



CENTRO DE INGENIERIA DE LA CALIDAD – CALI – COLOMBIA
www.cicalidad.com info@cicalidad.com

Diseño de Experimentos – conceptos básicos.

Introducción: El presente documento describe de forma muy general y breve la metodología de diseños experimentales, una breve historia de su desarrollo, conceptualización básica, campos de aplicación, y ante todo pretende motivar el uso de la metodología como una herramienta necesaria y útil en procesos de mejoramiento a nivel empresarial.

Muchas de las empresas colombianas que emprenden ambiciosos proyectos de mejoramiento de la calidad con el objetivo de ser más competitivas, en algún momento deben requerir la aplicación de la metodología de Diseño experimental para probar el desempeño de sus procesos ante condiciones variables. Aquellas que consideren que no la necesitan probablemente es porque el grado de desarrollo de sus proyectos de mejoramiento se encuentra en etapas preliminares.

Qué problemas típicos de la industria se pueden enfrentar con DOE?

- Comparar varios proveedores del mismo material con el fin de elegir al que mejor cumple los requerimientos.
- Comparar varios instrumentos de medición respecto a su precisión y exactitud.
- Proponer una nueva manera de operar el proceso.
- Determinar factores o fuentes de variabilidad que impactan significativamente la capacidad del proceso respecto a alguna característica de calidad.
- Localizar las condiciones óptimas de operación de un proceso.
- Reducir el tiempo de ciclo del proceso.
- Hacer el proceso ROBUSTO (insensible) a factores de ruido.
- Apoyar el diseño de nuevos productos.

Conceptualización básica:

Qué es un experimento?

Una prueba donde se cambian controladamente algunas condiciones de operación de un sistema o proceso, con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias variables del producto o salida de dicho proceso.



Qué es diseñar un experimento?

Planear un conjunto de pruebas experimentales, de tal manera que los datos generados puedan analizarse estadísticamente para obtener conclusiones objetivas y válidas sobre el sistema o proceso. En un diseño experimental el investigador establece un conjunto particular de circunstancias, bajo un protocolo específico para observar y evaluar las implicaciones de las observaciones resultantes.

Qué es unidad experimental?

Cada elemento que será sometido a determinadas condiciones del experimento y que brindará una respuesta (medición o dato estadístico). Las características de este elemento deben ser claramente definidas por el investigador; según el caso unidad experimental puede ser: una persona, una caja, un camión, un turno de producción, un m³ de carbón, una hora, etc., etc. Lo que debe quedar claro es que cada unidad experimental producirá una respuesta (un dato para ser analizado).

Qué es la variable de respuesta?

Aquella característica de interés para el investigador, aquella que se quiere mejorar mediante el experimento. Por lo general el valor de esta variable afecta la calidad del producto; cada unidad experimental entrega un valor de la variable de respuesta, es decir, nuestro experimento tendrá tantos datos como unidades experimentales hayan sido incluidas.

Qué son factores controlables?

Variables de entrada (ó de proceso) que el investigador puede fijar en un punto o nivel de operación; por ejemplo: si un proceso trabaja con agua y existe algún mecanismo que permita fijar la temperatura del agua en 60 ó 65 ó 70 grados Celsius, entonces decimos que la Temperatura es un factor controlable. En este punto es importante resaltar el aspecto de la calidad de las mediciones (Aseguramiento metrológico).

Qué son factores NO controlables?

Se pueden llamar también Factores de ruido, y casi siempre son la mayoría de variables que pueden afectar nuestra variable de respuesta; son variables que NO se pueden controlar durante la operación normal del proceso. Un factor NO controlable puede llegar a ser controlable en la medida en que se desarrolle el mecanismos de control. Ejemplo: la temperatura ambiente, el ánimo de los operadores, la cantidad de lluvia, etc. son factores que suelen ser NO controlables.

NOTA: En el experimento se pretende establecer si los factores influyen sobre la variable de respuesta.



Qué son Factores estudiados?

Variables que se investigan en el experimento, en cuanto a cómo influyen ó afectan la variable de respuesta. Durante un experimento se pueden estudiar factores controlables (generalmente) pero también factores NO controlables. Se deben estudiar aquellos factores que se considera, por conocimiento del proceso ó por “sospecha”, pueden tener efecto significativo sobre la variable de respuesta.

Qué son niveles y tratamientos?

Los diferentes valores que se asignan (fijan) a cada factor estudiado en un diseño experimental se denominan niveles. Una combinación de niveles de todos los factores estudiados se denomina tratamiento o punto de diseño. También es posible que esos niveles sean escogidos de manera aleatoria.

Qué es error experimental?

Representa la porción de variabilidad de la variable de respuesta, que no resulta ser explicada por los factores estudiados a causa de errores cometidos por el investigador en las etapas de planeación y ejecución del experimento.

Qué es error aleatorio?

Representa la porción de variabilidad de la variable de respuesta, que no resulta ser explicada por los factores estudiados debido a causas comunes o aleatorias que generan la variabilidad natural del proceso. Aquí se incluyen factores no conocidos y/o no estudiados, variaciones en las mediciones, etc.

Qué es interacción entre factores?

Se presenta cuando el efecto de un factor depende del nivel en que se encuentra el otro factor.

NOTA: Cuando los términos de error de un experimento resultan ser muy grandes, es muy probable que NO se puedan detectar (aunque SI existan en realidad) los efectos que los factores estudiados ejercen sobre la variable de respuesta.

Qué es un factor cualitativo?

Sus niveles de prueba toman valores de tipo nominal; ejemplo: máquinas, lotes, marcas, etc.

Qué es un factor cuantitativo?

Sus niveles de prueba toman cualquier valor dentro de cierto intervalo, su escala de medición es continua; ejemplo: temperatura, presión, velocidad, etc.

Qué es un arreglo factorial?

Conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse al considerar todas las posibilidades de combinación de los niveles de los factores.



Qué es el efecto de un factor?

El cambio estadísticamente significativo que se observa en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel en el factor.

Qué es un efecto simple?

Es el cambio registrado en la variable de respuesta cuando se cambia de nivel en un factor, manteniendo fijo otro factor.

Qué es un efecto principal?

Es el cambio registrado en la variable de respuesta cuando se cambia de nivel en un factor, cuando se han promediado todos los niveles del otro factor.

Desarrollo de contenido:

Orígenes de la metodología:

El desarrollo del análisis de varianza (ANOVA) y de los métodos de Diseño de Experimentos (DOE) se debe a Ronald A. Fisher (1880 – 1962). Quién en su trabajo en la estación de investigación agraria de Rothamsted en el Reino Unido desarrolló los principios de la experimentación científica que se plasmaron en su influyente libro *Design of Experiments*. El libro comienza con un problema planteado por una de sus colaboradoras a la hora del té, ella afirma que puede apreciar por el sabor si en la taza se sirvió primero el té o la leche. El trabajo de Fisher fue continuado por F. Yates (1902 – 1978), que le sucedió como director de la estación de investigación, Yates estudió los diseños factoriales y desarrolló nuevos diseños, y D. J. Finney que estudió las fracciones factoriales y en sus estudios de ensayos biológicos introduce modelos de regresión con variable de respuesta cualitativa, como los modelos probit y logístico. En Estados Unidos W. G. Cochran (1909 – 1980) fundamenta matemáticamente el análisis de varianza y escribe con G. M. Cox (1900 – 1978), la primera mujer en obtener grado de estadística y la primera presidente de la American Statistical Association, un texto básico sobre diseños experimentales. G. W. Snedecor (1881 – 1974) hace aportes muy importantes en cuanto al contraste de hipótesis en estos modelos.

La aplicación de los diseños experimentales en la industria es debida en gran parte al trabajo de G. E. P. Box, quien desarrolla la metodología de superficies de respuesta (RSM); adicionalmente por los trabajos de Deming y Genichi Taguchi. En el campo de la administración la metodología ha sido impulsada por J. W. Tukey (1915 – 2000) quien desarrolló la metodología del Análisis Conjunto.



Presentación de la metodología:

Diseño de experimentos (DOE) es un proceso activo para planear el experimento de tal forma que se reciben datos adecuados que pueden analizarse con métodos estadísticos que llevarán a conclusiones válidas y objetivas; es decir, estamos hablando de un método científico. En escenarios reales los datos están sujetos a errores experimentales y errores aleatorios, lo cuál convierte a la metodología estadística en el único enfoque objetivo para el análisis. En términos de calidad la metodología DOE es el resultado de enfocar mayores esfuerzos en la prevención y menos esfuerzos en la inspección.

A continuación se presentan las etapas de la metodología DOE; es importante tener en cuenta que adicionalmente al conocimiento teórico estadístico, se deben sumar el conocimiento técnico sobre el proceso; y que el experimento surja como una necesidad dentro de un proyecto de mejoramiento enmarcado en un sistema organizado de gestión de la calidad (PHVA, Six Sigma, Lean Manufacturing, etc.); y todo lo anterior respaldado por el liderazgo y compromiso del más alto directivo de la compañía.

Etapas de planeación:

- Identificación y definición del problema: Con base en información histórica reciente recolectada por el equipo de mejoramiento se debe seleccionar un problema que sea importante para la compañía tanto en términos económicos como estratégicos. No se debe pretender iniciar un proceso de mejoramiento con la técnica de DOE, en razón a que considero que para requerir de esta técnica es necesario alcanzar cierto grado de desarrollo y conocimiento previo del proceso; en el cuál se pueden usar técnicas como Control de procesos, Análisis de capacidad de proceso, Métodos de inferencia, etc. En un experimento puede haber varios posibles objetivos, pero el más común es encontrar el tratamiento que ocasiona el mejor comportamiento en la variable de respuesta; la selección tanto de la variable de respuesta como de los factores a ser estudiados corresponde estrictamente al equipo de mejoramiento y en esta definición el conocimiento técnico del proceso es prioritario sobre el conocimiento estadístico.
- Determinar la variable de respuesta: Se recomienda seleccionar una variable crítica del proceso, ya sea por su alta variabilidad, o porque sus indicadores de capacidad de proceso no son adecuados, o por que es causal de un porcentaje importante de defectos o artículos defectuosos.
- Determinar cuantos y cuáles factores serán estudiados: Aquí son muy válidas las hipótesis formuladas por los conocedores del proceso, respecto a cuáles factores pueden influir sobre la variable de respuesta. También es importante definir los niveles en los que serán probados los factores.

- Seleccionar el diseño experimental: Se escoge el tipo de diseño (modelo) adecuado para el cumplimiento de los objetivos del experimento, teniendo en cuenta los aspectos económicos para que el experimento sea eficiente. También se determina el número de repeticiones de cada tratamiento, tomado en cuenta la confiabilidad y precisión deseadas en los resultados.
- Planear y organizar la ejecución del experimento: definir las personas que vana a intervenir, la función de cada persona, seleccionar las unidades experimentales, aleatorizar el experimento, comprobar los sistemas de medición. Aquí se recomienda la utilización de algún paquete estadístico (por ejemplo MINITAB), los cuáles traen incorporados algoritmos que permiten aleatorizar el experimento.
- Ejecución del experimento: efectuar las corridas experimentales de acuerdo con el plan establecido.

En la Figura 1. y Figura 2. se pueden observar algunos aspectos de la planeación experimental, resaltando que la variable de respuesta del experimento constituye una variable de salida para el proceso y los factores a estudiar constituyen variables de entrada del proceso; sobre el proceso influyen múltiples factores algunos de ellos controlables y otros son factores de ruido. Adicionalmente se pueden considerar problemas con múltiples variables de respuesta; pero estos requieren metodologías especiales de procesamiento y análisis.



Figura 1. Aspectos de la planeación experimental

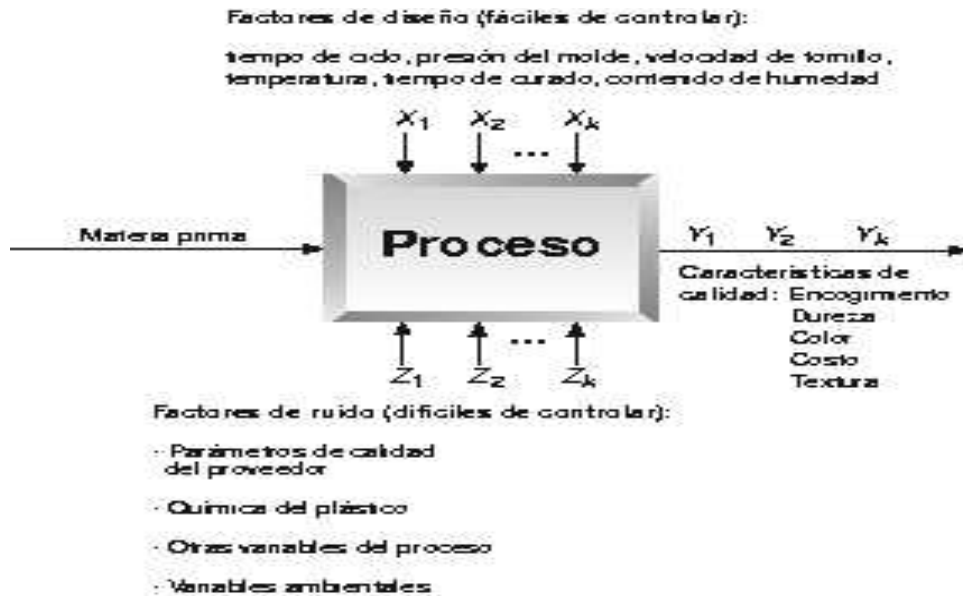


Figura 2. Aspectos de la planeación experimental en un ejemplo de producción de plástico.

Etapa de análisis:

Nuevamente es importante resaltar la importancia de utilizar los métodos estadísticos adecuados para el análisis, y estos deben estar totalmente acordes con el modelo o tipo de diseño seleccionado en la etapa de planeación; aquí nuevamente se recomienda el uso del paquete estadístico, el cual garantiza la consistencia entre el modelo planeado y el ANOVA, además estos paquetes cuentan con ayudas gráficas que facilitan enormemente el análisis.

En esta etapa se deben conjugar eficientemente el conocimiento del proceso y los métodos de análisis estadísticos, es importante resaltar que ninguna de las conclusiones obtenidas tendrá 100% de confiabilidad, en razón a que estamos trabajando con modelos probabilísticos y que las pruebas de nuestro experimento constituyen solamente una muestra aleatoria de la realidad que deseamos modelar. Se deben contrastar las hipótesis iniciales con los resultados del experimento, observar que nuevo conocimiento acerca del proceso nos dejó el experimento, validar los supuestos del modelo y seleccionar el tratamiento ganador.



Etapas de conclusiones:

Decidir que medidas implementar para socializar los resultados del experimento, así como garantizar que las mejoras se mantengan (estandarizar). Las conclusiones deben ser prácticas y respetuosas de los supuestos teóricos, es necesario encontrar ese punto de equilibrio entre la teoría y la práctica.

Es importante tener en cuenta que la experimentación es una parte esencial del proceso de aprendizaje, en la que se formulan hipótesis tentativas fundamentadas en el conocimiento técnico del proceso estudiado, se planean y ejecutan experimentos para comprobar dichas hipótesis y se formulan nuevas hipótesis para reiniciar el proceso; es justamente un proceso sistémico y es muy poco probable planear el gran y único experimento que solucione todos nuestros problemas en corto plazo, la experiencia nos indica que es más eficiente apostar a la experimentación secuencial, es decir, varios experimentos donde los resultados del anterior son la base para la planeación de uno nuevo. En el sector industrial es costoso llevar a cabo experimentos, pero se han diseñado métodos adecuados estadísticamente que permiten obtener información en forma eficiente, se puede afirmar que a la fecha existe un tipo de experimento adecuado a cada situación; sin que dejemos de lado la importancia que en todo este proceso tiene el compromiso y liderazgo de la alta gerencia, es obvio que un proyecto de diseño experimental bien conjugado con las metas estratégicas de la compañía obtendrá fácilmente el patrocinio adecuado por parte de la empresa; y los buenos resultados (demostrados financieramente) harán que estos recursos se vean como una inversión de comprobado retorno financiero.

Principios básicos de un diseño experimental:

La validez del análisis estadístico de los datos experimentales tiene como base el cumplimiento de los siguientes principios:

Aleatorización: Consiste en realizar las corridas experimentales en orden aleatorio y con material seleccionado también aleatoriamente; el cumplimiento de este principio aumenta la probabilidad de cumplimiento para el supuesto de independencia de los errores del modelo aplicado; además, es la manera de garantizar que la variabilidad ocasionada por los factores no estudiados y/o no controlados se reparta de manera homogénea en todos los tratamientos, sin favorecer o desfavorecer al alguno de ellos.

A cada unidad experimental se asignará de manera aleatoria el correspondiente tratamiento; además, el orden en que cada unidad experimental será sometida al respectivo tratamiento también se asignará de manera aleatoria.

Réplicas: Consiste en que cada tratamiento se asignará a dos ó más unidades experimentales. En caso de no cumplir este principio no será posible estimar el error del modelo y en consecuencia tampoco se pueden probar las respectivas hipótesis de los



efectos investigados, a mayor cantidad de réplicas se obtendrán estimaciones más precisas de los efectos estudiados. En este punto es importante aclarar que existen tipos de diseño que permiten utilizar sólo una réplica en cada punto experimental sin perder validez estadística en los análisis.

Bloqueo: Se utiliza para mejorar la precisión de las comparaciones que se realizan entre los factores de interés. En la mayoría de ocasiones se utilizan para aislar la variabilidad transmitida por factores perturbadores, es decir, factores que se piensa si influyen sobre la variable de respuesta pero no son de interés directo para el investigador. El bloqueo disminuye el valor estimado del error del modelo, haciendo más probable la detección de los efectos que los factores estudiados ejercen sobre la variable de respuesta.

Supuestos teóricos que se deben validar en un diseño experimental:

En este punto es importante anotar que todo diseño experimental se puede expresar a través de un modelo matemático o modelo de regresión que expresa la variable de respuesta en términos de los factores involucrados en el diseño. A través de los residuos (diferencia entre el valor real y el valor estimado por el modelo) del modelo matemático se puede validar el cumplimiento de los supuestos matemáticos del modelo; dichos supuestos son:

1. Normalidad: este supuesto se puede validar a través de pruebas estadísticas tales como Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilks, Anderson-Darling.
2. Independencia: la prueba de Durbin-Watson es la más comúnmente utilizada para este propósito.
3. Homoscedasticidad o varianza constante: Se recomienda formar varios grupos de residuos consecutivos (ordenando ascendentemente las observaciones según el valor estimado de y), calcular el promedio y la varianza de cada grupo; en este momento se tienen varios promedios y varias varianzas; entonces se procede a efectuar una regresión lineal de promedios en función de varianzas, si no existe relación lineal significativa entre promedios y varianzas, se considera que el modelo si cumple adecuadamente con el supuesto. También se sugiere consultar la prueba de Bartlett.

El incumplimiento de algunos de los supuestos invalidará los resultados y conclusiones del experimento; dado el caso se debe intentar la solución a través de transformaciones de las variables, tales como logarítmica, de potencia o la transformación de Box-Cox. También se sugiere efectuar el **diagnóstico de puntos de influencia**.

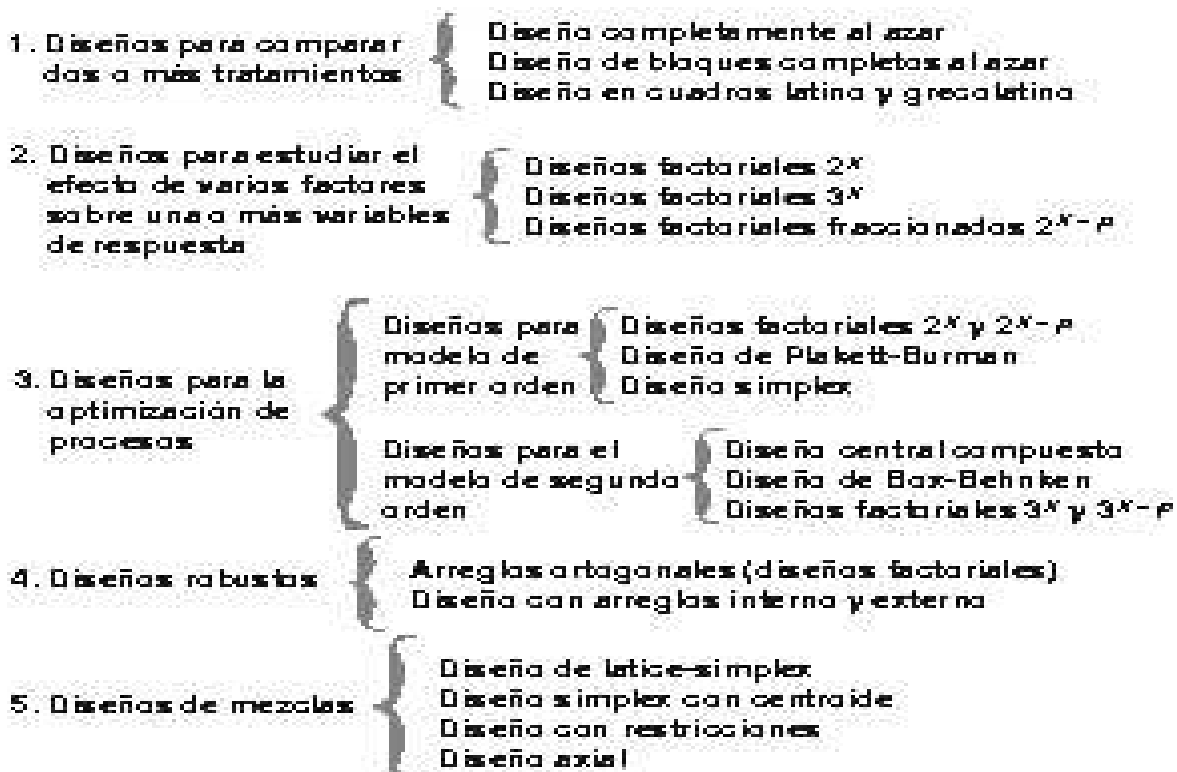
Clasificación y selección de los diseños experimentales:

Los aspectos que más influyen en la selección de un diseño experimental, en el sentido de que cuando cambian nos llevan generalmente a cambiar de diseño:

1. El objetivo del experimento.
2. El número de factores a controlar.
3. El número de niveles que se prueban en cada factor.
4. Los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta).
5. El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

Es importante tener en cuenta que los aspectos anteriores actúan en forma conjunta.

En forma generalizada los diseños experimentales se pueden agrupar de acuerdo con el objetivo del experimento, de la siguiente manera:





Conclusiones:

1. El Diseño de experimentos es un método científico con más de 100 años de desarrollo y aplicación; inicialmente surgió para ser aplicado en la investigación agrícola pero a la fecha ha tenido gran aplicación en la industria y en el campo de la administración. Se recomienda su aplicación en proyectos de mejoramiento continuo enmarcados en una estrategia corporativa de gestión de calidad.
2. Cuando el responsable de un proceso empresarial aplica la metodología DOE se convierte en un observador perceptivo y proactivo, capaz de detectar oportunidades de mejoramiento a través del análisis estadístico de información. Y si evoluciona en el conocimiento de DOE hasta llegar a las superficies de respuesta podrá conducir sus proceso muy cerca del rendimiento óptimo, haciéndolo más productivo, más competitivo y aportando grandes beneficios económicos para su negocio.

Bibliografía:

Gutierrez, Humberto. y De La Vara Salazar, Román. “Análisis y Diseño de Experimentos” Segunda Edición – McGraw Hill.
Montgomery, Douglas. “Diseño y Análisis de Experimentos” Segunda Edición – Limusa Willey.



Sobre el autor:

Nombre: Carlos Alberto Cuesta Muñoz
Cargo: Gerente Centro de Ingeniería de la Calidad
e-mail: ccuesta@cicalidad.com

Títulos académicos:

Estadístico – Universidad del Valle – Colombia
Magíster en Administración – Universidad del Valle – Colombia
Certified Quality Engineer – American Society for Quality
Experiencia laboral de 12 años en áreas de planeación y logística en industria metalmecánica y de alimentos.

Consultor empresarial en áreas de mejoramiento continuo, proyectos Six Sigma y aplicación de métodos estadísticos en empresas como:

Banco de Occidente – División Banca Empresarial
Carvajal s.a. – División Carpak
Colombina del Cauca
Carbones del Cerrejón
Parquesoft
Open Systems
Laboratorios Baxter
Tecnoquímicas S.A.
Servicio Occidental de Salud (S.O.S)
SAB Miller – Bavaria
Polymer Group Inc. – PGI Colombia
Cadbury ADAMS Colombia
Familia Sancela del Pacífico

Docente Universitario en pregrado y postgrado:
Universidad ICESI - Cali - Colombia
Pontificia Universidad Javeriana - Cali – Colombia
Universidad del Valle - Cali – Colombia
Universidad Tecnológica de Pereira – Pereira – Colombia

Centro de Ingeniería de la Calidad - www.cicalidad.com
Avenida 3A norte #24N-24 Cali – Colombia. Teléfono: (572) 4892679