es fundamental en investigaciones que requieren alta

exactitud, como estudios de geodesia, arqueología o, tal como es el caso de esta investigación, el monitoreo de deformaciones en estructuras.

- b) Eficiencia: Al integrar múltiples funciones (medición de ángulos, distancias y cálculo de coordenadas), una estación total reduce el tiempo de campo necesario para obtener datos completos y precisos.
- c) Versatilidad: Es útil en una amplia gama de estudios científicos, desde la medición de terrenos y volúmenes, hasta el análisis de cambios en el entorno, como movimientos de tierras o erosión.

## **2.4. Diseño de redes**

Para la ingeniería, las coordenadas representan un sistema que permite determinar la ubicación de un punto en la Tierra (Vargas et al. 2023). Dicha ubicación, y para efectos de lo que se requiera estudiar, puede ser tridimensional (Norte, Este y Altura) o bidimensional (Norte, Este).

Las coordenadas bidimensionales o planas, que para efectos de este proyecto son las utilizadas, están conformadas por una serie de líneas verticales ( $y = \text{Norte}$ ) y horizontales ( $x = \text{Este}$ ) que, al interceptarse, forman un reticulado muy útil en la representación de pequeñas áreas en escala grande (Vargas et al. 2023). Ejemplo de esto es el plano cartesiano que se muestra a continuación:

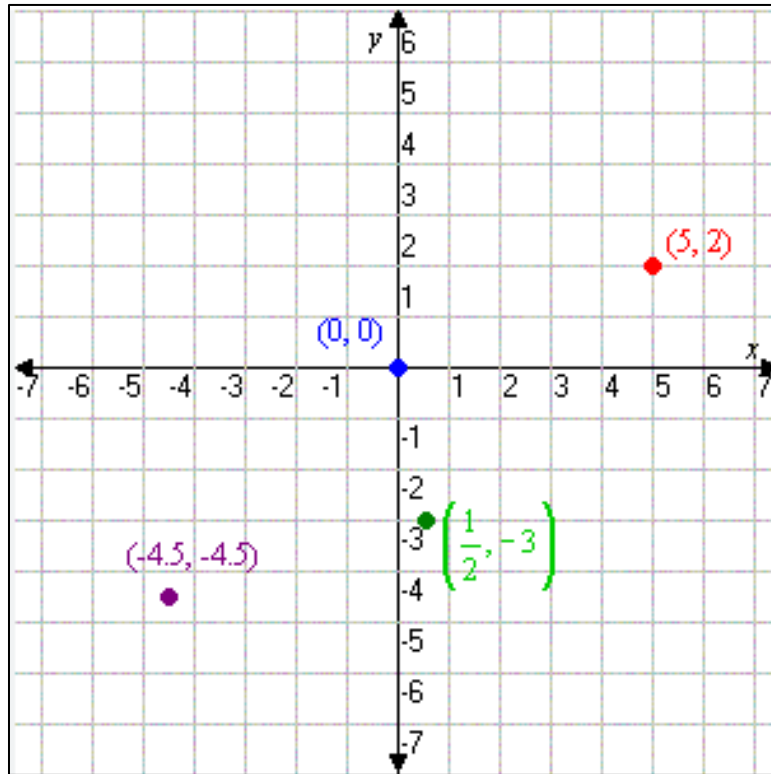
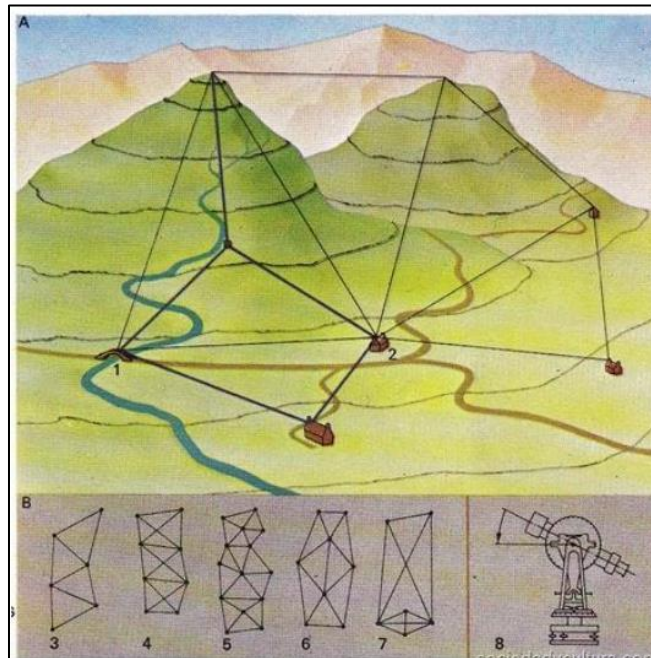


Figura 5. Representación de coordenadas planas  
Fuente: Elaboración propia

Las redes topográficas por su parte son la base de la planeación que permitirá establecer el diseño óptimo de la red, para conocer las coordenadas de los puntos a utilizar (Peña, 2015).

Las redes topográficas son conjuntos de puntos ubicados en la superficie terrestre que han sido medidos y ubicados con gran precisión a través de métodos geodésicos, como observaciones astronómicas, mediciones satelitales (como el GPS), o instrumentos topográficos avanzados (teodolitos, estaciones totales). Estos puntos están interconectados entre sí por observaciones precisas y sirven como base para establecer una referencia común de coordenadas en un área determinada (Ghilani, 2011).

Para la creación de la estructura formada del enlace de los puntos, se construye la red topográfica mediante la metodología de triangulación, que consiste en generar polígonos entre los puntos a utilizar y su cálculo de los vértices (Peña, 2015), como se muestra en la siguiente imagen:



*Figura 6. Metodología de triangulación*  
*Fuente: Peña, 2025*

Las redes geodésicas y topográficas se estructuran mediante la determinación precisa de coordenadas en un sistema de referencia determinado (como el sistema geodésico global WGS84). Para su funcionamiento, se siguen estos pasos generales (Ghilani, 2011):

1. Selección de Puntos de Control: Se eligen puntos sobre el terreno que deben ser ubicados con alta precisión. Estos puntos suelen estar distribuidos estratégicamente en áreas específicas y deben ser estables para asegurar su durabilidad en el tiempo.
2. Mediciones de Ángulos y Distancias: Utilizando equipos especializados (como teodolitos, estaciones totales, GPS geodésicos), se mide la posición relativa entre los puntos de la red. Estas mediciones incluyen ángulos horizontales, distancias y alturas.
3. Cálculo de Coordenadas: Una vez obtenidos los datos de medición, se aplican métodos matemáticos (como el ajuste de mínimos cuadrados) para determinar las coordenadas precisas de cada punto en un sistema de referencia común.
4. Ajuste y Correcciones: El ajuste geodésico permite minimizar los errores asociados a las mediciones y generar una red coherente. Se aplican también correcciones por efectos de la curvatura terrestre y condiciones atmosféricas.

Las redes topográficas tienen múltiples aplicaciones, como las que se muestran a continuación:

1. Cartografía: Estas redes sirven como base para elaborar mapas precisos, permitiendo la representación fiel de la superficie terrestre.
2. Ingeniería y Construcción: Son esenciales en proyectos de ingeniería civil como la construcción de carreteras, puentes, edificios, y presas, pues proporcionan una referencia confiable para el posicionamiento de estructuras y la delimitación de terrenos.
3. Georreferenciación: Las redes geodésicas permiten georreferenciar objetos o ubicaciones con exactitud, siendo útiles en la delimitación de fronteras, catastros, y estudios ambientales.
4. Monitoreo de Movimientos de la Tierra: Estas redes se emplean para monitorear desplazamientos de la corteza terrestre, lo cual es importante para el estudio de movimientos tectónicos, terremotos o deformaciones del terreno.
5. Sistemas de Navegación y Posicionamiento Global: Forman parte de la infraestructura utilizada por sistemas como el GPS para determinar posiciones en cualquier punto del planeta.

## **2.5. Procesamiento y ajuste de datos**

El tratamiento de las observaciones destinadas a cálculos altimétricos o de coordenadas mediante procedimientos como las triangulaciones, ha sido, de manera tradicional, objeto de estudio. Los manuales clásicos de la topografía han permitido en gran parte, describir sistemas, para analizar, compensar y corregir los errores en las observaciones (Rodríguez, 2002).

Como parte de la comprensión de que nunca se obtiene el verdadero valor de una magnitud medida (Zepeda, 2016), nace el ajuste de las observaciones. Ajuste se define como “el procedimiento de cálculo basado en el principio de mínimos cuadrados para estimar parámetros o incógnitas a partir de observaciones...” (Harvey, 1994)

La realización del ajuste por mínimos cuadrados parte de la condición inicial de que las variables que intervienen en los distintos tipos de observaciones son variables aleatorias continuas, y, además, que la distribución de frecuencias de las medidas se adapta a una distribución normal (Harvey, 1994). Por lo tanto, el ajuste de mínimos cuadrados se convierte en un medio matemático que permite conseguir una solución partiendo de un conjunto redundante de observaciones, permitiendo además llevar a cabo el control de calidad de las medidas y un análisis estadístico de la solución encontrada.

En todo problema matemático de este tipo aparecen involucrados tres elementos de

carácter fundamental. En primer lugar, están los llamados parámetros, que no son más que las incógnitas del problema, magnitudes que representan aquello que se desea determinar. En segundo lugar, los observables, que son aquellas magnitudes que se pueden determinar de forma directa o indirecta por observación. Por último, están las funciones o relaciones matemáticas establecidas entre los parámetros y los observables. Al conjunto de parámetros, observables y funciones se les conoce como *modelo matemático*.

Entonces, mediante el ajuste de mínimos cuadrados se intenta explicar la realidad de un problema determinado a través de un modelo matemático, que trata de representar una situación o fenómeno físico o geométrico, el cual, a su vez, se encuentra compuesto por dos mecanismos indispensables y que contribuyen al algoritmo de ajuste: el modelo funcional y el modelo estocástico.

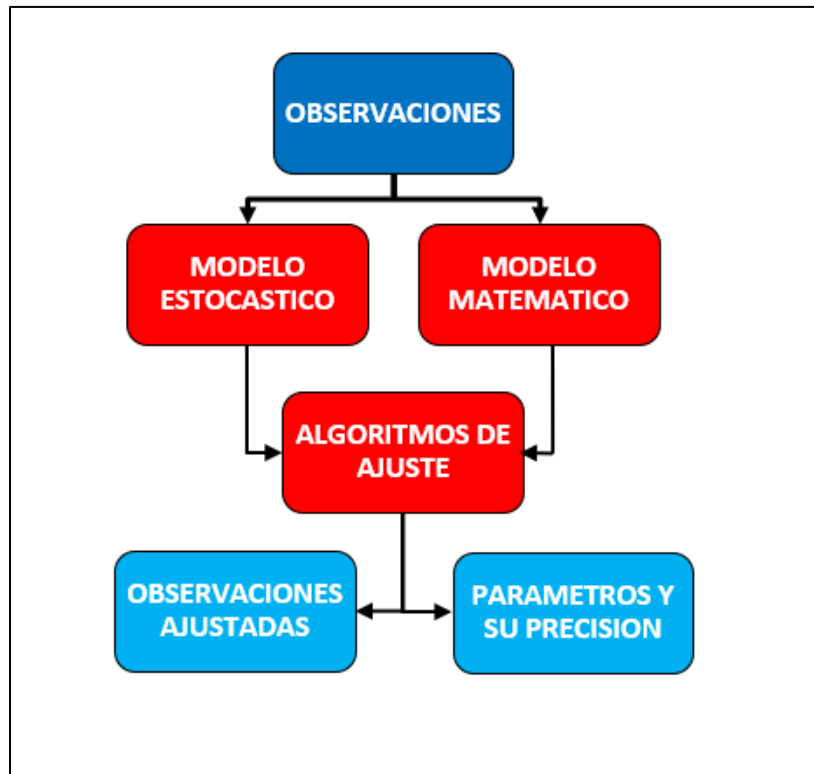


Figura 7. Diagrama de estimación por mínimos cuadrados  
Fuente: Elaboración propia

El ajuste libre, por un lado, se basa en un algoritmo que proporciona resultados donde las exactitudes reflejan la calidad con que se realizaron las observaciones, descartando la influencia de posibles errores en las coordenadas al no considerar puntos fijos o de amarre (Roldan, J. 1988).

Para este caso se definen una serie de puntos tipo “datum”, cuyas coordenadas van a ser parte de las incógnitas del ajuste. El ajuste libre total se basa en el principio de la minimización de la suma de los cuadrados de las incógnitas, lo que equivale a tener una mejor aproximación al campo puntual definido por las coordenadas aproximadas, minimizando así las discrepancias residuales. Este ajuste permite verificar la configuración de la red, así como su diseño y las observaciones.

Siendo así, la otra variante de ajuste, denominada *ajuste amarrado*, considera que las coordenadas de una serie de puntos no varían en el proceso de ajuste (coordenadas fijas), las cuales junto con una serie de observaciones (ángulos, distancias, direcciones, acimutes, desniveles, entre otros), permiten dar o asignar coordenadas de puntos nuevos.

Para este proyecto, las observaciones a ajustar han sido las mediciones de ángulos y distancias entre varios puntos de observación, haciendo uso del modelo funcional linealizado y el modelo estocástico, respectivamente mostrados en las siguientes ecuaciones:

$$l + v = Ax$$

$$\Sigma_{ll} = \sigma_0^2 Q_{ll}$$

$$Q_{ll} = \frac{1}{\sigma_0^2} \Sigma_{ll}$$

$$P = Q_{ll}^{-1}$$

Donde:

$l$  : Vector de observaciones reducidas

$v$  : Vector de residuos

$A$  : Matriz de Configuración

$x$  : Vector de incógnitas

$\Sigma_{ll}$  : Matriz de varianza-covarianza

$Q_{ll}$  : Matriz de factores y cofactores de las observaciones ajustadas

$P$  : Matriz de pesos

$\sigma_0$  : Desviación estándar a priori de la unidad de pesos

## 2.6. Software ARGE<sup>®</sup>

En la actualidad, gracias a los avances en programación y ciencia, es posible realizar los procesos de ajuste con algunos softwares disponibles en el mercado, para el caso de este proyecto se utilizó el denominado ARGE<sup>®</sup>. Dicho programa permite ingresar todos los datos crudos que se midieron de la red para poderlos estudiar, identificando los tipos de ajuste y errores que puedan haberse generado, según las coordenadas que se ingresen, y permite además guardar toda la información recolectada del estudio, así como también modificar lo que sea necesario a efecto de que el ajuste sea aprobado, es decir, generar como resultado final, las coordenadas ajustadas de los puntos de estudio. Actualmente, la Universidad Nacional, ubicada en Heredia, específicamente en la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, posee licencias de dicho software, y fue en dicha institución que se pudo realizar la mencionada metodología.

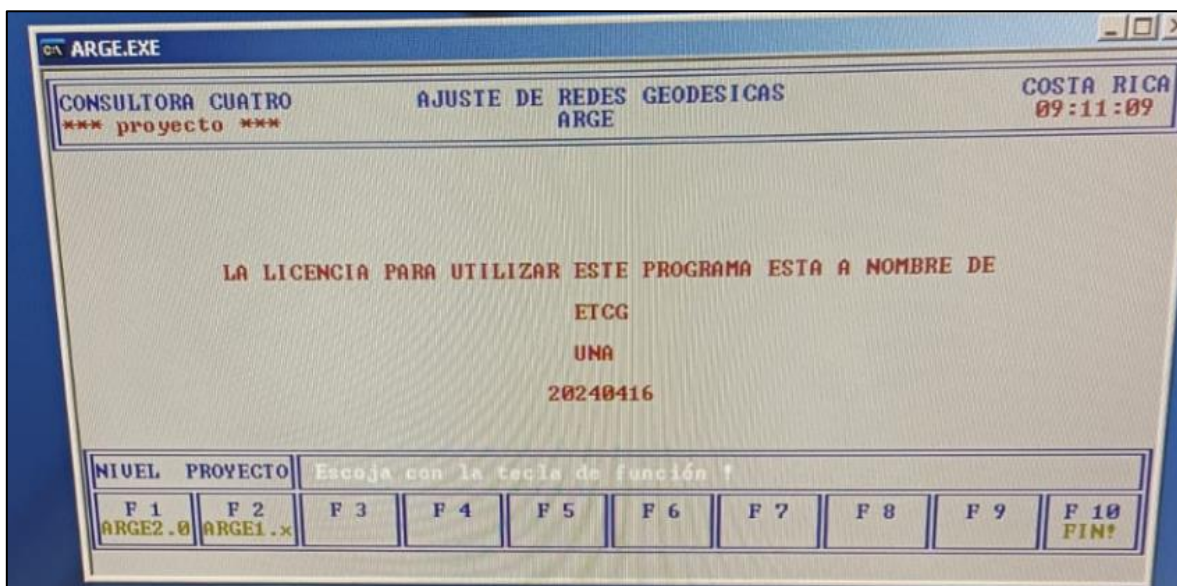


Figura 8. Interfaz de programa ARGE<sup>®</sup>  
Fuente: Software ARGE<sup>®</sup>

## 2.7. Test estadístico T de Student

La prueba estadística T de Student o Test-T fue introducida por William Sealy Gosset en el año 1908. Sealy era un químico que trabajaba para la cervecería Guinness de Dublín. La palabra Student es un seudónimo de escritor, bajo el cual desarrolló la prueba T como una forma sencilla de monitorear la calidad de la cerveza Stout. Publica, en dicho año, su prueba en la revista Biometrika, pero fue forzado a utilizar su seudónimo para mantener en secreto los procesos industriales que se estaban utilizando en la producción de la cerveza (O' Connor et al, 2003).

La prueba T de Student es una prueba estadística utilizada para determinar si hay una diferencia significativa entre las medias de dos grupos de datos. Se usa especialmente cuando las muestras son pequeñas y la desviación estándar de la población es desconocida (Sánchez, 2015)

Existen dos tipos comunes de pruebas T de Student:

1. Prueba T para muestras independientes: Se utiliza cuando se comparan las medias de dos grupos independientes. Por ejemplo, para comparar el rendimiento en una prueba entre dos clases diferentes.
2. Prueba T para muestras relacionadas (pareadas): Se aplica cuando se comparan las medias de dos grupos relacionados o dependientes. Un ejemplo sería, comparar los resultados de los mismos individuos antes y después de recibir un tratamiento.

Como componentes clave de la prueba T se tienen (Sánchez, 2015):

- **Hipótesis nula ( $H_0$ ):** Establece que no hay diferencia significativa entre las medias de los dos grupos (o que la diferencia es igual a cero).
- **Hipótesis alternativa ( $H_1$ ):** Propone que sí existe una diferencia significativa entre las medias.
- **Estadístico T:** Es el valor calculado que se compara con un valor crítico en la distribución T para decidir si se rechaza o no la hipótesis nula.

Siendo así, la fórmula básica para establecer el estadístico T es:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{SE}$$

Donde:

- $\bar{X}_1$  y  $\bar{X}_2$  son las medias de los dos grupos
- $SE$  es el error estándar de la diferencia entre las medias

Si el valor calculado  $t$  es mayor que el valor crítico (dependiendo del nivel de significancia y los grados de libertad), se rechaza la hipótesis nula.

Como ejemplos comunes de aplicación de esta prueba se tienen:

- Comparación de los efectos de dos tratamientos
- Evaluación del rendimiento académico entre dos grupos
- Comparación de promedios en experimentos científicos
- Comparación de elementos medidos en dos momentos distintos

## Capítulo III: Marco Metodológico

### 3.1. Enfoque de la investigación

Según la naturaleza de la investigación realizada, así como la metodología empleada, se determina que el enfoque de la investigación es cuantitativo, al estar orientada a variables medidas, con datos numéricos e instrumentos estandarizados (Hernández y Mendoza, 2020).

La metodología cuantitativa se refiere a un enfoque sistemático y estructurado que utiliza datos numéricos para responder a preguntas de investigación y probar hipótesis. Está basada en el paradigma positivista, que busca explicar fenómenos a través de la medición objetiva y la generalización de los resultados. A continuación, se describen los componentes clave de la metodología cuantitativa:

1. **Objetividad y precisión:** La metodología cuantitativa busca minimizar la subjetividad mediante el uso de herramientas estandarizadas para la recolección y análisis de datos. El investigador actúa como un observador neutral y no interviene en la realidad observada (Creswell & Creswell, 2017).
2. **Recolección de datos numéricos:** Los datos cuantitativos se obtienen a través de encuestas, experimentos, cuestionarios con preguntas cerradas, o mediciones directas de variables (Cohen et al, 2018). Estos datos pueden ser procesados mediante técnicas estadísticas, lo que permite identificar relaciones entre variables.

3. **Análisis estadístico:** El análisis cuantitativo utiliza técnicas estadísticas, tales como la regresión, correlación, o análisis de variación, para probar hipótesis o descubrir patrones significativos en los datos (Field, 2018). El uso de software estadístico como SPSS, R o Stata facilita el manejo de grandes volúmenes de datos.
4. **Generalización de resultados:** Los resultados de los estudios cuantitativos pueden generalizarse a poblaciones más amplias, siempre que la muestra utilizada sea representativa y se respeten los principios del muestreo aleatorio (Bryman, 2016). Esto permite aplicar los hallazgos más allá de los sujetos estudiados.
5. **Enfoque deductivo:** La metodología cuantitativa sigue un enfoque deductivo, lo que implica que la investigación comienza con una teoría o hipótesis que se pone a prueba a través de los datos recolectados (Creswell & Creswell, 2017). Es un proceso secuencial que sigue etapas claramente definidas.
6. **Control de variables:** En los estudios experimentales, la metodología cuantitativa permite el control de variables para aislar el efecto de la variable independiente sobre la dependiente. Esto se realiza mediante la manipulación de variables y el uso de grupos de control, lo que otorga mayor validez interna a los resultados (Shadish et al, 2002).

Para la realización de esta metodología, se siguen etapas básicas que se describen a continuación (Hernández y Mendoza, 2020):

1. Planteamiento del problema: Se formula de manera clara y precisa, estableciendo una o varias hipótesis.
2. Diseño de la investigación: Se selecciona el tipo de investigación (descriptiva, correlacional, causal) y se determina el método de recolección de datos (encuestas, experimentos, etc.).
3. Recolección de datos: Se utilizan instrumentos estandarizados como cuestionarios o herramientas tecnológicas para medir variables específicas.
4. Análisis de datos: Los datos numéricos recolectados se analizan con técnicas estadísticas para verificar las hipótesis o explorar patrones.
5. Interpretación y conclusiones: Los resultados se interpretan en función de los objetivos y se formulan conclusiones generales aplicables a la población de interés.

Para Hernández, Fernández y Baptista (2010), la validez en los métodos mixtos ha sido abordada desde diversas perspectivas. En los primeros estudios de esta naturaleza y aún hoy, en varias investigaciones la validez se trabaja de manera independiente para los enfoques cuantitativo y cualitativo, buscando validez interna y externa para el primero, y la dependencia y otros criterios para el segundo.

Sin embargo, recientemente ha surgido una propuesta de autores como Johnson y Onwuegbuzie (2004), Hernández Sampieri y Mendoza (2008) y Tashakkori y Teddlie (2003), que incorporaronn varios elementos para la validez y la calidad de los diseños mixtos, de los cuales destacan: (i) rigor interpretativo, (ii) calidad en el diseño y (iii) legitimidad.

Se denota así que, para esta investigación, si se analizan los objetivos planteados, las observaciones y mediciones de la zona de estudio, los análisis de los puntos medidos y las pruebas estadísticas hacen que se clasifique como cuantitativa.

### 3.2. Método de la investigación

De acuerdo con los objetivos planteados en la presente investigación, el método de investigación cuantitativa que mejor se ajusta es el método *descriptivo y correlacional*, con el uso de análisis estadístico y medición precisa a lo largo del tiempo. Se explica a continuación esta metodología:

1. Método descriptivo: Se utiliza para observar y describir las características de una población o fenómeno, este proceso busca observar, describir y documentar fenómenos tal como ocurren sin intervenir o manipular variables (Creswell & Creswell, 2017). Esta metodología se implementa en la investigación, al determinar los puntos de medición estableciendo una red de control que abarcó la iglesia de Coronado, lo que implicó un proceso sistemático de recolección de datos de coordenadas para ciertos puntos de la estructura (la iglesia).
2. Método correlacional: Busca identificar la relación o grado de asociación entre dos o más variables sin manipularlas (Bryman, 2016). Siendo así, al comparar los datos (posiciones) obtenidos en dos períodos distintos para poder evaluar si existe una relación significativa entre los cambios observados, se hizo uso del método correlacional. Por otro lado, el uso de pruebas estadísticas en investigaciones cuantitativas es crucial para determinar la magnitud y la significancia de las relaciones entre los datos recolectados (Field, 2018). En este contexto, las técnicas estadísticas se aplican para probar si los cambios detectados en las observaciones son lo suficientemente grandes como para considerarse deformaciones.

En conjunto, esta investigación utilizó un método descriptivo para obtener y describir los datos medidos de la estructura en dos momentos distintos, y un método correlacional para analizar los desplazamientos o deformaciones mediante análisis estadístico. Este enfoque cuantitativo se apoya en la recolección de datos precisos y su posterior análisis para probar hipótesis sobre los cambios en la estructura a lo largo del tiempo.

### **3.3. Fuentes de información**

Las fuentes de información para un trabajo investigativo de este tipo, es decir, enfocado en el análisis estructural mediante procedimientos de observación y métodos cuantitativos, resultan claves para garantizar la precisión y validez del estudio.

Como fuentes primarias, definidas como aquellas que proporcionan datos de primera mano (Hurtado, 2000), se tienen los datos originales medidos, es decir, la información obtenida en el campo mediante el uso de la estación total como equipo de medición, es a partir de estos datos que se pueden realizar las comparaciones en ambas épocas de medición. Además, se contó con la experiencia del Dr. Jorge Moya Zamora, profesor de la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, quien aportó conocimiento e ideas para obtener los mejores resultados del proyecto.

De igual manera, como fuentes secundarias, se consultaron distintos artículos académicos y estudios previos encontrados en revistas científicas y que permiten conocer un poco más sobre la temática de deformación estructural mediante el uso de la observación y medición

de varios parámetros. Por otra parte, se analizaron libros especializados que explican los principios teóricos y prácticos sobre el uso de redes, ajustes y metodología de medición. Aunado a esto, fue posible consultar varias bases de datos académicas como Scopus, Google Scholar o Science Direct, que dan la opción de acceder a una amplia variedad de estudios, artículos y recursos académicos relevantes y relacionados con esta investigación.

### 3.4. Variables o categorías de análisis

Según Rivero 2020, las variables o categorías en una investigación son todo aquello que se va a medir, la información que se recolecta, o bien, los datos que se recaban con la finalidad de responder las preguntas y objetivos de investigación, las cuales deben estar especificadas en la hipótesis y/o la premisa. Se conceptualiza de la siguiente manera qué son las variables o categorías:

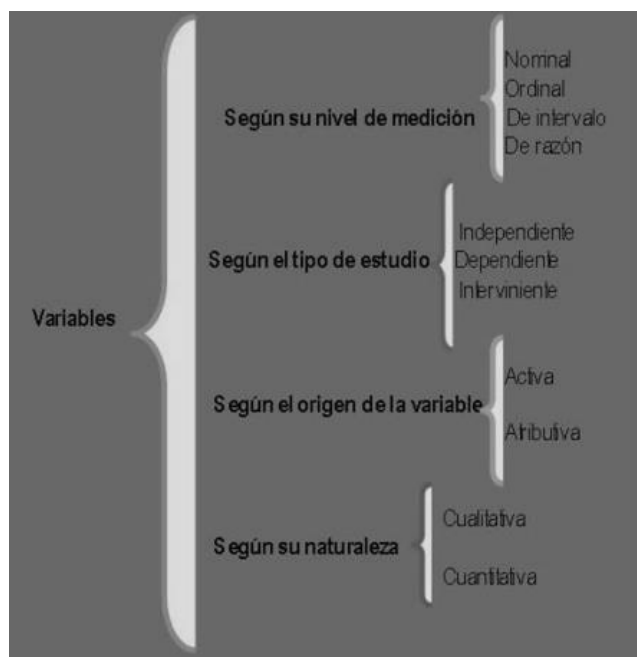


Figura 9. Construcción conceptual de variables o categorías  
Fuente: Rivero, 2020

Se desprende de la figura anterior, que para la investigación cuantitativa se proporcionan variables, lo cual cobra sentido dado que estas son las características o variables que serán medidas y analizadas para determinar el objetivo propuesto.

Se detalla a continuación, según los objetivos planteados en esta investigación, el tipo de variable a utilizar en cada caso:

<b>Objetivos</b>	<b>Tipo de variable</b>
Establecer los puntos de medición para la estructura objeto de estudio, generando una red de control sobre la misma (iglesia de Coronado), que permitirá establecer los parámetros de posicionamiento, los cuales serán evaluados en el período de análisis.	Se considera que la variable son las coordenadas, que son independientes. Por otro lado, el tiempo también es una variable, ya que el lapso entre las dos épocas de medición permitirá la comparación respectiva.
Analizar si existe cambio o deformación en la estructura de estudio, comparando los resultados obtenidos en ambas épocas de medición, utilizando para esto distintos procedimientos de ajuste de datos.	El ajuste, es una variable igualmente independiente, la misma influirá en los resultados obtenidos y la precisión del análisis.
Aplicar una prueba estadística, a efecto de	Los desplazamientos son una variable

determinar si las deformaciones encontradas se consideran significativas, esto, mediante la comparación de los datos tomados en el período de medición.	dependiente, y resulta ser la variable de mayor interés. Se ha medido como el cambio de las coordenadas de los puntos de medición entre los dos períodos estudiados.
---	--

*Tabla 1. Variables de la investigación  
Fuente: Elaboración propia*

### 3.5. Instrumentos

- Estación total: Se conoce con este nombre, al instrumento que integra en un solo equipo las funciones realizadas por el teodolito electrónico, un medidor electrónico de distancias y un microprocesador para realizar los cálculos que sean necesarios para determinar las coordenadas rectangulares de los puntos del terreno. Entre las operaciones que realiza una estación total se pueden mencionar: la obtención de promedios de mediciones múltiples angulares y de distancias, correcciones por constantes de presión y temperatura, curvatura y refracción, así como el cálculo de coordenadas de los puntos levantados (Pachas, 2009).
- ARGE<sup>®</sup>: El software ARGE es una herramienta utilizada para el ajuste de redes geodésicas y se basa en el método de los mínimos cuadrados, un procedimiento común utilizado para mejorar la precisión de las coordenadas de puntos de medición. Este software permite el análisis de redes planimétricas (2D) y altimétricas (1D), y es útil para estudiar deformaciones estructurales a lo largo del tiempo. Entre sus características están el ajuste iterativo, la detección de errores groseros, y el cálculo

de elipses de error, lo que lo hace adecuado para proyectos que requieren alta precisión (Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, 2021). Es por esto por lo que, la capacidad del software para minimizar errores en los datos observados es esencial para asegurar la confiabilidad de los resultados.

- AutoCAD: Es un software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) ampliamente utilizado en industrias como la arquitectura, la ingeniería y la construcción. Este programa, desarrollado por Autodesk, permite a los usuarios crear diseños en 2D y 3D con gran precisión y eficiencia. Entre sus características principales se incluyen herramientas para modelado en 3D, generación de planos, dibujo técnico, y edición detallada de geometrías. Además, AutoCAD es compatible con una variedad de formatos de archivo, como DWG, lo que facilita la colaboración y el intercambio de datos entre profesionales (Autodesk, 2023). El software ha permitido obtener una idea general de lo que se midió para esta investigación.
- Excel: Microsoft Excel es una herramienta de software utilizada para la gestión y análisis de datos a través de hojas de cálculo. Es considerablemente empleada en diversas áreas, como finanzas, contabilidad, ingeniería y estadística, debido a su capacidad para organizar, manipular y visualizar grandes volúmenes de datos (Microsoft, 2023). Una de las funciones más útiles de Excel en el análisis estadístico es la capacidad de realizar pruebas de hipótesis, entre las cuales se encuentra la prueba T para muestras independientes (prueba T de dos colas, conocida como prueba T de Student o t-test inv.2c).

### **3.6. Proceso para la recolección y análisis de datos**

El proceso de recolección y análisis de datos debe seguir una metodología rigurosa y precisa, que garantice la exactitud de las mediciones y permita identificar de manera clara las posibles deformaciones estructurales en la iglesia de Coronado. Se puede decir así, que la recolección y análisis se dividen de la siguiente manera:

1. **Recolección de datos:** Este proceso conlleva la ubicación de los puntos de control (puntos que serán medidos), se debe tomar en cuenta la visibilidad y accesibilidad de lo que se pretende medir. Con esto se llevará a cabo el diseño de la red de control, combinando puntos en el terreno y otros en la estructura misma (Iglesia de Coronado).
2. **Campaña de medición:** Se utiliza para medir equipo de gran precisión, se realiza medición de todos los puntos en la red diseñada asegurándose de medir múltiples veces por punto para minimizar errores, se documenta igualmente toda la información obtenida y se asegura que todos los datos estén debidamente ajustados en función de las correcciones por errores instrumentales, atmosféricos y de configuración de la red.
3. **Segunda campaña de medición:** Un mes después de la primera campaña, se vuelven a medir los mismos puntos y variables de la primera campaña de medición, tomando en cuenta que se utilizan los mismos equipos y considerando que las condiciones climáticas y atmosféricas sean lo más similares posibles para garantizar la mejor comparación entre ambas épocas.

4. Procesamiento de datos de primera campaña: Se importan las coordenadas, ángulos y distancias medidas en el software Arge<sup>®</sup> para realizar el procesamiento de datos y posterior análisis.
  
5. Procesamiento de datos de la segunda campaña: De igual manera, se importan todos los datos medidos (ángulos y distancias) en el software Arge<sup>®</sup> para realizar el segundo procesamiento de datos y análisis.
  
6. Proceso de análisis estadístico: Con ambas épocas ajustadas y determinadas las diferencias de coordenadas entre los puntos de estudio entre ambas épocas de medición, se puede realizar la prueba T Student para determinar si estadísticamente hablando, existe o no un desplazamiento significativo en los puntos de estudio entre las épocas de medición establecidas, en este caso, en el lapso de un mes.

## Capítulo IV: Análisis de resultados

### 4.1. Reconocimiento de campo

Como primer punto, y con el fin de conocer mejor el sitio de trabajo para la investigación, fue necesaria una visita de campo. Esta visita permitió conocer en cuáles posibles sitios se podrían colocar los puntos de medición, verificando la visibilidad entre puntos, pues será importante que los puntos que iban a estar alrededor de la iglesia de Coronado tuvieran visibilidad entre ellos. Se verificó el estado de aceras y caños que son por lo general los sitios óptimos donde se puede densificar los puntos de medición.

De igual manera, era necesario que los puntos que se fueran a colocar estuvieran en espacios que perduraran en el tiempo ya que se debía medir dos veces en tiempos distintos, además era importante el elemento que se utilizara para la densificación de la red, eligiéndose para este caso el clavo de acero, el cual permitió una perdurabilidad mayor que un clavo normal.

Se muestran a continuación imágenes del estado de los alrededores por los cuatro costados de la iglesia de Coronado:



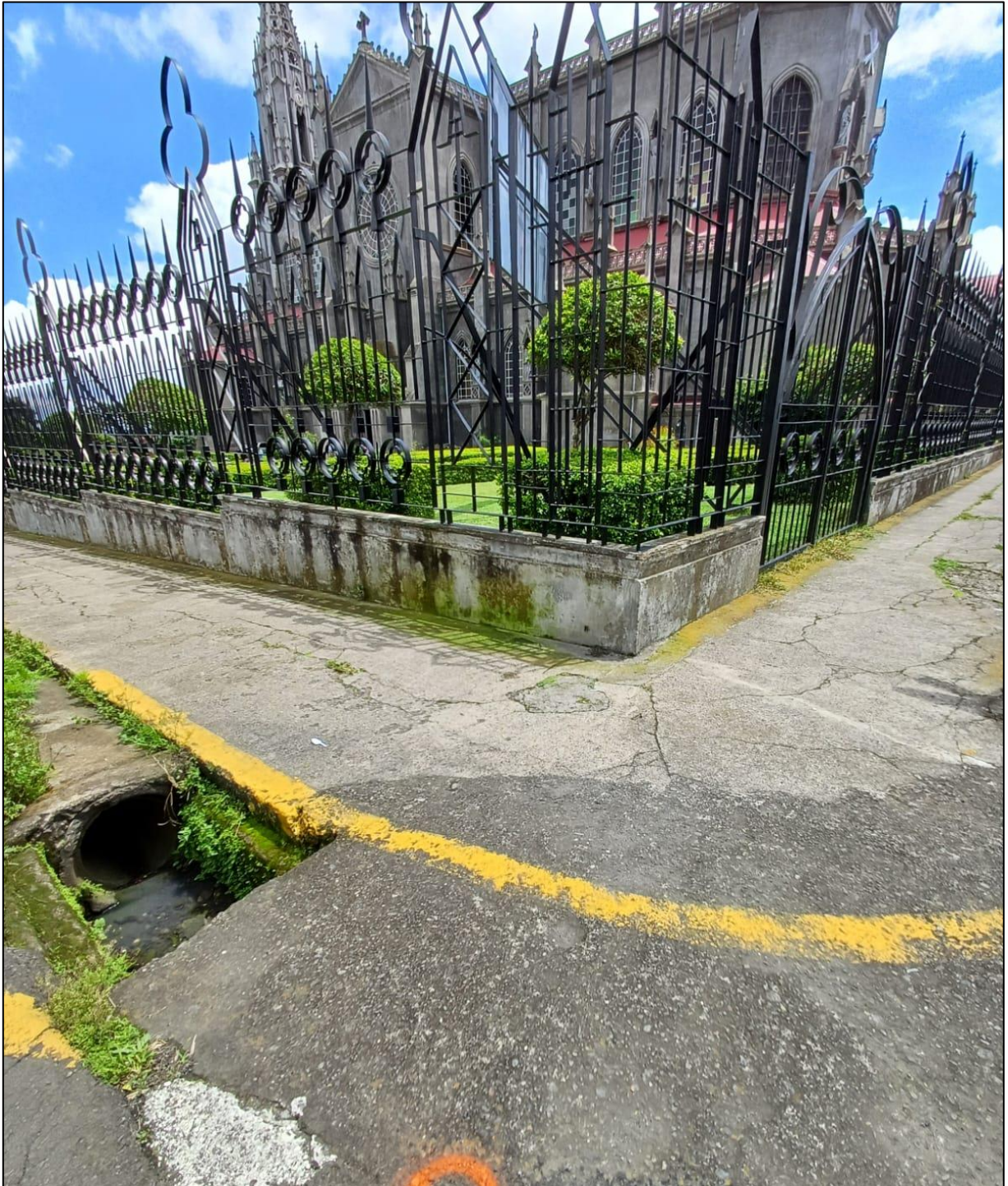
*Figura 10. Estado de la acera en sector oeste a la iglesia  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 11. Estado de la acera en sector norte a la iglesia  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 12. Estado de la acera en sector sur a la iglesia  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 13. Estado de la acera en sector este de la iglesia  
Fuente: Elaboración propia*

## 4.2. Simulación de red

Como un paso previo a la densificación y medición para la investigación, se realizó una simulación con los puntos y datos a medir, se establece que se medirían cuatro vértices abajo en los alrededores a la iglesia de Coronado, y tres vértices por encima de la estructura de la iglesia los cuales representan los ejes axiales de tres columnas que posee la estructura, estos constituyeron los puntos de análisis y estudio de esta investigación.

La simulación se realizó con el software llamado Arge<sup>®</sup>, el cual generó varios resultados. Se presenta a continuación la descripción de los elementos medidos.

Los ángulos y distancias que se sometieron a observación en la simulación fueron los siguientes:

<b>Tipo de medición</b>	<b>Estación</b>	<b>Hacia</b>
Ángulo	PR01	PR04
		PR07
Ángulo	PR01	PR04
		PR05
Ángulo	PR01	PR04
		PR02
Ángulo	PR01	PR04

		PR06
Ángulo	PR02	PR01
		PR05
Ángulo	PR02	PR01
		PR06
Ángulo	PR02	PR01
		PR03
Ángulo	PR02	PR01
		PR07
Ángulo	PR03	PR02
		PR06
Ángulo	PR03	PR02
		PR07
Ángulo	PR03	PR02
		PR04
Ángulo	PR03	PR02
		PR05

Ángulo	PR04	PR03
		PR07
Ángulo	PR04	PR03
		PR05
Ángulo	PR04	PR03
		PR01
	PR04	PR03
		PR06
Distancia	PR01	PR04
Distancia	PR01	PR02
Distancia	PR02	PR03
Distancia	PR03	PR04
Distancia	PR01	PR05
Distancia	PR01	PR07

*Tabla 2. Observaciones sometidas a simulación libre  
Fuente: Elaboración propia*

A partir de la conformación de la red de simulación y con la idea de medir las observaciones anteriormente descritas, la simulación de la red libre arrojó las siguientes coordenadas y su respectivo error:

<b>Punto</b>	<b>Coordenada Este</b>	<b>Coordenada Norte</b>	<b>Sigma Este (mm)</b>	<b>Sigma Norte (mm)</b>
PR01	499275.900	1103146.600	2.9	2.0
PR02	499196.100	1103128.000	1.5	2.5
PR03	499189.500	1103064.500	2.4	1.7
PR04	499275.800	1103037.800	2.1	2.6
PR05	499229.200	1103107.100	2.6	2.7
PR06	499220.600	1103090.000	2.7	2.7
PR07	499226.300	1103078.800	3.1	2.6

*Tabla 3. Coordenadas y errores de los puntos de simulación libre  
Fuente: Elaboración propia*

Se comprobó con la información mostrada anteriormente, que la configuración y observaciones planteadas para la red simulada eran posibles de llevar a cabo a la realidad.

Sin embargo, también era necesario conocer cómo se comportaría la red al ser fijada a los vértices de abajo, ya que lo que se quiere conocer son las coordenadas de las columnas

de la iglesia.

Por lo que, para generar la red anterior, se contó con 20 observaciones, distribuidas en 12 ángulos y 8 distancias, descritos a continuación:

<b>Tipo de medición</b>	<b>Estación</b>	<b>Hacia</b>
Ángulo	PR01	PR04
		PR07
Ángulo	PR01	PR04
		PR05
Ángulo	PR01	PR04
		PR06
Ángulo	PR02	PR01
		PR05
Ángulo	PR02	PR01
		PR06
Ángulo	PR02	PR01
		PR07
Ángulo	PR03	PR02

		PR06
Ángulo	PR03	PR02
		PR07
Ángulo	PR03	PR02
		PR05
Ángulo	PR04	PR03
		PR07
Ángulo	PR04	PR03
		PR05
Ángulo	PR04	PR03
		PR06
Distancia	PR01	PR05
Distancia	PR01	PR07
Distancia	PR02	PR05
Distancia	PR02	PR06
Distancia	PR03	PR06
Distancia	PR03	PR07

Distancia	PR04	PR05
Distancia	PR04	PR07

*Tabla 4. Observaciones sometidas a simulación amarrada  
Fuente: Elaboración propia*

Con las observaciones anteriores, el programa arrojó como resultado las siguientes coordenadas para los puntos sobre la iglesia, para la simulación amarrada:

<b>Punto</b>	<b>Coordenada Este</b>	<b>Coordenada Norte</b>	<b>Sigma Este (mm)</b>	<b>Sigma Norte (mm)</b>
PR05	499229.200	1103107.100	3.3	2.7
PR06	499220.600	1103090.000	2.8	3.0
PR07	499226.300	1103078.800	3.4	2.7

*Tabla 5. Coordenadas y errores de los puntos de simulación amarrada  
Fuente: Elaboración propia*

Es así como, a través de ambas simulaciones realizadas, se comprobó la posibilidad de generar la red con una forma igual o similar a la establecida en la simulación, generando así efectividad a la hora de densificar los puntos que se ubicaron abajo y determinar los tres puntos de arriba que estuvieron sobre la estructura de la iglesia de Coronado, además de la optimización de resultados con las observaciones que se esperaban realizar al momento de las mediciones.

### 4.3. Determinación de puntos a medir

Tomando como base la efectividad en ubicación de los puntos que arrojó el análisis anterior, se pudo proceder a la densificación de la red, es decir, la determinación final de la ubicación de los puntos que constituyeron la zona de estudio de la estructura en cuestión, eligiéndose así los siguientes siete puntos:



*Figura 14. Vista panorámica del punto 1*  
*Fuente: Elaboración propia*



*Figura 15. Vista frontal del punto 1  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 16. Vista panorámica del punto 2  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 17. Vista frontal del punto 2*  
*Fuente: Elaboración propia*



*Figura 18. Vista panorámica del punto 3  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 19. Vista frontal del punto 3  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 20. Vista panorámica del punto 4  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 21. Vista frontal del punto 4  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 22. Ubicación del punto 5  
Fuente: Elaboración propia*



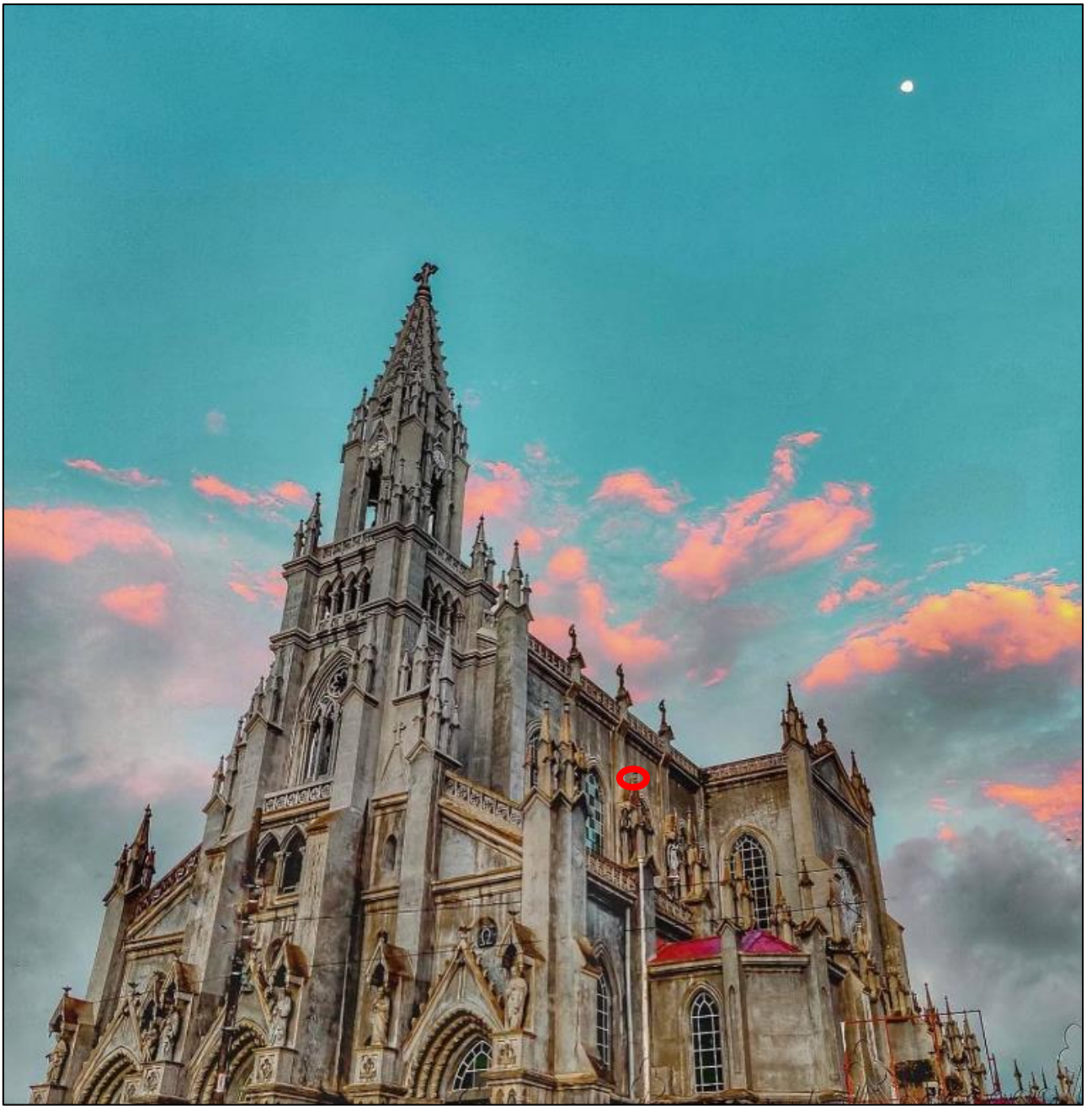
*Figura 23. Ubicación ampliada del punto 5*  
*Fuente: Elaboración propia*



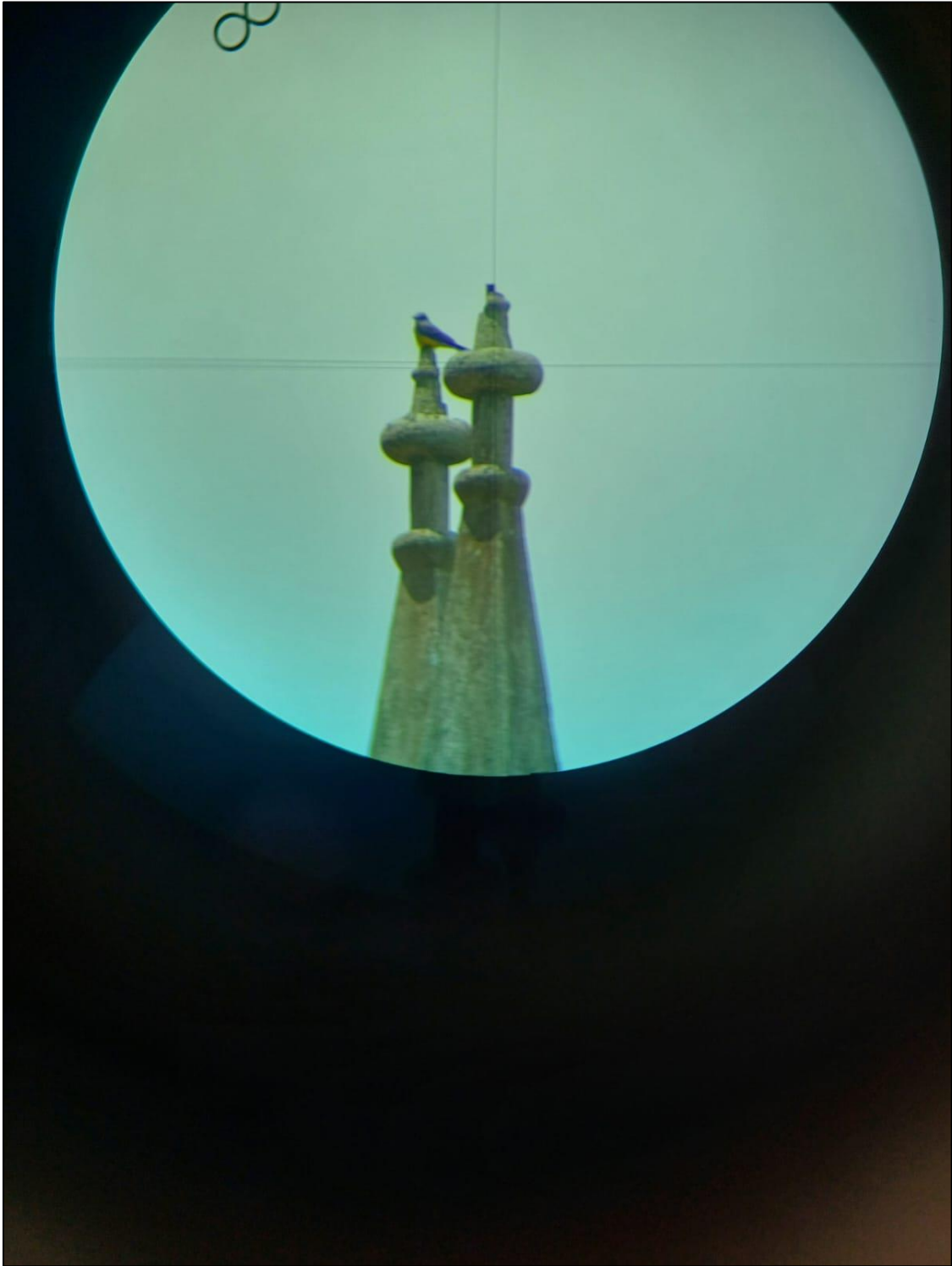
*Figura 24. Ubicación del punto 6  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 25. Ubicación ampliada del punto 6  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 26. Ubicación del punto 7  
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 27. Ubicación ampliada del punto 7  
Fuente: Elaboración propia*

Como se denotó anteriormente en las imágenes mostradas, los cuatro puntos debajo de la iglesia de Coronado se ubicaron uno en cada costado, con visibilidad entre ellos, y los tres puntos a estudiar en la estructura se ubicaron en los tres ejes axiales de las columnas localizadas a los costados y frente de la fachada Oeste.

#### **4.4. Red conformada para medición**

Para cada una de las épocas de medición, se establecieron las mismas observaciones y la misma ubicación de los puntos de medición, esto es primordial para poder hacer el estudio.

Por lo que, la red que quedó conformada para esta medición consistió en los siete vértices anteriormente descritos y mostrados, y se pudo hacer un total de veintiocho observaciones, por temas de visibilidad hacia los puntos elegidos, no fue posible seguir la misma forma de la red que se planteó durante el proceso de simulación.

Siendo así, se muestra a continuación la red final conformada para el estudio de esta investigación:



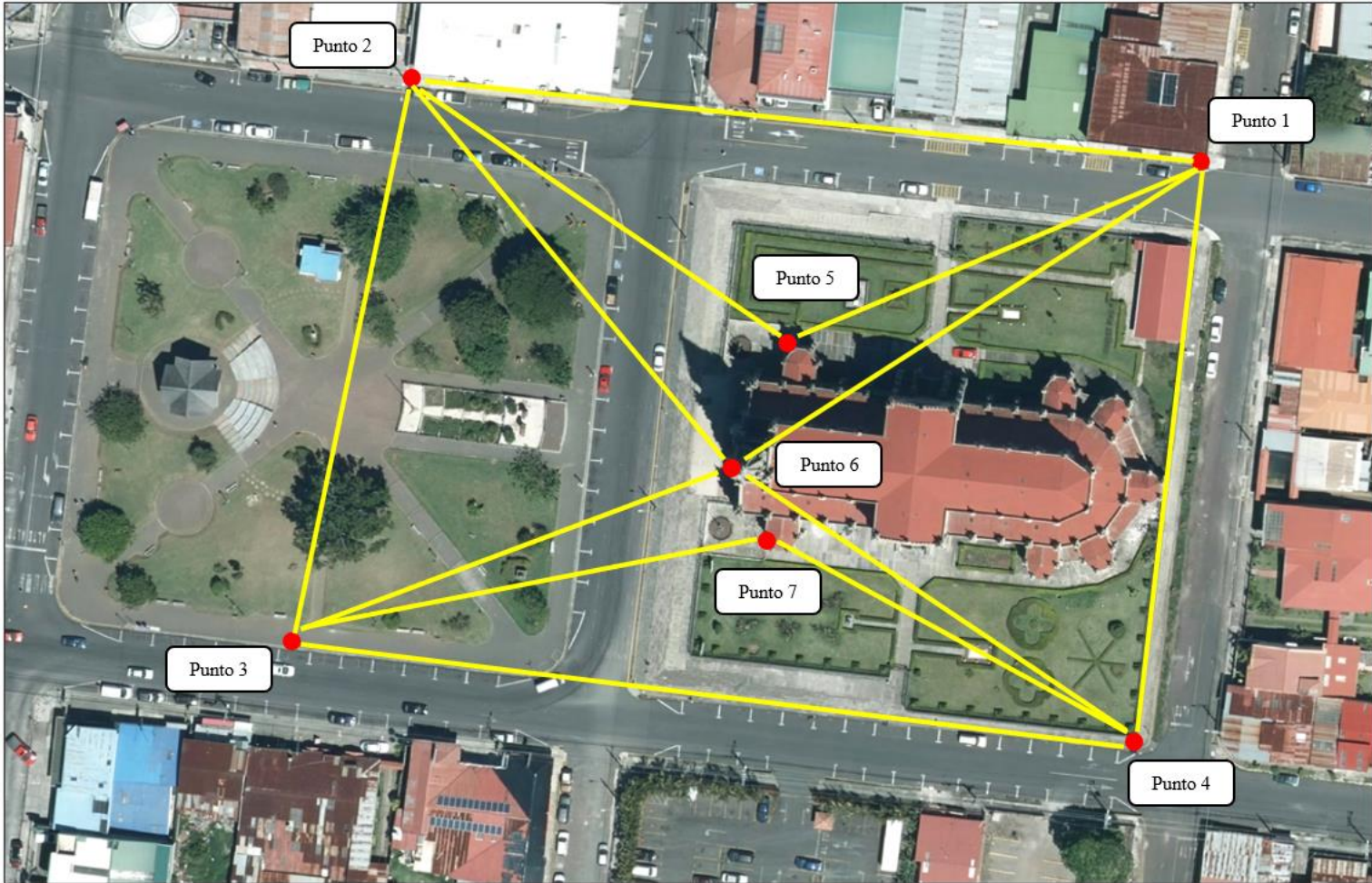


Figura 28. Red de medición final  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.5. Procesamiento de datos para primera época de medición

La primera fase para este proceso realizado fue el ajuste libre, pues se debía conocer a través de este, que la configuración de la red estaba correcta y que no existían errores en las observaciones realizadas, tomando en cuenta que los ángulos fueron medidos en gones y las distancias en metros. Siendo así, se muestran las observaciones utilizadas para el ajuste:

<b>Tipo de observación</b>	<b>Estación</b>	<b>Hacia</b>	<b>Medida</b>	<b>Ajustada</b>	<b>Diferencia</b>
Ángulo	P1	P4	97.66150	97.66745	-0.006
		P2			
Ángulo	P1	P4	56.46210	56.46558	-0.003
		P6			
Ángulo	P1	P4	65.56410	65.56481	-0.001
		P5			
Ángulo	P2	P1	101.88610	101.88447	0.002
		P3			
Ángulo	P2	P1	43.44550	43.44469	0.001
		P5			

Ángulo	P2	P1	58.02750	58.02658	0.001
		P6			
Ángulo	P3	P2	100.38470	100.37058	0.014
		P4			
Ángulo	P3	P2	49.70880	49.71913	-0.010
		P6			
Ángulo	P3	P2	68.41640	68.41750	-0.001
		P7			
Ángulo	P4	P3	100.08030	100.07749	0.003
		P1			
Ángulo	P4	P3	26.03430	26.03358	0.001
		P7			
Ángulo	P4	P3	36.03520	36.02931	0.006
		P6			
Distancia	P1	P4	100.332	100.333	-0.001
Distancia	P1	P2	113.037	113.039	-0.002
Distancia	P2	P1	113.041	113.039	0.002

Distancia	P2	P3	96.327	96.332	-0.005
Distancia	P3	P2	96.337	96.332	0.005
Distancia	P3	P4	112.287	112.285	0.002
Distancia	P4	P3	112.288	112.285	0.003
Distancia	P4	P1	100.334	100.333	0.001
Distancia	P1	P6	89.348	89.354	-0.006
Distancia	P1	P5	76.893	76.894	-0.001
Distancia	P2	P5	58.908	58.909	-0.001
Distancia	P2	P6	68.165	68.162	0.003
Distancia	P3	P6	61.541	61.551	-0.010
Distancia	P3	P7	56.513	56.515	-0.002
Distancia	P4	P7	68.377	68.379	-0.002
Distancia	P4	P6	81.988	81.994	-0.006

*Tabla 6. Observaciones ajustadas para ajuste libre, época 1  
Fuente: Elaboración propia*

Se denota que las observaciones ajustadas mostradas anteriormente poseen diferencias muy pequeñas, lo cual coincide con lo que se espera de una medición de precisión con estación total. Es a partir de estas observaciones que el ajuste libre arrojó las siguientes coordenadas para todos los siete vértices que componen la red:

<b>Punto</b>	<b>Coordenada Este</b>	<b>Error Este (mm)</b>	<b>Coordenada Norte</b>	<b>Error Norte (mm)</b>
P1	5000.002	2.1	10000.000	1.9
P2	4888.913	1.8	10020.908	2.2
P3	4868.301	2.2	9926.808	1.9
P4	4977.844	1.9	9902.144	2.3
P5	4926.968	4.6	9975.941	4.9
P6	4919.982	3.4	9960.239	3.5
P7	4922.608	4.6	9942.451	4.5

*Tabla 7. Coordenadas de la red para ajuste libre, época 1  
Fuente: Elaboración propia*

Las coordenadas mostradas anteriormente permiten conocer la mejor composición de la red con las observaciones realizadas, aunado a esto, el programa Arge<sup>®</sup> permite conocer las elipses sobre cada punto, estas son utilizadas para poder representar la incertidumbre o precisión de los puntos ajustados:

<b>Punto</b>	<b>a</b>	<b>b</b>
P1	6.0	4.7
P2	6.0	4.8
P3	6.1	5.0
P4	6.3	4.8
P5	13.1	12.1
P6	9.5	9.2
P7	13.1	11.4

*Tabla 8. Valor de elipses para puntos ajustados en red libre, época 1  
Fuente: Elaboración propia*

Estos valores de elipses indican que existe bastante similitud entre las observaciones que se obtienen desde cada punto, lo que nuevamente muestra que la red libre posee una buena configuración y permite generar el ajuste amarrado.

Comprobada la buena configuración de la red a través del ajuste libre, es posible realizar el ajuste amarrado, considerando que los puntos fijos serán los cuatro puntos que se encuentran debajo de la estructura de estudio, indicándose de primera mano las siguientes observaciones ajustadas:

<b>Tipo de observación</b>	<b>Estación</b>	<b>Hacia</b>	<b>Medida</b>	<b>Ajustada</b>	<b>Diferencia</b>
Ángulo	P1	P4	56.46210	56.46592	-0.004
		P6			
Ángulo	P1	P4	65.56410	65.56474	-0.001
		P5			
Ángulo	P2	P1	43.44550	43.44479	0.001
		P5			
Ángulo	P2	P1	58.02750	58.02645	0.001
		P6			
Ángulo	P3	P2	49.70880	49.71866	-0.010
		P6			
Ángulo	P3	P2	68.41640	68.41736	-0.001

		P7			
Ángulo	P4	P3	26.03430	26.03369	0.001
		P7			
Ángulo	P4	P3	36.03520	36.02952	0.006
		P6			
Distancia	P1	P6	89.348	89.354	-0.006
Distancia	P1	P5	76.893	76.894	-0.001
Distancia	P2	P5	58.908	58.909	-0.001
Distancia	P2	P6	68.165	68.162	0.003
Distancia	P3	P6	61.541	61.551	-0.010
Distancia	P3	P7	56.513	56.515	-0.002
Distancia	P4	P7	68.377	68.379	-0.002
Distancia	P4	P6	81.988	81.994	-0.006

*Tabla 9. Observaciones ajustadas para ajuste amarrado, época 1  
Fuente: Elaboración propia*

Nuevamente, analizando las observaciones, las mismas muestran diferencias muy pequeñas entre lo observado y lo ajustado, lo que indica que, al fijar a los puntos debajo de la estructura de estudio, se sigue manteniendo un buen sistema de configuración de la red. Se obtienen así las siguientes coordenadas ajustadas de los puntos sobre la zona de estudio:

<b>Punto</b>	<b>Coordenada Este</b>	<b>Error Este (mm)</b>	<b>Coordenada Norte</b>	<b>Error Norte (mm)</b>
P5	4926.968	4.2	9975.941	4.4
P6	4919.982	3.2	9960.239	3.2
P7	4922.608	4.4	9942.451	4.0

*Tabla 10. Coordenadas de la red para ajuste amarrado, época 1  
Fuente: Elaboración propia*

Las coordenadas mostradas anteriormente, fueron las utilizadas como referencia contra las coordenadas que se obtuvieron en la segunda época de medición.

Por otro lado, para cada uno de los puntos ajustados, se puede obtener a través del programa Arge<sup>®</sup> las elipses de estos, como se muestra a continuación:

<b>Punto</b>	<b>a</b>	<b>b</b>
P5	13.2	11.6
P6	9.3	9.0
P7	12.6	11.2

*Tabla 11. Valor de elipses para puntos ajustados en red amarrada, época 1  
Fuente: Elaboración propia*

La precisión de los puntos ajustados, mostrada en el cuadro anterior, se considera alta, al no existir tanta diferencia entre el valor “a” y el valor “b”, esto quiere decir que las observaciones utilizadas para poder obtener el valor de coordenadas de los vértices P5, P6 y P7 son suficientes y coherentes.

#### 4.6. Procesamiento de datos para segunda época de medición

El procedimiento para los ajustes realizados en la segunda época de medición fue similar al de la primera etapa, sin embargo, existieron algunos cambios en los datos medidos, por lo que se procede a explicar los resultados y análisis de esta parte de la investigación.

Se inició nuevamente generando un ajuste libre, con las nuevas observaciones realizadas, como se muestra a continuación:

<b>Tipo de observación</b>	<b>Estación</b>	<b>Hacia</b>	<b>Medida</b>	<b>Ajustada</b>	<b>Diferencia</b>
Ángulo	P1	P2	97.66290	97.66267	0.0002
		P4			
Ángulo	P1	P4	56.46240	56.46247	-0.0001
		P6			
Ángulo	P1	P4	65.56490	65.56495	-0.0001
		P5			
Ángulo	P2	P1	101.88520	101.88508	0.0001
		P3			
Ángulo	P2	P1	43.43890	43.43887	0.0000

		P5			
Ángulo	P2	P1	58.02020	58.02014	0.0001
		P6			
Ángulo	P3	P2	100.37200	100.37201	0.0000
		P4			
Ángulo	P3	P2	49.71870	49.71878	-0.0001
		P6			
Ángulo	P3	P2	68.40980	68.40990	-0.0001
		P7			0.0000
Ángulo	P4	P3	100.07990	100.08023	-0.0003
		P1			0.0000
Ángulo	P4	P3	26.0409	26.0408	0.0001
		P7			0.0000
Ángulo	P4	P3	36.03750	36.03734	0.0002
		P6			0.0000
Distancia	P1	P4	100.334	100.335	-0.0010
Distancia	P1	P2	113.039	113.039	0.0000

Distancia	P2	P1	113.041	113.039	0.0020
Distancia	P2	P3	96.329	96.330	-0.0010
Distancia	P3	P2	96.330	96.330	0.0000
Distancia	P3	P4	112.278	112.278	0.0000
Distancia	P4	P3	112.279	112.279	0.0000
Distancia	P4	P1	100.335	100.335	0.0000
Distancia	P1	P6	89.348	89.347	0.0010
Distancia	P1	P5	76.890	76.890	0.0000
Distancia	P2	P5	58.904	58.905	-0.0010
Distancia	P2	P6	68.160	68.160	0.0000
Distancia	P3	P6	61.558	61.558	0.0000
Distancia	P3	P7	56.513	56.515	-0.0020
Distancia	P4	P7	68.377	68.379	-0.0020
Distancia	P4	P6	81.988	81.988	0.0000

*Tabla 12. Observaciones ajustadas para ajuste libre, época 2  
Fuente: Elaboración propia*

De las observaciones anteriores se denota que las diferencias entre lo medido y lo ajustado por el programa son más pequeñas que las observaciones de la época 1, esto quiere decir que se midió con una mayor precisión para la segunda fase.

A partir de las observaciones de ángulos y distancias mostradas en la tabla anterior, se determinaron las siguientes coordenadas para el ajuste libre de los siete vértices que componen la red:

<b>Punto</b>	<b>Coordenada Este</b>	<b>Error Este (mm)</b>	<b>Coordenada Norte</b>	<b>Error Norte (mm)</b>
P1	5000.001	0.3	9999.999	0.2
P2	4888.912	0.2	10020.904	0.3
P3	4868.302	0.3	9926.805	0.2
P4	4977.838	0.2	9902.142	0.3
P5	4926.970	0.4	9975.945	0.4
P6	4919.988	0.3	9960.241	0.2
P7	4922.607	0.4	9942.456	0.3

*Tabla 13. Coordenadas de la red para ajuste libre, época 2  
Fuente: Elaboración propia*

Los errores de las coordenadas anteriores no llegan al milímetro en ninguno de los puntos, lo que concuerda una vez más con la precisión de la medición realizada. Es correcto indicar que las coordenadas obtenidas con el ajuste libre sí representan de manera certera la configuración de la red planteada, y que los puntos, luego del tiempo esperado para poder

medir la segunda fase (1 mes), no fueron modificados en su estado o ubicación.

Además, se tienen nuevamente los insumos de elipses que confirman la incertidumbre o precisión de los siete vértices que conforman la red, como se muestra a continuación:

<b>Punto</b>	<b>a</b>	<b>b</b>
P1	0.8	0.6
P2	0.8	0.5
P3	0.8	0.6
P4	0.8	0.6
P5	1.1	0.8
P6	0.7	0.6
P7	1.1	0.8

*Tabla 14. Valor de elipses para puntos ajustados en red libre, época 2  
Fuente: Elaboración propia*

Estos valores “a” y “b” de elipses, confirman, al igual que en la época 1, que existe una buena configuración de la red, lo cual es lógico ya que se usaron los mismos puntos y las mismas observaciones. Además, se puede deducir que los errores tienen la misma magnitud en todas las direcciones (mediciones con precisión similar entre sí), lo cual es

indicativo de la calidad y fiabilidad del ajuste realizado. Nuevamente, al tener una comprobación de la configuración de la red con el ajuste libre realizado para la época dos, se procedió a realizar el ajuste amarrado, ingresando como puntos fijos los cuatro vértices alrededor de la iglesia de Coronado. Se muestra a continuación las observaciones obtenidas de este ajuste:

<b>Tipo de observación</b>	<b>Estación</b>	<b>Hacia</b>	<b>Medida</b>	<b>Ajustada</b>	<b>Diferencia</b>
Ángulo	P1	P4	56.46240	56.46542	-0.0030
		P6			
Ángulo	P1	P4	65.56490	56.56544	8.9995
		P5			
Ángulo	P2	P1	43.43890	43.43911	-0.0002
		P5			
Ángulo	P2	P1	58.02020	58.01887	0.0013
		P6			
Ángulo	P3	P2	49.71870	49.72033	-0.0016
		P6			
Ángulo	P3	P2	68.40980	68.40987	-0.0001

		P7			
Ángulo	P4	P3	26.04090	26.04063	0.0003
		P7			
Ángulo	P4	P3	36.03750	36.03534	0.0022
		P6			
Distancia	P1	P6	89.348	89.346	0.0020
Distancia	P1	P5	76.890	76.889	0.0010
Distancia	P2	P5	58.904	58.910	-0.0060
Distancia	P2	P6	68.160	68.163	-0.0030
Distancia	P3	P6	61.558	61.559	-0.0010
Distancia	P3	P7	56.513	56.519	-0.0060
Distancia	P4	P7	68.377	68.382	-0.0050
Distancia	P4	P6	81.988	81.991	-0.0030

*Tabla 15. Observaciones ajustadas para ajuste amarrado, época 2  
Fuente: Elaboración propia*

Las observaciones ajustadas muestran muy poca diferencia con las observaciones realizadas (décimas de milímetro en su mayoría), y es a través de estas que se obtienen las siguientes coordenadas ajustadas para las tres columnas que se analizarán más adelante:

<b>Punto</b>	<b>Coordenada</b>	<b>Error Este</b>	<b>Coordenada</b>	<b>Error Norte</b>
	<b>Este</b>	<b>(mm)</b>	<b>Norte</b>	<b>(mm)</b>
P5	4926.973	1.9	9975.943	1.6
P6	4919.989	1.3	9960.242	1.2
P7	4922.610	2.3	9942.459	1.2

*Tabla 16. Coordenadas de la red para ajuste amarrado, época 2  
Fuente: Elaboración propia*

Estas coordenadas mostradas en la tabla anterior fueron las coordenadas definitivas para la segunda época de medición de los vértices ubicados sobre la iglesia de Coronado, y son las coordenadas que se compararon con las de la época uno.

Además, se tienen los siguientes valores de elipse para cada uno de los puntos ajustados (punto 5, punto 6 y punto 7), como se muestra a continuación:

<b>Punto</b>	<b>a</b>	<b>b</b>
P5	6.0	4.0
P6	3.7	3.5
P7	6.6	3.5

*Tabla 17. Valor de elipses para puntos ajustados en red amarrada, época 2  
Fuente: Elaboración propia*

Se muestra en la tabla anterior que los errores asociados a las posiciones de los puntos estudiados en las diferentes direcciones son comparables entre sí.

#### 4.7. Revisión de deformaciones

Se parte en un inicio con los datos de posiciones medidas para cada época sobre los tres ejes axiales de las columnas de la iglesia de Coronado:

Eje medido	Época 1		Época 2	
	Este	Norte	Este	Norte
Punto 5	4926.968	9975.941	4926.973	9975.943
Punto 6	4919.982	9960.239	4919.989	9960.242
Punto 7	4922.608	9942.451	4922.610	9942.459

Tabla 18. Posicionamientos para época 1 y época 2 de la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos mostrados anteriormente, se pudo analizar de primera mano cuánto se ha desplazado la zona de estudio, para esto se hará uso de gráficos explicativos que muestren las distancias totales de cambio a manera de vector, y conocer así la deformación de cada zona. Se muestra a continuación la deformación en el punto 5:

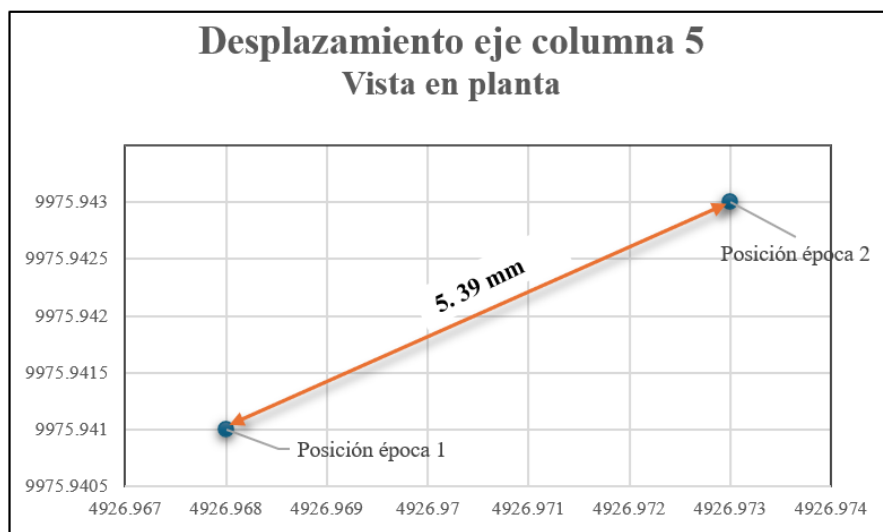


Figura 29. Vista en planta del desplazamiento para el punto 5 (columna izquierda)  
Fuente: Elaboración propia

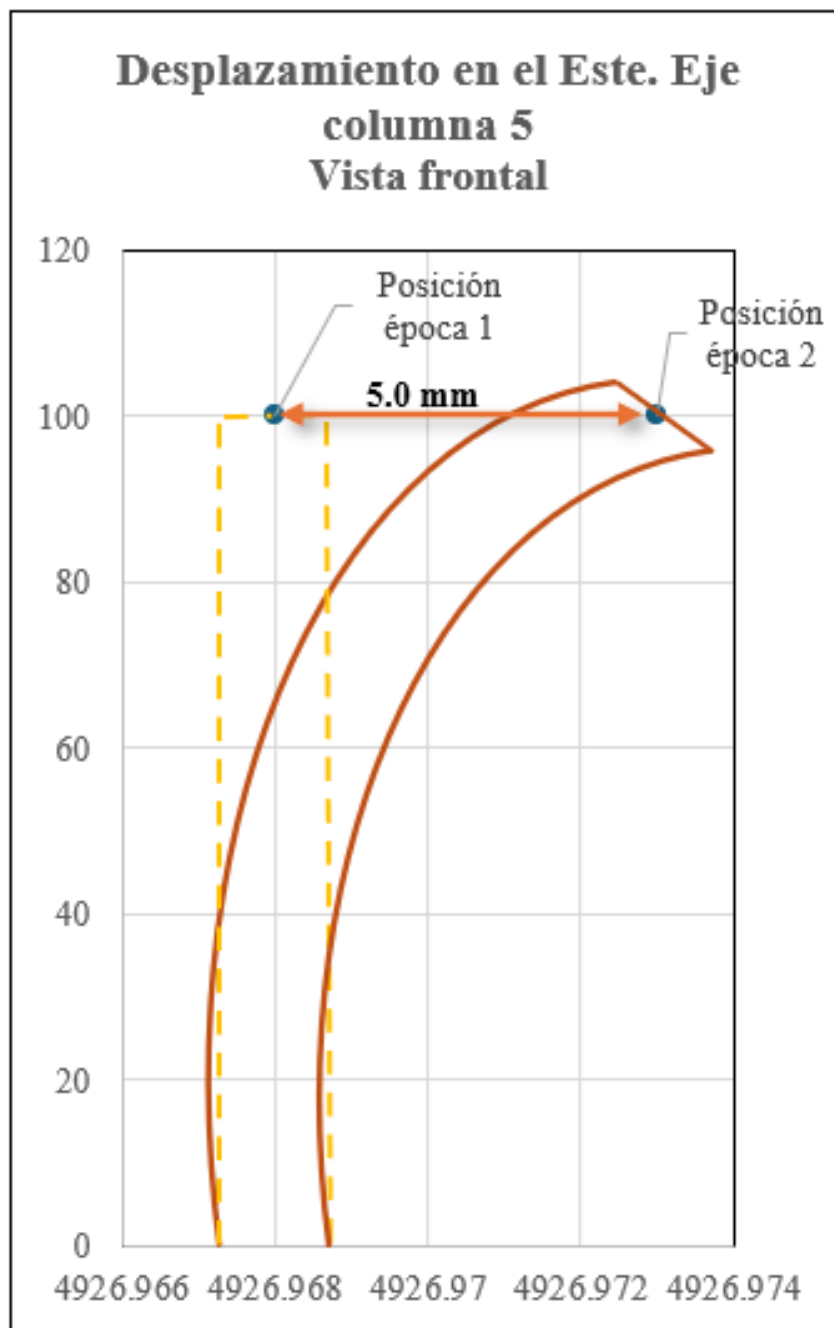


Figura 30. Pandeo vista frontal Este para punto 5 (columna izquierda)  
Fuente: Elaboración propia

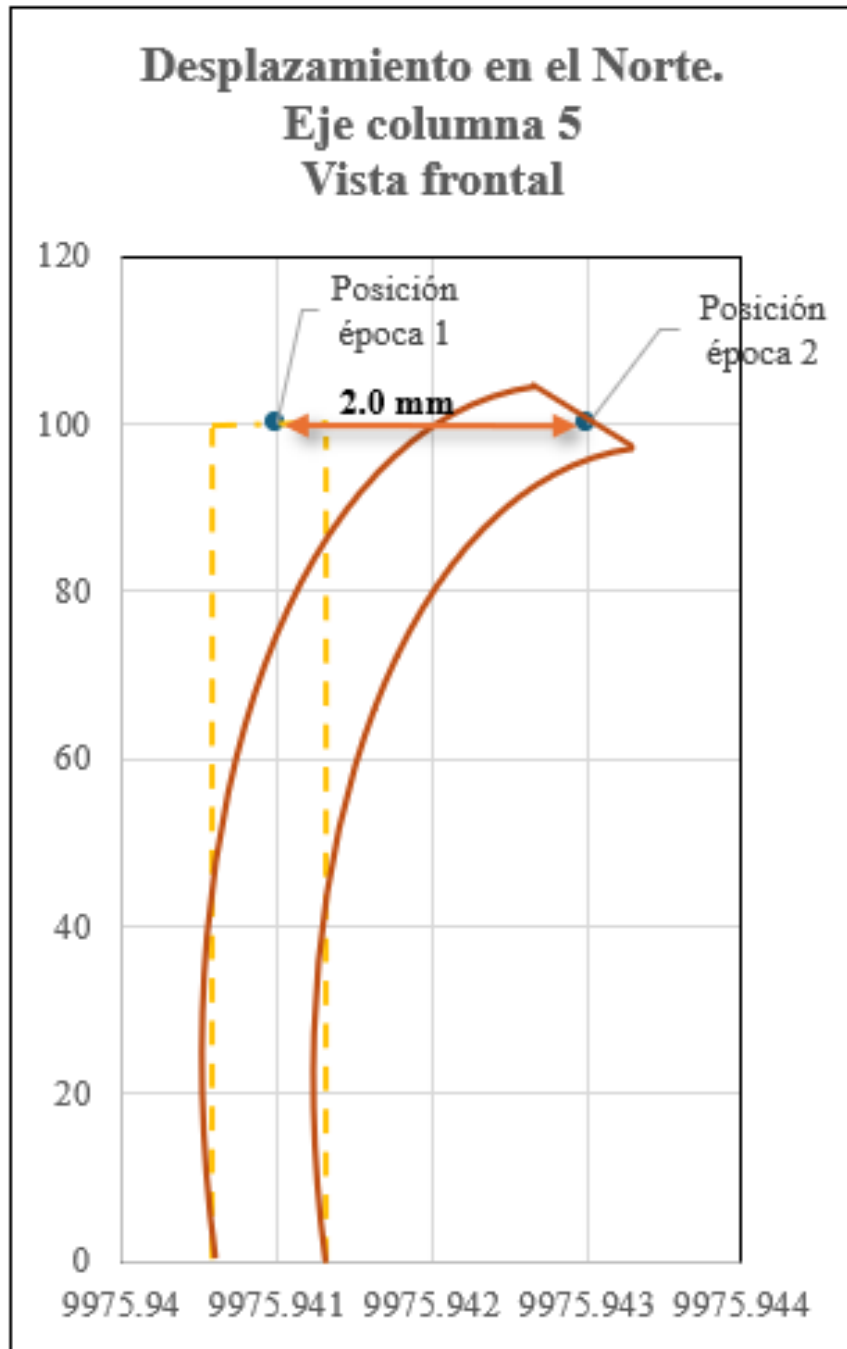


Figura 31. Pandeo vista frontal Norte para punto 5 (columna izquierda)  
Fuente: Elaboración propia

Con las imágenes anteriores, es posible, sin necesidad de conocer con exactitud las cargas a las que está sometido, cuál ha sido la magnitud de la deformación por pandeo que posee este elemento de columna en el lapso estudiado (1 mes), más adelante se comprobará si estos valores de deformación son significativos o no.

Se muestra a continuación la deformación gráfica del punto 6, a manera de vector y también vista la columna de manera frontal en ambas posiciones:

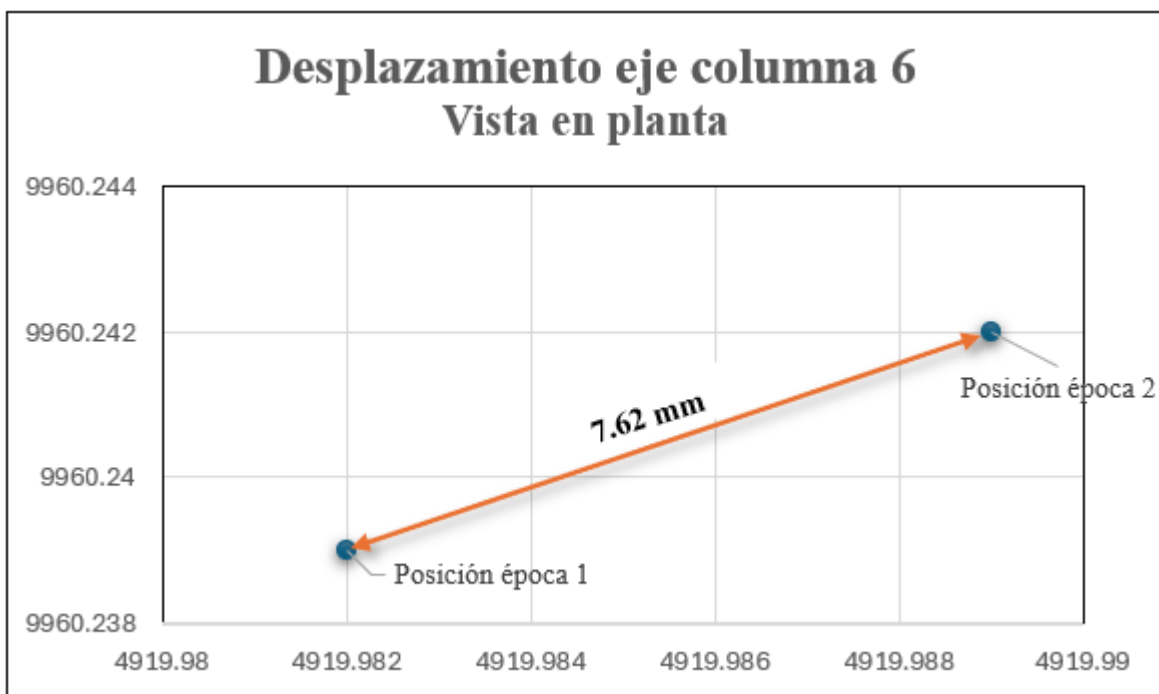


Figura 32. Vista en planta del desplazamiento para el punto 6 (columna central)  
Fuente: Elaboración propia

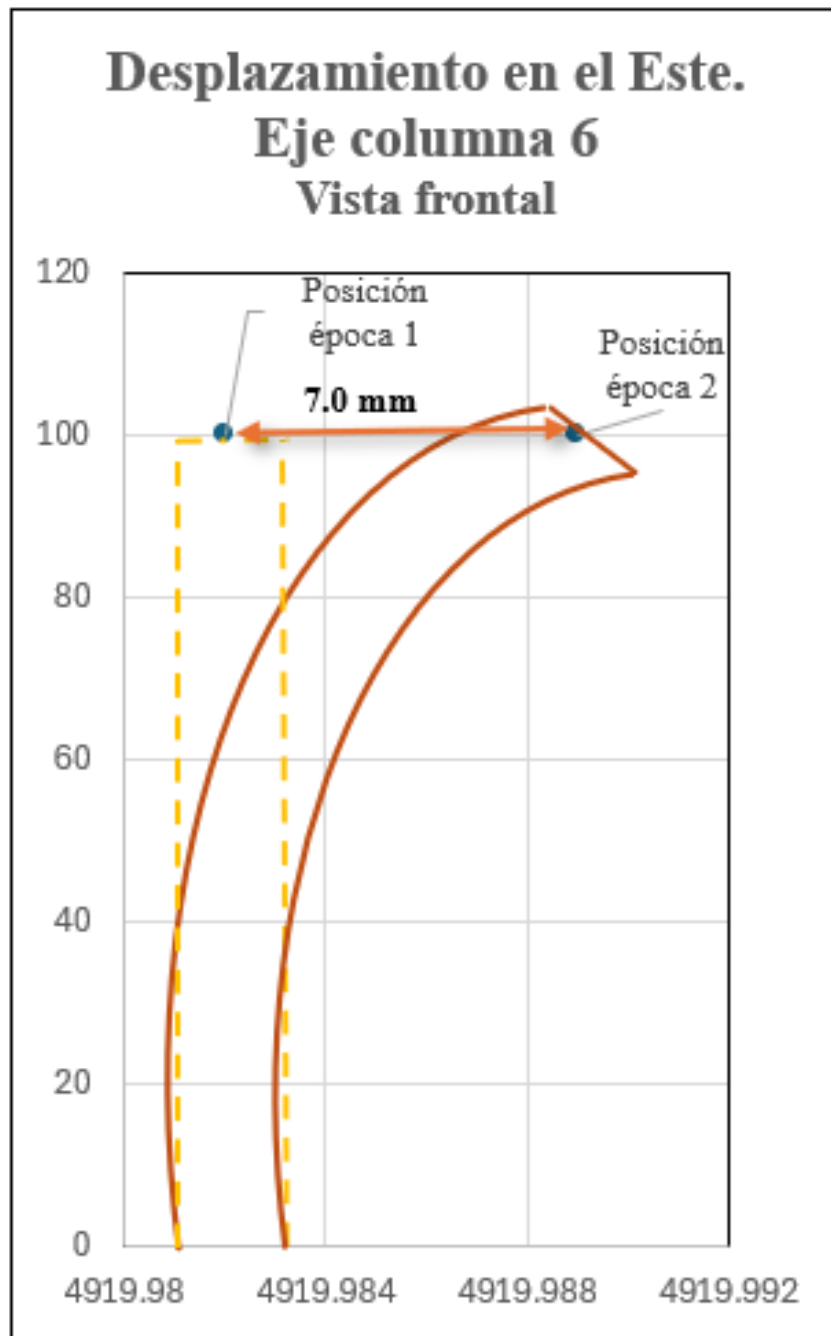


Figura 33. Pandeo vista frontal Este para punto 6 (columna izquierda)  
Fuente: Elaboración propia

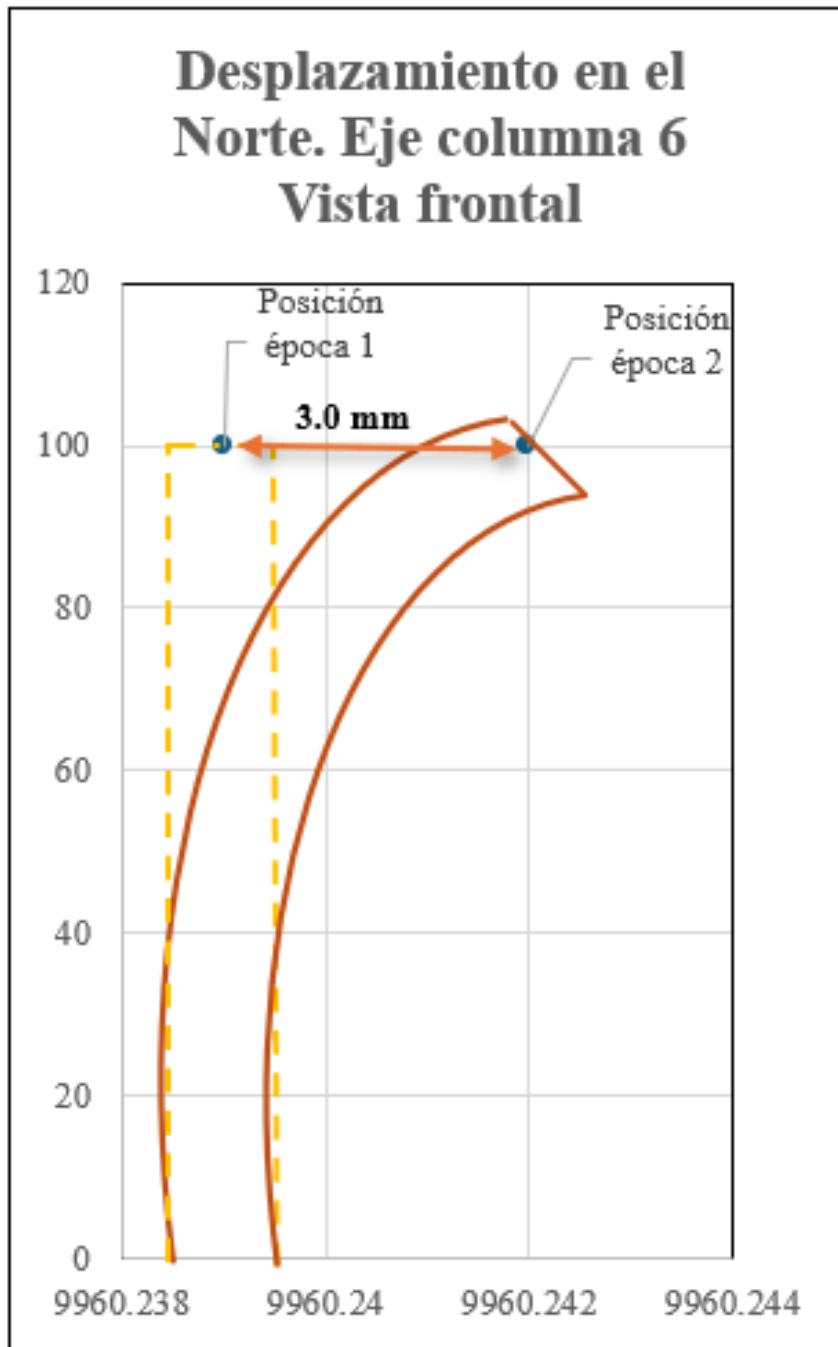


Figura 34. Pandeo vista frontal Norte para punto 6 (columna izquierda)  
Fuente: Elaboración propia

Las imágenes anteriores, que hacen referencia al pandeo de la columna analizada a través de la medición del punto 6, demuestran una deformación de 7.0mm hacia el Norte y 3.00mm hacia el Este, es decir, tiene una tendencia a deformación más marcada hacia el Norte.

A continuación, se describe gráficamente la deformación encontrada para la columna medida a través del punto 7:

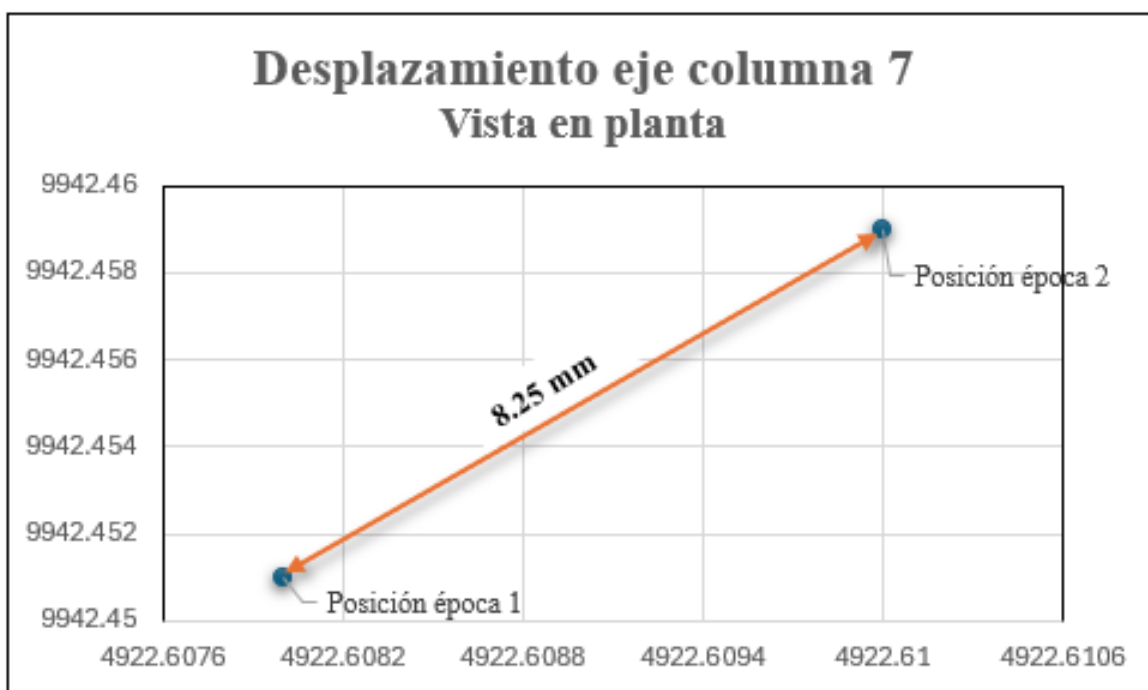


Figura 35. Vista en planta del desplazamiento para el punto 7 (columna derecha)  
Fuente: Elaboración propia

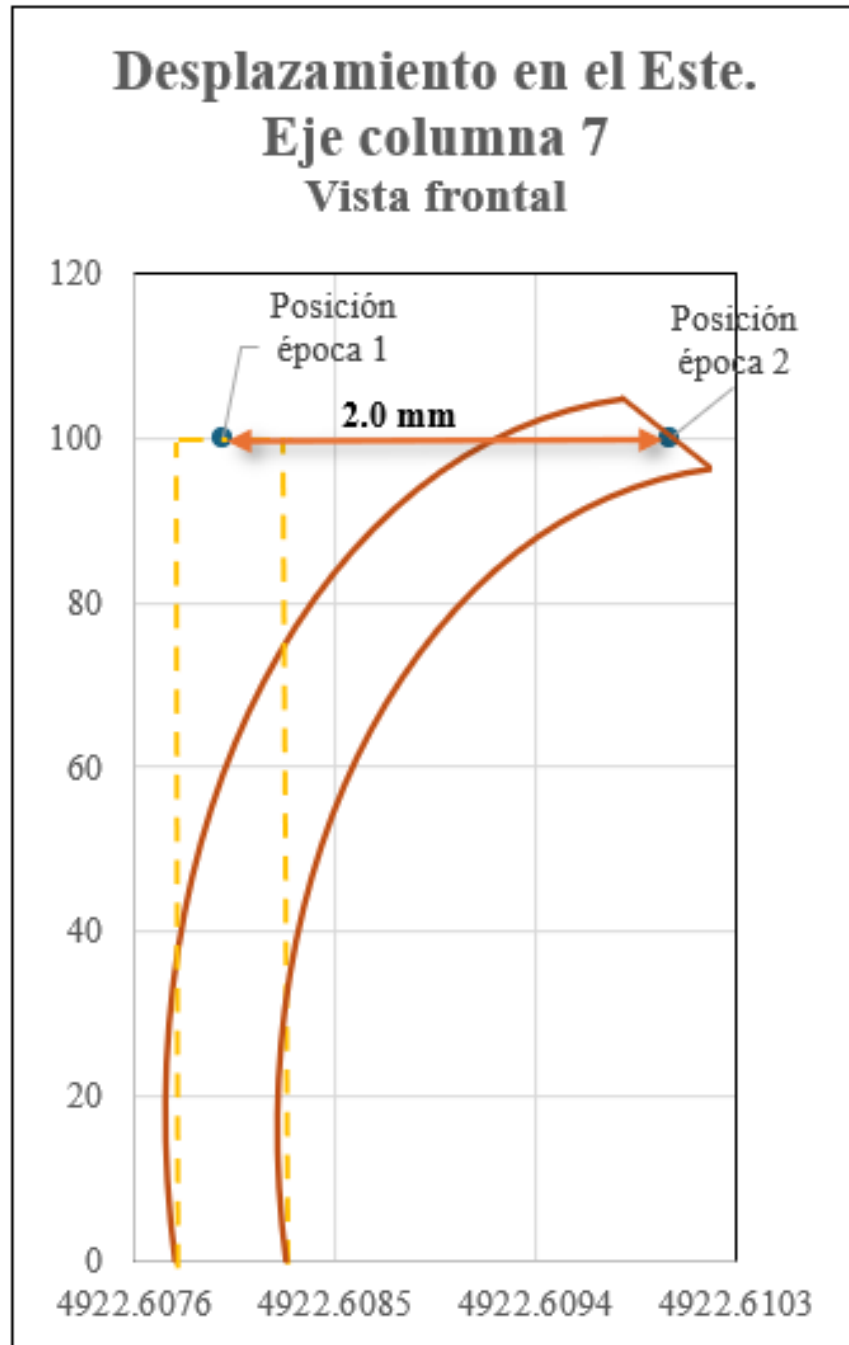


Figura 36. Pandeo vista frontal Este para punto 7 (columna izquierda)  
Fuente: Elaboración propia

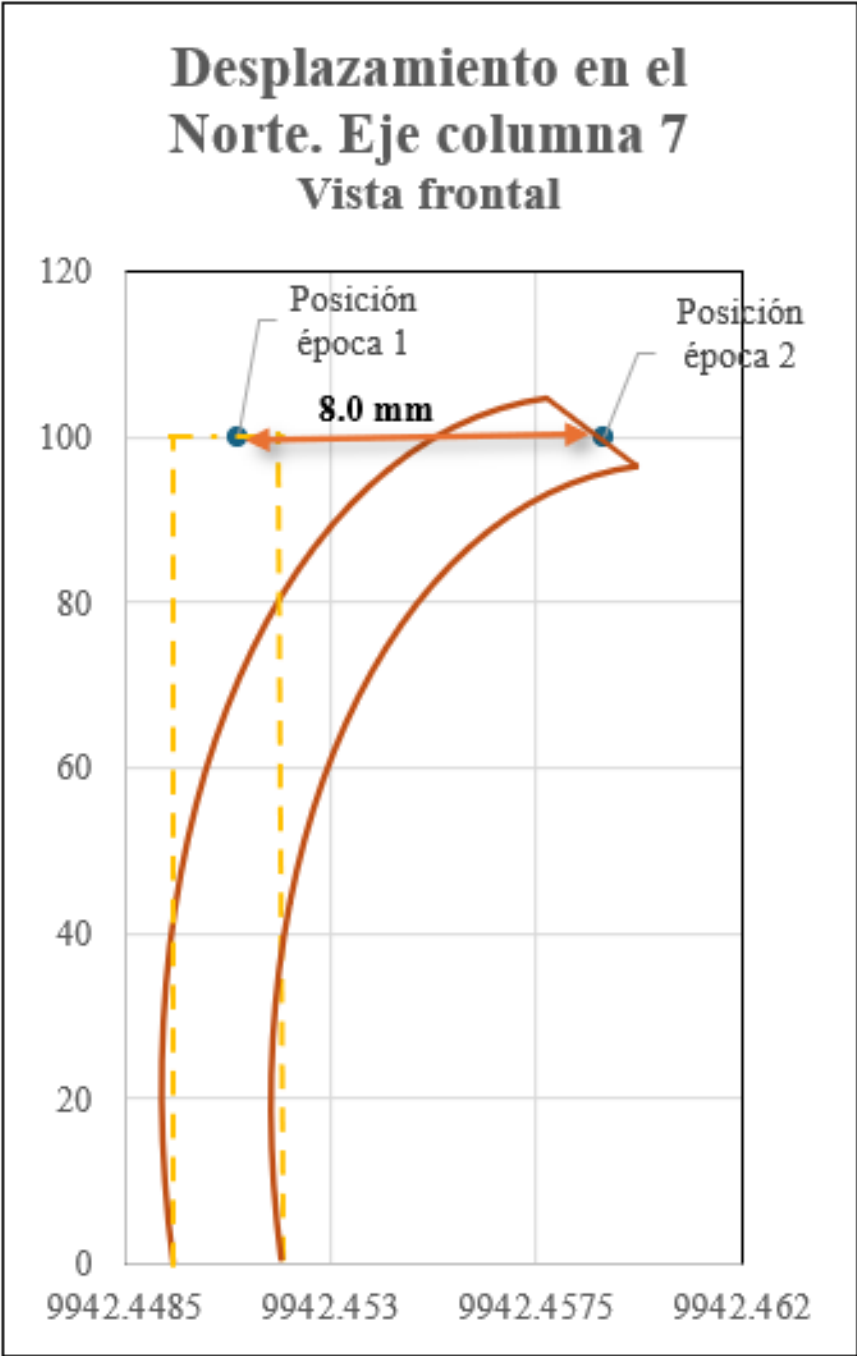


Figura 37. Pandeo vista frontal Norte para punto 7 (columna izquierda)  
Fuente: Elaboración propia

De la columna del punto 7, y según lo observado en las figuras anteriores, se desprende un mayor desplazamiento hacia el Norte (8.0 mm); esto podría significar que las cargas o fuerzas que actúan sobre a la columna están generando un momento o una compresión mayor en la dirección norte.

Una vez obtenidas las diferencias de desplazamiento mencionadas, así como el grado de pandeo para cada columna, se puede generar un análisis estadístico que determine si estas deformaciones encontradas en el período medido son o no significativas, es decir, si se salen del rango de tolerancia normal a través de la prueba T Student.

Siendo así, como se mencionó anteriormente, para poder generar este procedimiento se debe partir de algunas hipótesis, que para esta investigación son determinadas de la siguiente manera:

- Hipótesis nula: No existe diferencia significativa para lo medido entre época 1 y época 2.
- Hipótesis alternativa: Si existe una diferencia significativa para lo medido entre época 1 y época 2.

Una vez establecidas las mencionadas hipótesis, se puede proceder con la fórmula básica para establecer el estadístico T, que indica:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{SE}$$

Para poder calcular dicha fórmula, se requiere conocer el error estándar de las diferencias entre las medias “SE”, para esto, se presenta en primer lugar, los valores de desviación estándar para cada punto medido, los cuáles se obtienen del proceso de ajuste de datos:

Eje Medido	Desviación estándar			
	Esta época 1	Esta época 2	Norte época 1	Norte época 2
5	1.9	4.2	1.6	4.4
6	1.3	3.2	1.2	3.2
7	2.3	4.4	1.2	4.0

*Tabla 19. Error estándar para cada punto por época de medición  
Fuente: Elaboración propia*

Obtenidos los datos anteriores, es posible determinar la desviación estándar total para cada punto en cada posición, mediante la siguiente fórmula:

$$Sd_E = \sqrt{SE_1^2 + SE_2^2} \quad ; \quad Sd_N = \sqrt{SN_1^2 + SN_2^2}$$

Donde:

$Sd_E$  = Error o desviación estándar al Este

$SE_1^2$  = Desviación estándar al Este en época 1

$SE_2^2$  = Desviación estándar al Este en época 2

$Sd_N$  = Error o desviación estándar al Norte

$SN_1^2$  = Desviación estándar al Norte en época 1

$SN_2^2$  = Desviación estándar al Norte en época 2

Conocida esta fórmula, se procedió a calcular el error estándar para cada posición en cada punto medido, obteniendo el siguiente resultado:

<b>Eje Medido</b>	<b>Desviación estándar</b>	
	<b>Este</b>	<b>Norte</b>
5	4.610	4.682
6	3.454	3.418
7	4.965	4.176

*Tabla 20. Error estándar total para cada punto  
Fuente: Elaboración propia*

Conocido el error estándar por cada punto, así como las diferencias entre cada época, es posible calcular el valor “t” con la fórmula mostrada anteriormente, presentándose así los siguientes valores:

Eje Medido	Valor estadístico "T"	
	Este	Norte
5	1.08465	0.42718
6	2.02664	0.87780
7	0.40282	1.91565

*Tabla 21. Valor calculado T  
Fuente: Elaboración propia*

Los valores mostrados anteriormente, se deben de comparar con el valor "tf", el cuál es la representación del valor crítico, en dónde si  $t < t_f$  indica que el desplazamiento que tienen las columnas no ha sido significativo.

Para el cálculo de  $t_f$  se hace uso de la herramienta Excel mediante la función denominada "INV.T.2C" la cual devuelve el inverso de la distribución t de Student de dos colas; para esto debemos conocer la probabilidad asociada a la distribución, así como los grados de libertad, ambos datos encontrados en el ajuste de los datos. Debido a que todas las mediciones se ajustaron al 95% de probabilidad y todas poseen 20 grados de libertad (poseen la misma cantidad de observaciones), para todos los puntos, el valor "tf" es igual a 2.42311.

Siendo así, se puede observar que el valor estadístico T es menor para todos los puntos respecto al valor calculado  $t_f$ , por lo que, no existen diferencias significativas en las columnas medidas, para la época de medición establecida, esto quiere decir que el movimiento encontrado, se puede considerar dentro de la normalidad y los parámetros de movimiento que poseen las estructuras no afectarían la integridad de la iglesia de Coronado. Se puede afirmar así que, para el período de estudio de esta estructura, se aprueba la hipótesis nula.

#### **4.8. Caso hipotético**

Ya que para el período de un mes, no existieron deformaciones significativas sobre las tres columnas medidas, se decide generar un caso de hipótesis en dónde pueda existir una deformación considerablemente significativa, para esto, se proyectó realizar el ejercicio sobre el punto 6 (columna central), asumiendo que las diferencias en ambas coordenadas de posicionamiento son constantes a lo largo del tiempo, lo que significa que las diferencias que se han encontrado se incrementan cada mes en esa cantidad.

Al extrapolar los datos, con la hipótesis descrita anteriormente, se puede decir que, en un plazo de 7 meses, la diferencia para el valor Este de la columna central será igual a 49mm o 4.9cm y el valor Norte será de 21mm o 2.1cm.

Por lo que, manteniendo los mismos valores de desviaciones estándar, se pueden obtener los siguientes valores del estadístico “T”:

<b>Eje considerado</b>	<b>Valor estadístico “T” hipotético</b>	
	<b>Este</b>	<b>Norte</b>
6	6.0799	14.3375

*Tabla 22. Valor estadístico T hipotético  
Fuente: Elaboración propia*

Manteniendo el mismo valor  $t_f$  de 2.42311 (se mantienen la probabilidad y los grados de libertad), es posible concluir que en 7 meses si existirá una deformación significativa sobre el punto 6 (columna central), rechazándose la hipótesis nula al tener valores estadísticos T mayores a  $t_f$  en ambas posiciones.

Con esta suposición se conoce que el valor encontrado se desvía considerablemente del valor esperado o aceptado según las normas de diseño, esto significa que, para este caso, la columna podría estar experimentando pandeo crítico, el cuál es una falla estructural común en columnas, especialmente bajo compresión, y su severidad depende de factores como la esbeltez de la columna, la carga crítica e incluso las propiedades de los materiales.

Existen varias consideraciones o estrategias que se pueden aplicar para mejorar o mitigar el pandeo de esa columna, se explican a continuación algunas propuestas para este caso hipotético en específico:

- Se considera de primera mano, que, si la deformación detectada es significativa, es fundamental hacer una revisión periódica y mantenimiento para asegurarse de que no empeore su estado con el tiempo.
- De igual manera, si se tienen los planos o diseños del objeto de estudio, es posible también, revisar el diseño estructural, asegurándose que las cargas aplicadas a la columna no excedan su capacidad de carga crítica. El generar un análisis más detallado, como un análisis no lineal de la estructura o evaluar la magnitud del pandeo y probar diferentes soluciones antes de implementarlas mediante software especializado como SAP2000 o Etaps permitirá dar un panorama más amplio de la deformación ocurrida y su solución.
- Si fuera posible el cambio o mejoramiento del diseño, se propone aumentar la sección transversal de la columna; ya que el pandeo es proporcional a la inercia de la sección transversal de la columna, al aumentar el área de la sección transversal (pasar una columna más ancha o con más material), incrementaría la rigidez de la columna y su capacidad para soportar cargas sin pandeo.
- De igual manera, se podría reducir la longitud libre de pandeo ya que este está directamente relacionado con la longitud libre efectiva de la columna, el reducir esta longitud puede mejorar la resistencia al pandeo. Al añadir arriostramientos o refuerzos en puntos intermedios, que restrinjan el desplazamiento lateral y mantengan la columna en posición puede colaborar con la reducción de la longitud de pandeo.

- Si no fuera posible el cambio en el diseño o las dimensiones de la columna, se pueden añadir refuerzos externos, como camisas de acero que consisten en cilindros o revestimientos de acero colocados alrededor de elementos estructurales para aumentar su resistencia contribuyendo al reforzamiento de la columna, o bien, fibras de carbono, las cuáles se ha comprobado funcionan para reforzar estructuras al tener una alta resistencia y extremadamente rígida. Se muestra a continuación una idea básica de cómo se ven estos refuerzos:



*Figura 38. Reforzamiento de columnas con camisas de acero y fibras de carbono  
Fuente: Elaboración propia*

## Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

En el presente capítulo se presentan las conclusiones derivadas de los datos y estudios aplicado. Con base en ellas se formulan las recomendaciones pertinentes. Los resultados se analizarán como producto al estudio efectuado en el capítulo anterior.

1. Se considera de gran importancia la visita a sitio de la zona y del elemento que se desea estudiar, esto por cuánto la misma permitirá definir con criterio técnico cuáles serán los puntos por observar, dependiendo esto de la necesidad de la estructura, ya que todos los elementos estructurales como vigas, columnas y losas pueden ser estudiados en la amplitud del estudio.
2. Para el caso de esta investigación, y debido a que se deseaba conocer la deformación en la parte externa de la iglesia de Coronado, se decidió elegir tres columnas representativas, las mismas ubicadas estratégicamente a los costados y al centro de la estructura en cuestión. Tomando como base de igual manera, cuatro puntos externos a la estructura sobre los cuáles se fijaría la posición de las columnas. La elección de la ubicación para los puntos externos a la zona de estudio debe ser estratégica y bien analizada ya que serán los que permiten generar el control de los datos, al ser fijados en la red de medición; además estos deben prevalecer en el tiempo puesto que sobre ellos existirán mediciones constantes, y en períodos que pueden ser de meses o hasta años.

3. La simulación realizada previo a la colocación de los puntos que componen la red de estudio, permitió conocer con antelación, que la conformación ideada luego de realizada la visita de sitio, si cumplía con todos los requisitos ingenieriles para poder analizar posteriormente los datos que se decidieran medir.
  
4. El procesamiento realizado sobre los datos para ambas épocas de medición demostró que la medición efectuada fue generada con precisión, a través del conocimiento de la similitud en las elipses de confianza, mostradas en el análisis de resultados, se demuestra que para ambos momentos de medición existió calidad y fiabilidad en el proceso. Además, es gracias a dicho procesamiento, que los posibles errores se distribuyen de manera estadísticamente normal, por lo que, la diferencia de posición encontrada se debe solamente a la deformación que posee cada estructura producto del sometimiento de las cargas a las cuáles se encuentran las columnas en el momento estudiado.
  
5. Al realizar la diferencia entre la ubicación de la columna en la época 2 y la época 1, fue posible conocer cuánto se ha pandeado cada una en el período de un mes tanto hacia el lado Este como hacia el Norte, lo que permite obtener un panorama certero del tipo de deformación y su respectiva magnitud, esto sin necesidad de conocer cuál es el valor de las cargas a las que puedan estar sometidas.

6. A través del análisis estadístico T Student, se conoce que las deformaciones encontradas no representan un movimiento significativo para ninguna de las tres columnas estudiadas, esto dentro del período de estudio, lo que permite deducir que si bien hubo inclinación milimétrica con tendencia al pandeo en los elementos, el mismo se considera dentro de la normalidad de la estructura, y no causará un desbordamiento o daño estructural que comprometa la estabilidad o seguridad de la iglesia de Coronado.
  
7. Para el caso hipotético en que exista deformación significativa en la estructura de estudio, se encuentra que, manteniendo los mismos parámetros de movimiento y aumentando de manera lineal los valores encontrados, en un período de 7 meses existiría un posible problema estructural, el mismo podría deberse a muchos factores tales como pero no limitados a asentamientos del suelo, falla de materiales o sobrecarga excesiva. Este caso permite conocer que existen muchas maneras de manejar los datos obtenidos de esta metodología de observación, y que, en caso de obtener deformaciones significativas, las mismas pueden ser corregidas a tiempo al hacer una correlación entre el monitoreo en tiempo real y el reforzamiento estructural.

## 5.2. Recomendaciones

1. Dada la investigación y análisis, la suscrita investigadora estima que para obtener resultados con una mayor variabilidad respecto al movimiento que pueda presentar la estructura, se debe analizar con un período mayor, ya que entre mayor sea la diferencia entre las épocas de medición, mayor podrá ser el análisis del comportamiento que tiene el o los elementos de estudio.
2. Se recomienda, además, basado en la experiencia del presente trabajo de graduación, la implementación de otros equipos de monitoreo tales como GPS, dron, o incluso escáneres, a fin de conocer si existen alternativas de mejor precisión a la establecida con estación total, o incluso ventajas de tiempo y/o economía.
3. Como recomendación final, se sugiere a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Central, dar continuidad a este trabajo de graduación ya sea por modalidad de prácticas campo-investigativas o bien por medio de trabajos de graduación, puesto que las técnicas de monitoreo en tiempo real se posicionan como una muy buena opción para poder estimar datos que pueden no ser obtenidos de manera fácil; además, para este proyecto se estableció conocer las diferencias al medir en dos épocas distintas, pero también se pueden realizar ejercicios prácticos sobre estructuras con y sin carga, por ejemplo los puentes, los cuáles se podría conocer su deformación al momento del tránsito vehicular versus sin paso vehicular.

## **Bibliografía**

Abdullahi, I. M., & Yelwa, N. A. (2016). Structural Deformation Monitoring Surveys of New Administrative Building of Federal School of Surveying, Oyo–Nigeria. *International Journal of Science and Technology*, 6(1), 1-14.

Abellán García, M. (2013). Metodología de cálculo de redes topográficas.

Armesto, J., Arias, P., Roca, J., & Lorenzo, H. (2008). Monitoring and Assessing Structural Damage in Historic Buildings. *The Photogrammetric Record/Photogrammetric Record*, 23(121), 36-50. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2008.00466.x>

Autodesk. (2023). AutoCAD Features. Autodesk. Recuperado de <https://www.autodesk.com/products/autocad>

Bryman, A. (2016). *Social research methods* (5th ed.). Oxford University Press.

Castillo, I. (2017). El patrimonio religioso en Costa Rica: La Iglesia de San Isidro Labrador de Vásquez de Coronado. *Revista de Patrimonio Arquitectónico*, 8(2), 32-45.

Cohen, L., Manion, L., & Morrison, K. (2018). *Research methods in education* (8th ed.). Routledge.

Chen, Y. (1983). Analysis of deformation surveys - a generalized method.  
<http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA23474052>

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (5th ed.). SAGE Publications.

Devore, J. L. (2009). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Cengage Learning Editores.  
<http://brc.crub.uncoma.edu.ar/archivos/alumnos/2014/2014%20ING/2014%20ING%20PROBABILIDAD%20Y%20ESTADISTICA.PDF>

Doebbling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review. Los Alamos National Lab.

Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia. (2021). Desarrollo de un aplicativo informático para el ajuste de redes geodésicas. Universidad Nacional de Costa Rica. Recuperado de [http://www.etcg.una.ac.cr\(Campus Virtual\)](http://www.etcg.una.ac.cr(Campus Virtual)).

Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective. Wiley.

Field, A. (2018). Discovering statistics using IBM SPSS Statistics (5th ed.). SAGE Publications.

García, J. M., & Caro, L. M. (2009). Las pruebas estadísticas y la evaluación de escalas; el caso de la validez discriminante. *Investigaciones Europeas de Dirección y economía de la empresa*, 15(2), 15-24.

González, P. J. (2011, 19 septiembre). Medida y caracterización de deformaciones usando técnicas geodésicas y de teledetección. Aplicación en volcanología y sismotectónica. DIGITAL.CSIC. <https://digital.csic.es/handle/10261/39652>

Haro Ruiz, S. N., González, M. S. L., & Alberto, C. Control de deformaciones en el Puente 8 de la Avenida General Rumiñahui mediante observaciones topográficas convencionales y GNSS, para controlar y monitorear el estado de la estructura.

Harvey, B.R. 1994. *Practical Least Squares and Statistics for Surveyors*. Monograph 13. School of Geomatic Engineering. The University of New South Wales. Segunda edición.

Hernández, M. (2020). Las variables o categorías en una investigación. *Artículo científico*.

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2020). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.

Hernández Sampieri, R. y Mendoza, C. (2008). El matrimonio cuantitativo cualitativo: el paradigma mixto. En J. L. Álvarez Gayou (Presidente), 6º Congreso de Investigación

en Sexología. Congreso efectuado por el Instituto Mexicano de Sexología, A. C. y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco, México

Hernández, R. Fernández C. y Baptista P. (2010). Metodología de la Investigación. México DF: Mc Graw Hill.

Hurtado, J. (2000). Metodología de la Investigación Holística. Venezuela: SYPAL-IUTC.

Johnson, B. y Onwuegbuzie, A. (2004). Mixed Methods Research: A Research Paradigm whose time has come. Educational Researcher. Pag.14-26. Recuperado de <http://edr.sagepub.com/cgi/content/abstract/33/4>.

Lynch, J. P., & Loh, K. J. (2006). A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. Shock and Vibration Digest, 38(2), 91-128. <https://doi.org/10.1177/0583102406061499>

Manual, E. (2018). Structural deformation surveying. US Army Corps of Engineers.

María, Z. G. (2017b). Análisis del impacto en las deformaciones axiales de edificios altos de concreto reforzado al considerar el proceso constructivo y envejecimiento. <https://repo.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/6216>

Microsoft. (2023). Función T.TEST. Recuperado de <https://support.microsoft.com>

- O'Connor, J. J., & Robertson, E. F. (2003). The MacTutor History of Mathematics archive.
- Pachas, R. (2009). El levantamiento topográfico: Uso del GPS y estación total. *Academia*, 8(16), 29-45.
- Peña Franco, C. C. Aplicación de redes topográficas de control sobre infraestructura colombiana para proyectos de ingeniería en carreteras.
- Pérez Vidiella, P. (2009). Optimización del proyecto de auscultación, dirigido al estudio de las deformaciones de un elemento patrimonial, mediante técnicas topográficas clásicas.  
[https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/7001/ldgp\\_pfc003\\_PabloPV.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/7001/ldgp_pfc003_PabloPV.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Rodríguez Jordana, J. (2002). Ajuste de observaciones: el método de los mínimos cuadrados con aplicaciones a la topografía.
- Sánchez Turcios, R. A. (2015). t-Student: Usos y abusos. *Revista mexicana de cardiología*, 26(1), 59-61.
- Serpas, J. G., Ramírez, M., & Colomer, R. (2004). Estudio del movimiento de estructuras dinámicas mediante el uso de GPS. *Uniciencia*, 21(1), 93-103.  
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5381263.pdf>

- Shadish, W. R., Cook, T. D., & Campbell, D. T. (2002). Experimental and quasi-experimental designs for generalized causal inference. Houghton Mifflin.
- Sevilla, M. J. (2010, 22 abril). Ajuste de redes libres. Modelos matemáticos singulares. DIGITAL.CSIC. <https://digital.csic.es/handle/10261/23397>
- Solis, J. E. B., Torres, L. M. C., & Paredes, B. G. P. (2022). Análisis comparativo topográfico sobre levantamientos altimétricos con RTK GNSS, Estación Total y Drone en Manta. *Baque Solis | Polo del Conocimiento*. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i12.5015>
- Tashakkori, A. y Teddlie, C. (2003). Handbook of mixed methods insocial & Behavioral research. California, USA: Sage Publications.
- Uren, J., & Price, W. (2010). Surveying for Engineers (5th ed.). Palgrave Macmillan.
- Vargas, W. E. V., Villalba, M. A. R., & Vergara, C. J. G. (2023). Topografía. Ecoe Ediciones.
- Velasco Gomez, J. (2010). Propuesta de metodología de diseño, observación y cálculo de redes topográficas para la construcción de túneles de gran longitud para ferrocarriles de alta velocidad (Doctoral dissertation, Agronomos).

Vieira, R., De Lerma, M. J. S., Camacho, A., De Toro y Llaca, C., & Martín, M. D. (1986b). Geodesia de precisión aplicada al control de movimientos y deformaciones en la Caldera del Teide. [https://digital.csic.es/bitstream/10261/27381/1/N145\\_1986.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/27381/1/N145_1986.pdf)

Wolf, P., & Ghilani, C. (2015). Topografía. Alpha Editorial.

Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (2014). Elementary Surveying: An Introduction to Geomatics (14th ed.). Pearson.

ZALESKY, J., PROCHAZKA, J., JIRIKOVSKY, T., & SALAK, J. (2008). STABILITY OF HISTORICAL BUILDINGS. In Proceedings 13th International Symposium on Deformation Measurement and Analysis. LNEC, Lisbon, Portugal (Vol. 10).

Zepeda, R. (2016). AJUSTE GEODÉSICO.

# Apéndices

## Apéndice A. Reporte programa ARGE para red ajustada época 1

RICA  
2024

CONSULTORA CUATRO  
\*\*\* MIRI1 \*\*\*

ETCG  
UNA  
ARGE  
RESUMEN

COSTA  
02-09-

PUNTOS	
Fijos :	4
Datum :	0
Nuevos :	3
Total :	7
Errcen :	0.0

CONFIGURACION	
Total de observaciones :	16
Defecto de datum :	0
Incógnitas de orientación :	0
Incógnitas de escala :	0
Incógnitas de coordenadas :	6
Grados de libertad :	10

OBSERVACIONES	
Total	: 16
Acimutes	: 0
Angulos	: 8
Direcciones	: 0
Distancias	: 8
Coordenadas	: 0

so = 1.038  
 linf = 0.726 <  $\bar{\sigma}_o$  = 1.000 < lsup = 1.821

Según los resultados y al 95% de probabilidad el AJUSTE se ACEPTA

ETCG  
 UNA  
 CONSULTORA CUATRO ARGE COSTA  
 RICA \*\*\* MIRI1 \*\*\* RESUMEN 02-09-  
 2024

GRUPOS DE ANGULOS

Gr	Nombre	$\bar{\sigma}_0$	s0	vtPv	Redun.
01	GP1	55.00	0.99	4.87	4.95

GRUPOS DE DISTANCIAS

Gr	Nombre	$\bar{\sigma}_{0c}$	$\bar{\sigma}_{0d}$	s0	vtPv	Redun.	m	sm
01	GP1PR	3.00	3.00	*****	0.00	0.00		
02	GP2LA	6.00	3.00	1.08	5.91	5.05		

RICA  
2024

CONSULTORA CUATRO  
\*\*\* MIRI1 \*\*\*

ARGE  
PUNTOS

COSTA  
02-09-

PUNTO	T	Aprox. E/N	DELTA	Ajust. E/N	SIGMA
P5	N	4926.968	-0.0	4926.968	4.2
		9975.941	-0.1	9975.941	4.4
P6	N	4919.982	-0.1	4919.982	3.2
		9960.239	0.5	9960.239	3.2
P7	N	4922.608	0.0	4922.608	4.4
		9942.451	0.1	9942.451	4.0

Tip	Gr	Estacion	Hacia	Med./Ajus.	l/p	v/s	vn/tt	r/n
ANG	01	P1	P4	56.46210	-34.8	38.2	0.7	0.8
			P6	56.46592	0.0	22.7	0.2	5.9
ANG	01	P1	P4	65.56410	-7.1	6.4	0.1	0.6
			P5	65.56474	0.0	37.8	0.0	2.1
ANG	01	P2	P1	43.44550	8.1	-7.1	0.2	0.4
			P5	43.44479	0.0	43.8	0.0	1.6
ANG	01	P2	P1	58.02750	9.2	-10.5	0.2	0.7
			P6	58.02645	0.0	29.9	0.1	3.4
ANG	01	P3	P2	49.70880	-103.3	98.6	2.7	0.7
			P6	49.71866	0.0	32.8	0.7	2.8
ANG	01	P3	P2	68.41640	-11.0	9.6	0.3	0.4
			P7	68.41736	0.0	44.2	0.1	1.5
ANG	01	P4	P3	26.03430	7.2	-6.1	0.1	0.5
			P7	26.03369	0.0	39.1	0.0	2.0
ANG	01	P4	P3	36.03520	58.9	-56.8	1.1	0.8
			P6	36.02952	0.0	25.1	0.3	4.8
DIS	02	P1	P6	89.348	-6.2	6.1	1.2	0.7
				89.354	0.0	3.2	0.3	3.5
DIS	02	P1	P5	76.893	-1.2	1.2	0.3	0.6
				76.894	0.0	4.1	0.1	2.2
DIS	02	P2	P5	58.908	-1.0	1.0	0.2	0.5
				58.909	0.0	4.6	0.1	1.7
DIS	02	P2	P6	68.165	2.8	-3.2	0.6	0.7
				68.162	0.0	3.2	0.1	3.6
DIS	02	P3	P6	61.541	-10.5	10.7	2.4	0.7
				61.551	0.0	3.2	0.6	3.5
DIS	02	P3	P7	56.513	-1.8	1.9	0.4	0.5
				56.515	0.0	4.4	0.1	1.9
DIS	02	P4	P7	68.377	-2.1	2.2	0.4	0.6
				68.379	0.0	4.1	0.1	2.1
DIS	02	P4	P6	81.988	-5.9	6.4	1.2	0.7
				81.994	0.0	3.2	0.3	3.6

## Apéndice B. Reporte programa ARGE para red ajustada época 2

ETCG  
UNA

CONSULTORA CUATRO  
\*\*\* MIRI1 \*\*\*

ARGE  
RESUMEN

COSTA RICA  
02-09-2024

PUNTOS	
Fijos	: 4
Datum	: 0
Nuevos	: 3
Total	: 7
Errcen	: 0.0

CONFIGURACION	
Total de observaciones	: 16
Defecto de datum	: 0
Incógnitas de orientación	: 0
Incógnitas de escala	: 0
Incógnitas de coordenadas	: 6
Grados de libertad	: 10

OBSERVACIONES	
Total	: 16
Acimutes	: 0
Angulos	: 8
Direcciones	: 0
Distancias	: 8
Coordenadas	: 0

so = 1.082  
linf = 0.756 < Ño = 1.000 < lsup = 1.898

Según los resultados y al 95% de probabilidad el AJUSTE se ACEPTA
---

ETCG  
UNA

CONSULTORA CUATRO  
\*\*\* MIRI1 \*\*\*

ARGE  
RESUMEN

COSTA RICA  
02-09-2024

GRUPOS DE ANGULOS

Gr	Nombre	Ø0	s0	vtPv	Redun.
01	GP1	55.00	*****	0.00	0.00
02	GP2E2	15.00	1.81	8.29	2.54

GRUPOS DE DISTANCIAS

Gr	Nombre	Ø0c	Ø0d	s0	vtPv	Redun.	m	sm
01	GP1PR	3.00	3.00	*****	0.00	0.00		
02	GP2LA	6.00	3.00	*****	0.00	0.00		
03	GP1PRM2	1.50	2.00	*****	0.00	0.00		
04	GRP2LAM2	6.00	3.00	0.68	3.42	7.46		

ETCG  
UNA

CONSULTORA CUATRO  
\*\*\* MIRI1 \*\*\*

ARGE  
PUNTOS

COSTA RICA  
02-09-2024

PUNTO	T	Aprox. E/N	DELTA	Ajust. E/N	SIGMA
P5	N	4926.968	4.8	4926.973	1.9
		9975.941	2.4	9975.943	1.6
P6	N	4919.982	7.5	4919.989	1.3
		9960.239	3.5	9960.242	1.2
P7	N	4922.608	2.3	4922.610	2.3
		9942.451	7.7	9942.459	1.2

- 1 -

ETCG  
UNA

CONSULTORA CUATRO  
\*\*\* MIRI1 \*\*\*

ARGE  
OBSERVACIONES

COSTA RICA  
02-09-2024

Tip	Gr	Estacion	Hacia	Med./Ajus.	l/p	v/s	vn/tt	r/n
ANG	02	P1	P4	56.46240	-31.8	30.2	2.9	0.7
			P6	56.46542	0.0	8.8	0.7	2.9
ANG	02	P1	P4	65.56490	0.9	5.4	1.0	0.1
			P5	65.56544	0.0	15.4	0.3	1.0
ANG	02	P2	P1	43.43890	-57.9	2.1	0.5	0.1
			P5	43.43911	0.0	15.7	0.1	0.9
ANG	02	P2	P1	58.02020	-63.8	-13.3	1.3	0.4
			P6	58.01887	0.0	12.1	0.3	1.5
ANG	02	P3	P2	49.71870	-4.3	16.3	1.8	0.4
			P6	49.72033	0.0	12.8	0.5	1.4
ANG	02	P3	P2	68.40980	-77.0	0.7	0.1	0.1
			P7	68.40987	0.0	15.5	0.0	0.9
			P3	26.04090	73.2	-2.7	0.4	0.1
ANG	02	P4	P7	26.04063	0.0	15.2	0.1	1.0
			P3	36.03750	81.9	-21.6	1.9	0.6
			P6	36.03534	0.0	9.9	0.5	2.3
DIS	04	P1	P6	89.348	-6.2	-2.0	0.3	1.0
				89.346	0.0	1.3	0.1	21.3
DIS	04	P1	P5	76.890	-4.2	-1.1	0.2	0.9
				76.889	0.0	1.7	0.0	12.5
DIS	04	P2	P5	58.904	-5.0	6.3	1.0	0.9
				58.910	0.0	2.1	0.3	8.5
DIS	04	P2	P6	68.160	-2.2	2.6	0.4	1.0
				68.163	0.0	1.2	0.1	23.8
DIS	04	P3	P6	61.558	6.7	1.5	0.2	1.0
				61.559	0.0	1.3	0.1	21.5
DIS	04	P3	P7	56.513	-1.8	6.1	1.0	0.9
				56.519	0.0	2.2	0.3	7.3
DIS	04	P4	P7	68.377	-2.1	4.8	0.8	0.9
				68.382	0.0	2.0	0.2	8.6
DIS	04	P4	P6	81.988	-5.9	3.1	0.5	1.0
				81.991	0.0	1.3	0.1	23.0