

Calidad de puntos de control en imágenes aéreas obtenidas mediante uso de vehículos no tripulados

Quality of control points in aerial images obtained through the use of unmanned vehicles

Enrique Pinto^{1a}, Stephanie Wong^{1b}, Martín E. Candanedo G.^{1c},

^{1a}Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

^{1b}Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

^{1c}Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

enrique.pinto@utp.ac.pa, stephanie.wong@utp.ac.pa, martin.candanedo@utp.ac.pa

^{1a} <https://orcid.org/0000-0002-7253-9203>, ^{1b} <https://orcid.org/0009-0000-2244-9886>, ^{1c} <https://orcid.org/0009-0006-1871-8864>

Fecha de recepción: 11 de diciembre de 2024

Fecha de aceptación: 18 de enero de 2025.

DOI <https://doi.org/10.48204/2710-7426.6854>



RESUMEN: El trabajo de investigación realiza un análisis en el uso de puntos de control utilizados en los levantamientos fotogramétricos con vehículos no tripulados (Drones) y se aborda la importancia de la ubicación y el número de puntos de control necesarios para garantizar las condiciones de Colinealidad y Coplanaridad [5] requeridos para la construcción de modelos estéreo y la generación de nubes de puntos y ortomosaico utilizados en distintos ámbitos de ingeniería y arquitectura.

PALABRAS CLASES: Fotogrametría, Drones, Puntos de Control, Geodesia, DEM.

ABSTRACT: The research work carries out an analysis of control points used in photogrammetric surveys with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and the importance of the location and the number of control points necessary to guarantee the conditions of Colinearity¹ and Coplanarity [5] required for the construction of stereo models and the generation of point clouds and orthomosaic used in different fields of engineering and architecture.

KEY WORDS: Photogrammetry, Drones, Control Points, Geodesy, DEM

1. INTRODUCCIÓN

Los levantamientos fotogramétricos con Drones han facilitado el uso de productos como nube de puntos, modelos digitales de elevación (DEM) y ortomosaicos en proyectos de ingeniería y arquitectura. La calidad de estos productos tiene un impacto directo en el análisis y los diseños a realizar; donde dicha calidad está fundamentada en la cantidad de puntos de control utilizados en el terreno. La Fotogrametría Analítica [4] introduce la consideración del cálculo matemático computarizado y riguroso de coordenadas de puntos en el espacio del terreno con base a

parámetros como: puntos de control en el terreno, la distancia focal y el centro de perspectiva de la cámara aérea, los traslapes longitudinales y lateral y los parámetros de transformación introducidos por el modelo matemático a utilizar para garantizar el cumplimiento de la Colinealidad y Coplanaridad [5] de un par estéreo de imágenes aéreas. Utilizando el modelo matemático de la Ecuación de Colinealidad para resolver por los tres ángulos de rotación de la cámara (ω , ϕ y κ) y las coordenadas de la estación de exposición con respecto al suelo (X_o , Y_o y Z_o) se debe resolver seis incógnitas por lo que requieren al

menos cuatro puntos de control total por cada par estéreo del proyecto fotogramétrico a levantar. La ubicación de estos puntos apunta a una distribución uniforme de los mismo en el par estéreo.

Hoy día la Fotogrametría Digital permite incorporar todas las imágenes digitales levantadas dentro del proyecto fotogramétrico como un todo y tratar cada pixel, de cada imagen, como un punto y aplicar los conceptos fotogramétricos para la generación de productos digitales. Igualmente es de riguroso el proceso de orientación (omega, phi, kappa, Xo, Yo, Zo) de cada par estéreo dentro del bloque fotogramétrico. En este proceso la elevación de los puntos de control y en general el de cada punto dentro de la imagen, son sensibles a los cambios de elevación, con base al concepto básico que se está proyectando el plano generado por el par de imágenes estéreo al plano de elevación promedio del terreno. De no considerar el cambio de elevación entre los puntos del bloque y la elevación promedio se puede incurrir en errores de paralaje que tienen un impacto directo en la calidad de los productos generados a partir del modelo matemático utilizado para la restitución fotogramétrica [4].

Es imperativo el poder determinar cuántos son los puntos de control requeridos en el suelo y su ubicación (longitud, latitud y elevación) en el bloque de imágenes aéreas tomadas. Tradicionalmente en campo, los profesionales de la geomática tratan los levantamientos fotogramétricos realizados con Drones como si el bloque fotogramétrico fuese un par de imágenes, lo cual en principio cumple con lo establecido desde el punto de vista de la Fotogrametría Analítica y la orientación del par estéreo, sin embargo, la pregunta se mantiene, como determinar el número mínimo de puntos de control a utilizar en el terreno y donde deben ser colocados (X,Y y Z) los mismos cuando las características de elevación y localización de cada punto de control varía con respecto a la elevación promedio y como afectan estos cambios de elevación y ubicación en el proceso global de ajuste en bloque fotogramétrico.

2. METODOLOGÍA

Con el propósito de evaluar como los cambios en la elevación de cada punto de control y su localización dentro del bloque de imágenes aéreas se diseñó una cuadrícula similar a la introducida por Otto von Gruber [1] mostrado en la Figura No. 1, que resolvió el problema de las orientaciones del par estéreo de forma sistemática y completa. Adicionalmente Gruber junto a Gasser [5] propusieron y diseñaron los procedimientos de concatenación de modelo estéreos generando la base de lo que hoy conocemos Aerotriangulación.

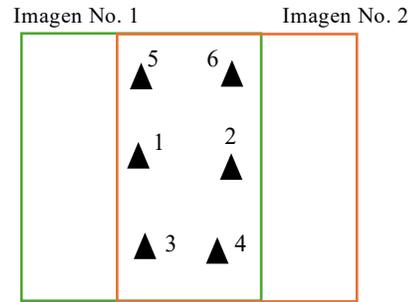


Figura No. 1. Puntos de Otto von Gruber[4]

Se seleccionó un sitio de trabajo dentro del campus Víctor Levi Sasso que presentara variación de elevación como lo muestra la Figura No. 2. El sitio de trabajo presentaba una elevación promedio de 70.388 metros sobre el nivel medio del mar.

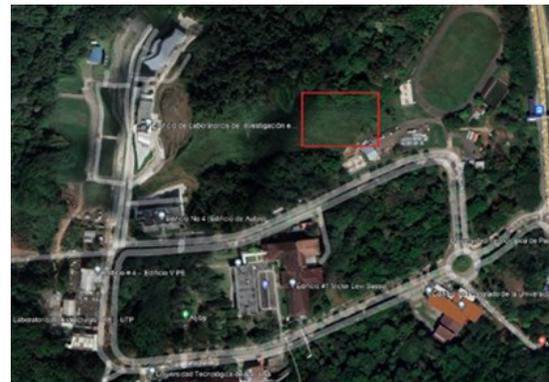
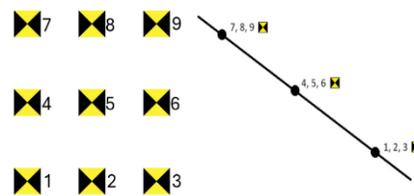


Figura No. 2 . Sitio de Trabajo

Figura No. 3. Vista de Planta y Perfil de los puntos de Control

Se diseñaron los puntos de control artificial a colocar en el grid modificado de Otto von Gruber propuesto en la investigación como se muestran en la Figura No. 3.

Cada marcador (ver Figura No. 4) debe cumplir con las condiciones de distancia de muestreo de terreno (GSD, por siglas en inglés) establecida por la ecuación No. 1 [2].

$$GSD = \frac{Sw * H}{c * imgW} \quad (1)$$

Donde:

- Sw es el ancho del sensor
- H es la altura de vuelo en metros
- c es la distancia focal del sensor
- imgW es el ancho de la imagen en pixeles

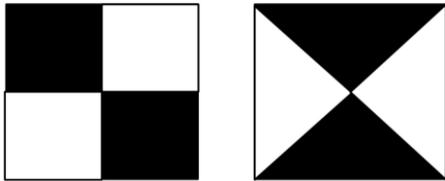


Figura No. 4. Propuesta de diseño de marcadores [1]

El modelo matemático ha utilizar para realizar la restitución fotogrametría y posterior generación de productos de nube de puntos y ortomosaico es la ecuación de Colinearidad (ecuaciones 2a y 2b) [4].

$$x_a = x_0 - f \left[\frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \right] \quad (2a)$$

$$y_a = y_0 - f \left[\frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \right] \quad (2b)$$

Donde:

- x_a, y_a son las coordenadas de la foto de un punto “a” en la imagen.
- X_A, Y_A y Z_A son coordenadas en del punto “A” en el terreno.
- X_L, Y_L y Z_L son coordenadas de terreno de la estación de exposición.
- f es la distancia focal de la cámara.
- x_0, y_0 son las coordenadas de la estación de exposición en la imagen.
- Las $m_{i,j}$ son funciones de tres ángulos de rotación y, con mayor frecuencia, omega, phi y kappa son los ángulos empleados en el proceso de orientación y restitución fotogramétrica.

Para el levantamiento Fotogramétrico se seleccionó un Drone multi rotor Mavic 3 Enterprise de la empresa DJI. Considerando la elevación promedio del terreno se seleccionó una altura de vuelo del Drone de 85 metros sobre el nivel medio del mar correspondiente a $\pm 20\%$ de la altura promedio de terreno.



Figura No. 5. Plan de Vuelo

Se generó el plan de vuelo desde la aplicación del Drone como se muestra en la Figura No. 5, con una resolución en el terreno de 2.35 cm por pixel, definiendo un traslape longitudinal de 80 % y lateral del 60 % y una huella en el terreno de 289 m x 193 m y un tiempo de vuelo de 14 minutos y 30 segundos. Además, se seleccionó la proyección UTM Zona 17 Norte, el datum geodésico WGS84.

Cada punto de control fue medido mediante un levantamiento Geodésico estático utilizando estaciones GPS South doble frecuencia. El ajuste fotogramétrico fue desarrollado utilizando el software Drone2Map de la empresa ESRI [2].

Con el objetivo de evaluar el impacto de la ubicación y elevación del punto de control, en el proceso de ajuste fotogramétrico se desarrolló el proceso variando el número de puntos de control y su ubicación dentro el grid de control propuesto (ver Figura No. 3). Es decir, realizar una serie de combinaciones de ubicación y combinación de puntos de control y luego verificar los resultados comparando las coordenadas de aquellos puntos de control que no fueron utilizados como tal y determinar el error en la definición de las coordenadas de los puntos no utilizados en el proceso de ajuste Fotogramétrico. Se estableció una tolerancia de 3 mm para definir la calidad de los resultados estimados de desplazamiento dX, dY y dZ. El proceso para determinar cuántas iteraciones serán necesarias se basa en el cálculo de combinaciones [3], en lugar de permutaciones (ver ecuación No. 3), ya que el punto de interés radica en la selección de elementos, en lugar del orden en que se seleccionan.

$$\frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (3)$$

Donde:

n es el tamaño de la muestra

r es la porción elegida de la muestra

El tamaño de la muestra “n” viene dado por la cantidad de puntos disponibles, es decir, los nueve (9) puntos geodésicos levantados por GPS. La porción de la muestra “r” viene dada por el número de puntos que se seleccionan como puntos de control (GCP) para el procesamiento. De

esta manera y para este caso de estudio particular, “n” resulta en una constante (n = 9) y “r” varía dependiendo de los GCP seleccionados (0 < r < 9).

3. RESULTADOS

Una vez obtenidos todos los informes de los ajustes Fotogramétricos, se transcribieron a tablas de resultados y se elaboraron las gráficas con los desplazamientos (dX, dY y dZ) según la cantidad de puntos de control que se utilizaron, es decir, se realizaron nueve tablas y ocho gráficas. Las combinaciones que usan cero (0) y nueve (9) puntos de control no poseen gráfica debido a que ambos casos resultan en solo una combinación.

Al usar un solo punto de control se obtienen nueve (9) posibles combinaciones donde el punto P3, mostrado en la Figura No. 6, es el que posee el menor desplazamiento relativo promedio entre dX, dY y dZ (7 mm), y que el punto P2 posee un desplazamiento dZ elevado (29 mm por encima del dZ promedio de 13 mm).

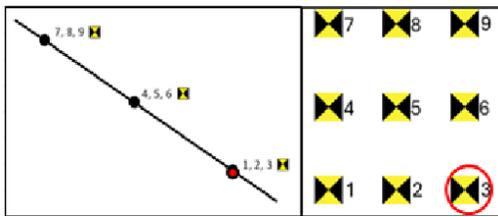


Figura No. 6. Mejor resultado con un punto de control

Al utilizar dos puntos de control se obtuvieron 36 diferentes combinaciones, siendo la combinación con conteniendo los puntos P3 y P6 la que obtuvo el menor desplazamiento relativo promedio entre dX, dY y dZ (11 mm). Los valores de dX y dY poseen un comportamiento sinusoidal, que oscila entre los 6 mm y 28 mm, con la excepción de la combinación que usa los puntos P2 y P8. La Figuras No. 8 y No. 9 muestran los resultados de combinaciones con (P2-P5, P2-P6, P2-P8) donde se obtienen mejores resultados de dZ de 8 mm pero lejos de la tolerancia de 3 mm.

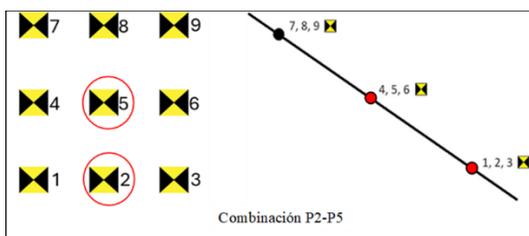


Figura No. 7. Mejor resultado con dos puntos de control

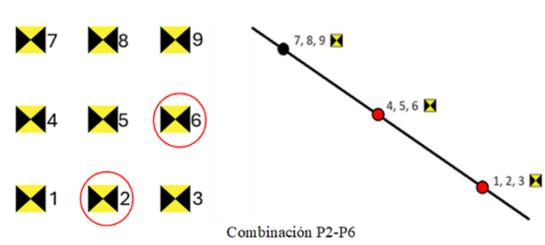


Figura No. 8. Mejor resultado con dos puntos de control

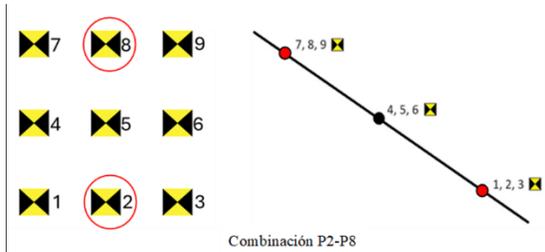


Figura No. 9. Mejor resultado con dos puntos de control

Al utilizar tres puntos de control se obtuvieron 84 diferentes combinaciones, siendo la combinación mostrada en la Figura No. 10, con los puntos P1, P4 y P8 la que obtuvo el menor desplazamiento relativo promedio entre dX, dY y dZ (1 mm).

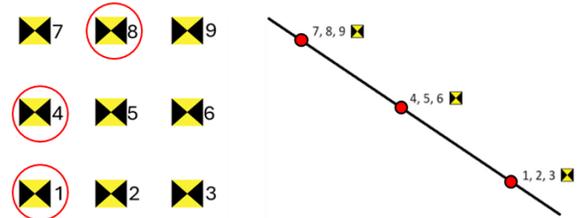


Figura No. 10. Mejor resultado con tres puntos de control con mínimo desplazamiento

La Figura No. 11, muestra que la combinación P2-P5-P8 acerca los valores de los tres (3) desplazamientos (dX, dY, y dZ) hacia el valor de la tolerancia requerida de 3 mm.

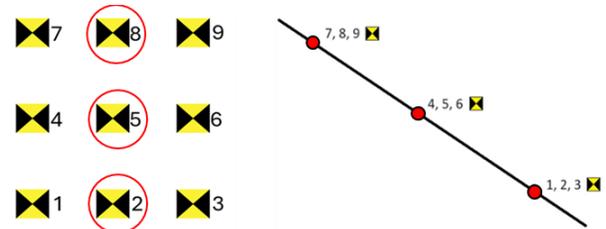


Figura No. 11. Resultado con tres puntos de control cumple la tolerancia

Cuando se utilizan cuatro puntos de control se obtuvieron 126 diferentes combinaciones, siendo la combinación con los puntos P2-P3-P7-P8 la que obtuvo el menor desplazamiento relativo promedio entre dX, dY y dZ (1 mm) y la combinación P2-P3-P6-P8 cumple con la

tolerancia mínimo de 3 mm. Ambas combinaciones son mostradas en la Figura No. 12.

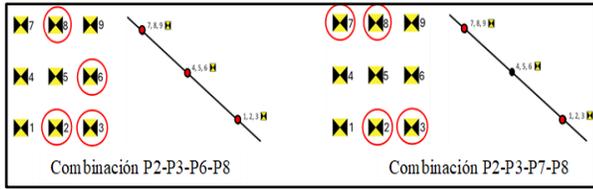


Figura No. 12. Resultado con cuatro puntos de control cumple la tolerancia y presenta el mínimo desplazamiento

Combinando cinco puntos de control se obtuvieron 126 diferentes combinaciones, siendo las combinaciones se resaltan las combinaciones $P_2-P_3-P_5-P_6-P_9$ y $P_2-P_3-P_6-P_8-P_9$. Estas son las únicas combinaciones mostradas en la Figura No. 13 en la que los tres desplazamientos cumplen con la tolerancia de 3 mm y con los puntos $P_1-P_2-P_4-P_5-P_8$, $P_2-P_3-P_4-P_5-P_8$ y $P_2-P_4-P_5-P_8-P_9$ las que obtuvieron el menor desplazamiento relativo promedio entre dX , dY y dZ (2 mm).

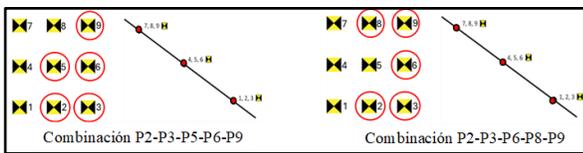


Figura No. 13. Resultado con cinco puntos de control que cumplen con la tolerancia y presenta el mínimo desplazamiento

Planteando seis puntos de control se obtuvieron 126 diferentes combinaciones, siendo la combinación con los puntos $P_2-P_3-P_4-P_5-P_8-P_9$ la que obtuvo el menor desplazamiento relativo promedio entre dX , dY y dZ (2 mm) y $P_2-P_3-P_4-P_6-P_7-P_8$ cumple con la tolerancia de 3 mm. La distribución de ambas combinaciones es mostrada en la Figura No. 14.

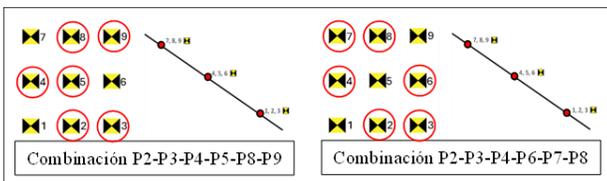


Figura No. 14. Resultado con seis puntos de control que cumplen con la tolerancia y presenta el mínimo desplazamiento

Combinando siete puntos de control se obtuvieron 36 diferentes combinaciones, siendo las combinaciones con los puntos $P_1-P_2-P_3-P_4-P_5-P_6-P_9$, $P_1-P_2-P_3-P_4-P_5-P_8-P_9$ y $P_1-P_2-P_4-P_5-P_6-P_7-P_8$ las que obtuvieron el menor desplazamiento relativo promedio entre dX , dY y dZ (3 mm). La Figura No. 15 presenta la distribución espacial de los puntos de control que generan los desplazamientos mínimos.

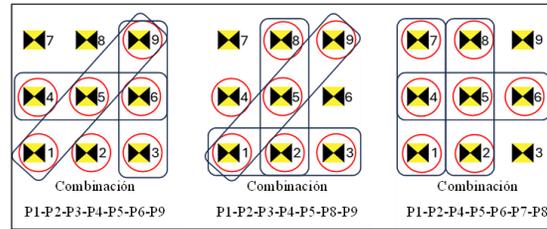


Figura No. 15. Resultado con siete puntos de control que cumplen con la tolerancia y presenta el mínimo desplazamiento

El combinar ocho (8) puntos de control condiciona nueve (9) posibles combinaciones. Se puede observar que los valores de los tres desplazamientos dX , dY y dZ se acercan aún más a la tolerancia de 3 mm. Las combinaciones que no utilizan los puntos P_6 y P_7 como control son las que poseen el menor desplazamiento relativo promedio entre dX , dY , y dZ (3.33 mm y 3 mm, respectivamente). La tabla No. 1 muestra el resultado de las combinaciones que cumplen con la tolerancia de 3 mm establecida.

Tabla No. 1 Combinaciones que cumplen con la tolerancia de 3 mm en X, Y y Z

i	GCP	RMSE/PUNTO	X (m)	Y (m)	Z (m)
62	3	P1-P4-P8	0.002	0.000	0.002
196	4	P2-P3-P6-P8	0.003	0.001	0.001
198	4	P2-P3-P7-P8	0.002	0.001	0.001
338	5	P2-P3-P5-P6-P9	0.003	0.002	0.002
344	5	P2-P3-P6-P8-P9	0.003	0.003	0.001
444	6	P2-P3-P4-P6-P7-P8	0.003	0.003	0.002

4. CONCLUSIONES

Queda claro que la ubicación y la elevación de los puntos de control tienen una contribución importante en la definición de la calidad de los resultados del proceso fotogramétrico. La tabla No. 1 define claramente la cantidad mínima de puntos de control y su localización, necesarios para cumplir con la tolerancia establecida para cada desplazamiento es de tres (3) puntos. También se observa que las combinaciones más precisas fueron las que utilizan los puntos $P_1-P_4-P_8$ (3 GCP) y $P_2-P_3-P_7-P_8$ (4 GCP), ambos con una diferencia promedio de 1.33 mm aproximadamente. Es importante resaltar que los puntos de control fueron establecidos con un rango de variación de $\pm 20\%$ de la altura promedio del terreno.

En adición, es obvio que al utilizar una mayor cantidad de puntos de control los desplazamientos se van reduciendo, lo que implica una mayor precisión de los datos, sin embargo, este hecho no garantiza que los tres desplazamientos (dX , dY , y dZ) cumplan con la tolerancia establecida al mismo tiempo lo cual puede generar resultado sin la calidad esperada y aumentar el costo del levantamiento geodésico. Por ejemplo, en la tabla No. 1 la combinación de $P_2-P_3-P_6-P_8-P_9$ (cinco puntos de control) proporciona los menores desplazamientos, pero el costo de cinco puntos de control no es la opción esperada.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos al Ingeniero Moisés Lima, coordinador de la carrera de Ingeniería Geomática de la Facultad de Ingeniería Civil por su apoyo desinteresado para el desarrollo de la presente investigación. Igualmente, importante el agradecimiento al Dr. Jorge Quijada y el Grupo de Investigación del Transporte y el Territorio (GITT).

REFERENCIAS

- [1] Candanedo, M. (2023). Cartografía con Drones. Apuntes UTP. Ciudad de Panamá, Panamá, Panamá.
- [2] Disfruta las Matemáticas. (s.f.). Combinaciones y Permutaciones. Obtenido de Disfruta las Matemáticas: <https://www.disfrutalasmaticas.com/combinatoria/combinaciones-permutaciones.html>
- [3] ESRI. (2024). Manage Control. Retrieved from ArcGIS Drone2Map: <https://doc.arcgis.com/en/drone2map/latest/help/control.htm>
- [4] Otero, I., Ezquerro, A., Rodríguez Solano, R., Martín, L., & Bachiller, I. (2008). Fotogrametría, 1-134. *Recuperado de* http://ocw.upm.es/ingenieria-cartograficageodesica-y-fotogrametria/topografiacartografia-y-geodesia/contenidos/TEMA_11_FOTOGRAFIAY_T_ELEDETECCION/Fotogrametria/fotogrametria_cap_libro.pdf.
- [5] Wolf, Dewitt & Wilkinson. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. Fourth Edition, McGraw Hill, ISBN 978-0-07-176112-3, 2014