

# Fuzzy-Control-Chart Methodology for Assessing Specification Compliance in Cervical Cytology Sampling

J. Cogollo, M. Cogollo, and M. Arteaga

**Abstract**— Fuzzy control charts allow expanding and improving analysis of processes in the medical sampling. In cervical cytology sampling it is necessary to consider the process uncertainty, including analysis of imprecise data. This article proposes a methodology for assessing specification compliance of medical sampling using  $p$ -fuzzy control charts, which allow considering data inaccuracy, unlike the traditional control charts. This methodology is carried out on four steps: (i) Definition of variable and fuzzy specification limit, (ii) Fuzzification of the process data, (iii) Design of rules for fuzzy specification compliance, and (iv) Determination of fuzzy specification compliance. The  $p$ -fuzzy control chart was applied for assessing results of cervical cytology sampling and it allowed to adequately identify specification compliance and warnings of non-compliance. Future work is integration of this methodology with other inference systems that allow quality improvement in the medical sampling area.

**Index Terms**—Cervical Cancer, Cytology Sampling, Fuzzy Specification Compliance,  $p$ -Fuzzy Control Chart.

## I. INTRODUCCIÓN

El cáncer cervicouterino (CaCu) es un problema de salud pública global ya que es la tercera neoplasia maligna más frecuente en mujeres en el mundo [1] y se estiman 569000 casos nuevos cada año, de los cuales el 80% corresponde a países en vías de desarrollo [2]. El CaCu es una enfermedad prevenible cuando su diagnóstico es oportuno y se realiza un tratamiento adecuado de las lesiones premalignas, por lo que en la actualidad hay múltiples investigaciones sobre su prevención y tratamiento [3] - [5].

En el caso de Colombia, el CaCu es la segunda causa de muerte por cáncer entre mujeres de 30 a 59 años, estimándose una incidencia de cerca de 5600 casos nuevos cada año, lo que equivale a 21.5 casos nuevos por cada 100000 habitantes [6]. A pesar de los desarrollos recientes para la detección de CaCu aplicando técnicas avanzadas como las pruebas de ADN [7] [8], la citología continúa siendo el principal método de identificación para reducir su incidencia y mortalidad [9], debido a que permite estudiar las células exfoliadas de la unión escamo columnar del cuello uterino, donde se ubica la zona de transformación origen de las neoplasias [10].

No obstante, la citología tiene limitaciones importantes y requiere el cumplimiento de ciertas condiciones para su realización, tales como no estar menstruando, no usar lubricantes o tratamientos tópicos y no haber tenido relaciones sexuales una semana antes [11]. La principal limitación está asociada a los falsos negativos y positivos que se presentan, ya que cerca de la mitad de los frotis son falsos negativos [12].

Los falsos negativos son el principal problema del tamizaje, debido a que las mujeres no diagnosticadas pierden la oportunidad de tener la atención médica necesaria y siguen teniendo el riesgo de desarrollar el CaCu [13]. Los falsos negativos pueden ocurrir cuando se hace una inadecuada toma de muestras o una detección/interpretación errada de los resultados en los laboratorios de los sistemas de salud, o una incorrecta preparación o suministro de información por parte de la paciente [14] [15]. Al respecto, se ha identificado que aproximadamente dos tercios de los falsos negativos son el resultado de un error de muestreo y el tercio restante es el resultado de un error de detección [16].

Dado que los errores en las tomas de muestras conllevan a frotis cervicales inadecuados que no pueden analizarse y pueden causar angustia a las mujeres y también pueden ser causas generadoras de desperdicio de recursos de las clínicas y los laboratorios clínicos, se hace necesario que los profesionales que toman las muestras, las procesan y emiten el resultado de la citología sean idóneos, es decir, estén capacitados y entrenados para dichos procesos, y así poder implementar efectivos programas de detección temprana [17] [18].

En ese sentido, se requieren implementar programas de monitoreo y control del muestreo de las citologías con el fin de prevenir la ocurrencia de falsos positivos o negativos, tomar decisiones de mejora del proceso y verificar el cumplimiento de especificaciones de calidad. Se requiere del uso de herramientas que faciliten una gestión eficiente de planeación, organización, ejecución y control, que permita detectar a tiempo las fallas y asegurar la calidad en la citología.

Los laboratorios clínicos han usado las gráficas de control para monitorear el desempeño de ensayos clínicos y evaluar la confiabilidad de sus resultados. Levey y Jennings [19] incursionaron en el uso de gráficas de control para evaluar el desempeño de ensayos clínicos, adaptando los procedimientos de control de calidad industrial empleados por Shewhart [20]. Timothy et al [21] aplicaron las gráficas de control para monitorear los procesos de mejora de la prevención de infecciones. Lawson et al [22] utilizaron el control estadístico

J. Cogollo, Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM, Medellín, Colombia (e-mail: juancogollo@itm.edu.co).

M. Cogollo, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia (e-mail: myladiacogollo@correo.unicordoba.edu.co).

M. Arteaga, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia (e-mail: marteaga@cafitec.edu.co).

de procesos para medir y mejorar la calidad de la atención clínica. Harrison et al [18] usaron gráficas de control  $p$  tipo Shewart para analizar la variación de la proporción de frotis cervicales inadecuados. Sin embargo, los gráficos de control que se han venido aplicando en el área de la salud, derivan en una clasificación “conforme” o “no conforme” de la muestra realizada, desconociendo la imprecisión que puede surgir por la intervención humana, tanto en la toma de muestras como en la interpretación de resultados.

Adicionalmente, la toma de muestras de las citologías cervicales se realiza en diferentes sedes y con diferentes personas. Esto puede dar por resultado una heterogeneidad en la calidad de los servicios otorgados y hace posible vincular la imprecisión de la adecuación del frotis vaginal con factores relacionados con la estructura y materiales para la toma de la muestra y, sobre todo, con las habilidades y conocimientos propios del prestador del servicio [23].

Lo anterior conlleva a que el problema analizado en este trabajo no deba estudiarse en términos absolutos con técnicas aplicables a situaciones ciertas o aleatorias, determinando una pertenencia o no, como en la teoría clásica de conjuntos [24]. Ante esto, es posible integrar la lógica difusa, con el fin de mejorar los resultados derivados del control de procesos e incluir en el análisis los datos vagos e imprecisos.

La lógica difusa busca describir y formalizar la realidad empleando modelos flexibles que interpreten el comportamiento y las relaciones humanas y expresar el conocimiento de forma más natural, lo cual hace que muchos problemas de ingeniería y de toma de decisiones se simplifiquen significativamente [25]. Igualmente, permite construir una estructura matemática para manipular datos inciertos o vagos, para los cuales la pertenencia a un conjunto tiene grados entre “verdadero” y “falso”, es decir, puede tomar un valor real en el intervalo  $[0, 1]$ .

Por lo tanto, en este artículo se desarrolla una metodología para la aplicación de gráficas de control  $p$  difusas para analizar el cumplimiento de especificaciones considerando datos difusos en los parámetros de estas. La metodología propuesta fue aplicada en una Institución Prestadora de Salud (IPS) con diferentes sedes en una ciudad de Colombia y se verificó su adecuación para la verificación del cumplimiento de especificaciones en el desempeño del proceso de toma de muestras de citologías con elementos más cercanos a la realidad del proceso.

La organización del artículo es la siguiente: en la Sección II se describe el marco teórico sobre gráficas de control tradicionales y gráficas de control  $p$  difusas. En la Sección III se describen los pasos de la metodología desarrollada y en la Sección IV, se muestran y discuten los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología. Finalmente, se presentan las conclusiones y trabajos futuros en la Sección V.

## II. GRÁFICAS DE CONTROL Y LÓGICA DIFUSA

En esta sección se muestran los fundamentos teóricos de las gráficas de control y la lógica difusa y algunos trabajos previos donde se integran para el control de la calidad en el sector salud. También, se presenta el desarrollo analítico de

las gráficas de control  $p$  difusas.

### A. Conceptualización de Gráficas de Control

Las gráficas de control sirven para observar y analizar el comportamiento de un proceso a través del tiempo, comparando el valor de cada muestra con los límites de especificación dados y/o con los límites de control estimados a partir de las medidas de tendencia central y variabilidad de la característica de calidad de interés.

Dependiendo del tipo de datos asociados al proceso, las gráficas de control tradicionales se dividen en dos grandes grupos: gráficas de control para variables ( $\bar{X}$ - $R$ ,  $\bar{X}$ - $s$ , individuales) y para atributos ( $p$ ,  $np$ ,  $c$  y  $u$ ) [26]. Las gráficas de control para variables se aplican a características de calidad de naturaleza continua, mientras que las gráficas para atributos son utilizadas para monitorear características discretas [27]. Estas herramientas forman parte del control estadístico de procesos y tienen como objetivo fundamental mejorar la calidad y reducir los costos [28].

Hasta el momento, la aplicación más extendida de las gráficas de control ha sido en el sector industrial [29]. Sin embargo, recientemente se han desarrollado aplicaciones en otros sectores como el de la salud, para monitorear los procesos clínicos o la atención médica. Por ejemplo, en [30] se utilizaron gráficas de control para monitorear las muestras de un laboratorio antidopaje. En [31] aplicaron gráficas de control en la producción de componentes de la sangre.

En este trabajo se aplica la gráfica  $p$  o de proporción de defectuosos, dado que se requiere analizar el comportamiento de la proporción de muestras no viables para citologías en diferentes sedes y en un periodo de tiempo determinado. Para la elaboración de la gráfica  $p$ , de cada lote, pedido o parte de la producción, se toma una muestra  $n_i$  de artículos que son inspeccionados y se cuenta el número de defectuosos ( $d_i$ ) de la misma. Luego, se grafica la proporción  $p_i$  de unidades defectuosas ( $p_i = d_i/n_i$ ).

El límite de control superior ( $LCS$ ), la línea central ( $LC$ ) y el límite de control inferior ( $LCI$ ), cuando el tamaño de muestra es variable, se calculan de la siguiente forma [26]:

$$LCS = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}} \quad (1)$$

$$LC = \bar{p} \quad (2)$$

$$LCI = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}} \quad (3)$$

donde  $\bar{p}$  es la proporción promedio de artículos defectuosos en el proceso.

En la mayoría de programas de monitoreo de procesos estandarizados es fundamental garantizar el cumplimiento de las especificaciones. Luego, los límites de control de (1), (2) y (3) de la gráfica  $p$  se remplazan por el límite de especificación superior ( $LES$ ), la especificación objetivo ( $EO$ ) y el límite de especificación inferior ( $LEI$ ), respectivamente. Estos son definidos por la empresa en la etapa de diseño del proceso, realizando estudios de capacidad de proceso o son requisitos legales o contractuales.

### B. Gráficas de Control Difusas

El resultado de la medición de una característica de calidad de un proceso está frecuentemente sujeto a imprecisiones, debido a sistemas de medición, errores humanos o factores ambientales no controlables. El tratamiento de esta incertidumbre en la construcción de gráficas de control se realiza mediante la aplicación de la teoría de conjuntos difusos.

La teoría de conjuntos difusos permite estudiar conceptos vagos y de probabilidad separados de la incertidumbre aleatoria o probabilística [32]. En dicha teoría se considera que los datos se pueden expresar como un conjunto difuso, es decir, como un rango de valores cuyos elementos tienen un peso asignado en el intervalo unitario [0, 1], a través de una función de pertenencia o membresía.

La forma de la función de pertenencia puede ser lineal (triangular o trapezoidal) o no lineal (gaussiana, campana generalizada, gamma, etc.) dependiendo del sistema [33]. La membresía representa el grado en que la opinión de los expertos coloca un elemento en el conjunto, que puede pertenecer a más de un conjunto con diferentes grados de membresía, lo que permite una transición a lo largo de conjuntos sucesivos [34].

Mediante la integración de la teoría de las gráficas de control tradicionales y la lógica difusa se obtienen las denominadas gráficas de control difusas, las cuales también se clasifican en gráficas para variables y para atributos [35]. Si bien el tema de las gráficas difusas es mucho más reciente que el de las gráficas de control tradicionales, hay aportes en la literatura de trabajos relacionados.

En [36] se desarrollaron gráficas de control con números difusos para procesos donde las tasas de calidad son obtenidas a partir de juicios de expertos. En [37] se realizó un análisis para la construcción de gráficas de control difusas para variables, teniendo en cuenta números difusos triangulares y trapezoidales, simétricos y asimétricos. En [38] se desarrolló una propuesta para la construcción de gráficos de control difusos  $\bar{X}$ -R y  $\bar{X}$ -s utilizando la técnica de los  $\alpha$ -cortes, incrementando la flexibilidad de los límites de control tradicionales.

En [39] se desarrolló una gráfica de control  $\bar{X}$ -s<sup>2</sup> difusa para explicar la vaguedad de las observaciones, utilizando los métodos de transformación de rango medio difuso, media difusa, mediana difusa y moda difusa. Asimismo, en [40] se propone un gráfico de control  $\bar{X}$ -R para controlar el promedio del proceso y su variación ante la presencia de datos difusos.

En [41] se desarrolló una gráfica de control  $u$  difusa para el monitoreo de un proceso industrial, facilitando el tratamiento de la ambigüedad en la etapa de inspección de defectos en el producto y con un desempeño superior en comparación con una gráfica  $u$  tradicional. Finalmente, en revisiones de literatura realizadas sobre el uso de gráficas de control difusas en el monitoreo y análisis de procesos, se ha establecido que, a pesar de la tendencia creciente de trabajos en el área, se requiere aportes sobre criterios de desempeño, funciones de pertenencia y gráficas de control para atributos [42], dado que

la mayoría de los trabajos (75% a 80%, aproximadamente) han sido de gráficas de control difusas para variables [43].

Se concluye de estos trabajos previos que es posible integrar los fundamentos de las gráficas de control con la teoría de lógica difusa y su aplicación en el control de la calidad de procesos para el tratamiento de la incertidumbre asociada a los factores que influyen en la calidad de los productos. Si bien en la revisión de trabajos previos de gráficas de control difusas no se encontraron aplicaciones en la evaluación de la toma de muestras de citologías cervicales, ellos sirven como un referente conceptual para este trabajo en lo concerniente al tratamiento de las variables, determinación de parámetros y análisis de resultados.

### C. Gráfica de Control $p$ Difusa

La gráfica de control  $p$  difusa es la utilizada en este estudio, dado que sirve para monitorear la proporción de defectuosos (muestras no útiles) por sede, cuando estas últimas difieren en tamaño y cuando se considera la incertidumbre de los datos.

Considere que se tienen  $m$  muestras difusas, cada una con un tamaño de muestra distinto, denotadas por  $n_1, n_2, \dots, n_m$ . Se define para la  $j$ -ésima muestra difusa, el número difuso de unidades no conformes  $\widetilde{d}_{ij} = (d_{aj}, d_{bj}, d_{cj})$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$ . De modo que la fracción de productos no conformes se puede expresar por el número triangular difuso [44]:

$$\widetilde{p}_{ij} = (p_{aj}, p_{bj}, p_{cj}); j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

donde  $p_{aj} = \frac{d_{aj}}{n_j}$ ,  $p_{bj} = \frac{d_{bj}}{n_j}$ , y  $p_{cj} = \frac{d_{cj}}{n_j}$ .

Dado que el objetivo de este trabajo es analizar el desempeño del proceso desde la perspectiva del cumplimiento de una proporción máxima de muestras no conformes, se establece un límite de especificación superior difuso:

$$\widetilde{LES} = (LES_1, LES_2, LES_3) \quad (5)$$

donde  $LES_1$ ,  $LES_2$  y  $LES_3$  son los parámetros de un número triangular difuso, que tiene la propiedad  $LES_1 < LES_2 < LES_3$ .

### D. Condiciones de Cumplimiento de Especificación en la Gráfica $p$ Difusa

La determinación del cumplimiento de la especificación en las gráficas  $p$  difusas puede realizarse a través del enfoque de la transformación/concreción de los datos o aplicando un enfoque difuso directo [45]. En el método de transformación, se calcula el valor de la mediana difusa de cada muestra, el cual se compara con la especificación de interés. En el enfoque difuso directo no es necesario transformar los datos en números concretos y el cumplimiento de la especificación se basa en el cálculo del porcentaje de área de la muestra difusa que permanece en el interior de la especificación difusa.

En este trabajo se utiliza el enfoque difuso directo debido a que las muestras difusas y el límite de especificación no se transforman en datos representativos, lo cual evita la pérdida de propiedades de los datos analizados [46] [47]. Cuando la muestra está totalmente por debajo del  $\widetilde{LES}$  se dice que

“cumple”. Si una muestra difusa está totalmente por encima del  $\overline{LES}$  se dice que “no cumple”. De lo contrario, una muestra está parcialmente incluida en el  $\overline{LES}$ .

En este caso, si el porcentaje del área que está dentro del límite de especificación difuso es igual o mayor a un valor predefinido, entonces el proceso puede ser aceptado como “no cumple” o “casi no cumple”. De lo contrario, se puede afirmar que “cumple” o “casi cumple”. También se pueden definir diferentes intervalos para la toma de decisión de cumplimiento de la especificación difusa.

### III. METODOLOGÍA

La metodología propuesta consta de cuatro pasos: (i) Determinación de variable y límite de especificación difuso, (ii) Fuzificación de los datos del proceso, (iii) Elaboración de reglas para cumplimiento de la especificación difusa, y, (iv) Determinación de cumplimiento de la especificación difusa.

#### A. Determinación de Variable y Límite de Especificación Difuso

En este trabajo es de interés analizar el desempeño de un proceso desde la perspectiva del cumplimiento de una proporción máxima de productos no conformes (PNC) de la variable de interés. Así, el límite de especificación corresponde a la proporción máxima tolerada, definida por la organización como el objetivo de desempeño en el marco de un proceso de mejoramiento de la calidad, aplicando (5).

#### B. Fuzificación de los Datos del Proceso

La aplicación de la gráfica de control  $p$  difusa requiere de  $m$  muestras difusas, como se define en (4). En caso de tener disponible  $m$  medidas concretas  $d_{bj}; j = 1, \dots, m$ , se debe fuzificar los datos de la proporción de muestras no conformes, considerando una tolerancia de  $\pm k\%$  para cada una de dichas mediciones, tal como se indica en [44].

#### C. Elaboración de Reglas para Cumplimiento de la Especificación Difusa

En las gráficas  $p$  tradicionales el cumplimiento de las especificaciones es una decisión dicotómica luego de comparar el valor de cada muestra con el límite de especificación: Si  $p_i \leq LES$ , la muestra cumple con la especificación; si  $p_i > LES$ , no cumple.

En el enfoque difuso se requiere la construcción de un conjunto de reglas adicionales. Para ello, se define el índice de cumplimiento de especificaciones ( $CE_{pj}$ ) que representa la proporción de área de la muestra difusa al interior del límite de especificación difuso y, además, se establecen las etiquetas lingüísticas “cumple”, “casi cumple”, “casi no cumple” y “no cumple” para caracterizar la transición sucesiva entre grados de cumplimiento de la especificación.

Considerando los parámetros del límite de especificación superior difuso que se debe satisfacer ( $LES_1, LES_2, LES_3$ ) y de la muestra difusa ( $p_{aj}, p_{bj}, p_{cj}$ ), se plantean las siguientes reglas de decisión (Fig. 1):

- Regla 1 (R1): cuando la proporción difusa de muestras no

conformes es totalmente inferior al límite de especificación superior difuso. Si  $p_{cj} < LES_1$ , entonces  $CE_{pj} = 1$  y el proceso “cumple” con la especificación.

- Regla 2 (R2): cuando la proporción difusa de muestras no conformes está totalmente por encima del límite de especificación superior difuso. En este caso,  $p_{aj} > LES_3$ , de modo que  $CE_{pj} = 0$  y se puede inferir que el proceso “no cumple” con la especificación.
- Regla 3 (R3): se da cuando una fracción de la proporción difusa de muestras no conformes es superior a  $LES_1$ , es decir,  $(LES_1 < p_{cj} < LES_2) \wedge (p_{aj} < LES_1)$ . De modo que el proceso “cumple” o “casi cumple” con la especificación, dependiendo del valor de  $CE_{pj}$ .
- Regla 4 (R4): En este caso, una fracción de la proporción difusa de muestras no útiles es inferior a  $LES_3$ . Se da cuando  $(p_{cj} > LES_3) \wedge (LES_2 < p_{aj} < LES_3)$  y así, el proceso “no cumple” o “casi no cumple” con la especificación, dependiendo del valor de  $CE_{pj}$ .
- Regla 5 (R5): cuando la proporción difusa de muestras no útiles está totalmente entre  $LES_1$  y  $LES_2$ . Si  $(p_{cj} < LES_2) \wedge (p_{aj} > LES_1)$ , el proceso “cumple” o “casi cumple” con la especificación, dependiendo del valor de  $CE_{pj}$ .
- Regla 6 (R6): En este caso, la proporción difusa de muestras no útiles está totalmente entre  $LES_2$  y  $LES_3$ . Si  $(p_{cj} < LES_3) \wedge (p_{aj} > LES_2)$ , el proceso “no cumple” o “casi no cumple” con la especificación, dependiendo del valor de  $CE_{pj}$ .
- Regla 7 (R7): Se da cuando la proporción difusa de muestras no útiles está entre  $LES_1$  y  $LES_3$ , es decir,  $(p_{cj} > LES_2) \wedge (p_{aj} > LES_1) \wedge (p_{bj} < LES_2)$ . En este caso, el proceso “cumple” o “casi cumple” con la especificación, dependiendo del valor de  $CE_{pj}$ .
- Regla 8 (R8): cuando la proporción difusa de muestras no útiles está entre  $LES_1$  y  $LES_3$ . Si  $(p_{cj} < LES_3) \wedge (p_{aj} < LES_2) \wedge (p_{bj} > LES_2)$ , el proceso “no cumple” o “casi no cumple” con la especificación, dependiendo del valor de  $CE_{pj}$ .

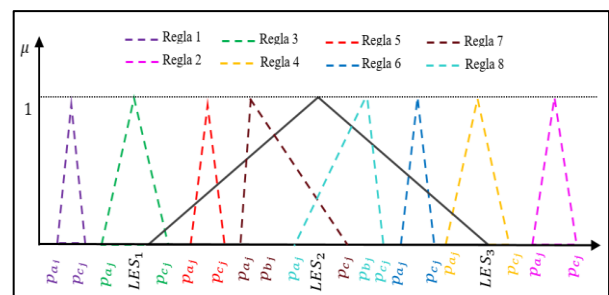


Fig. 1. Reglas difusas desarrolladas.

#### D. Determinación de Cumplimiento de la Especificación Difusa

La determinación del cumplimiento del límite de

especificación superior difuso establecido se basa en las reglas anteriormente definidas y en el valor de  $CE_{pj}$  calculado como se muestra en (6). La determinación de  $CE_{pj}$  se basa en las propiedades de normalidad y convexidad de los números triangulares difusos de la muestra y del límite de especificación y usa la T-norma  $max$  para aproximar el operador de implicación Larsen. Esto es, al menos un elemento  $x$  del universo tiene un grado de pertenencia de 1 y, también, los valores de los grados de pertenencia son estrictamente monotónicamente crecientes y, luego, estrictamente monotónicamente decrecientes con valores crecientes de elementos en el universo. Así,  $CE_{pj}$  corresponde al máximo valor de pertenencia que toma el conjunto difuso resultante de la intersección entre el límite difuso,  $\widetilde{LES}$ , y la muestra difusa  $\widetilde{p}_{ij}$ .

$$CE_{pj} = \begin{cases} 1; \text{cuando R1} \\ 0; \text{cuando R2} \\ \frac{p_{c_j} - LES_1}{(LES_2 - LES_1 + p_{c_j} - p_{b_j})}; \text{cuando R3} \\ \frac{LES_3 - p_{a_j}}{(LES_3 - LES_2 + p_{b_j} - p_{a_j})}; \text{cuando R4} \\ \max \left\{ \frac{p_{c_j} - LES_1}{(LES_2 - LES_1 + p_{c_j} - p_{b_j})}, \frac{p_{b_j} - LES_1}{(LES_2 - LES_1 + p_{b_j} - p_{a_j})} \right\}; \text{cuando R5, R7} \\ \max \left\{ \frac{LES_3 - p_{a_j}}{(LES_3 - LES_2 + p_{b_j} - p_{a_j})}, \frac{LES_3 - p_{c_j}}{(LES_3 - LES_2 + p_{c_j} - p_{b_j})} \right\}; \text{cuando R6, R8} \end{cases} \quad (6)$$

Luego, se toma la decisión final sobre el cumplimiento de la especificación del proceso dependiendo de la regla aplicable y el valor calculado de  $CE_p$ , con base en lo definido en la Tabla I.

TABLA I  
CRITERIOS PARA DECISIÓN DE CUMPLIMIENTO  
DE ESPECIFICACIÓN

Regla	Criterio	Decisión
R1	$CE_{pj} = 1$	Cumple
R2	$CE_{pj} = 0$	No cumple
R3, R5, R7	$0 < CE_{pj} \leq 0.50$	Cumple
	$0.50 < CE_{pj} \leq 1.0$	Casi cumple
R4, R6, R8	$0.50 < CE_{pj} \leq 1.0$	Casi no cumple
	$0 < CE_{pj} \leq 0.50$	No cumple

Finalmente, con base en los resultados de las etapas previas, se analiza el comportamiento del proceso en cuanto al cumplimiento o no de la especificación, y la identificación de señales de alerta que permitan tomar decisiones tempranas de mejora de la calidad.

#### IV. RESULTADOS

En los siguientes apartados se presentan los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología descrita en la sección anterior para el análisis de los resultados del muestreo de citologías cervicales de 50 sedes de una IPS ubicadas en diferentes sectores de una ciudad de Colombia.

En este trabajo se considera la incertidumbre de los datos de los productos no conformes (PNC) en cada una de las

sedes, en dos sentidos: (i) Pueden presentarse errores en la toma de la muestra de la citología, ya que depende de la experticia de los profesionales que intervienen y, además, estos varían entre sedes y rotan en el tiempo y, (ii) La calidad de la muestra puede variar por el cumplimiento o no de las condiciones que deben seguir las pacientes para la realización de la citología.

Adicionalmente, se hace una comparación de los resultados obtenidos con las gráficas  $p$  difusa y tradicional, evidenciando el adecuado funcionamiento de la metodología propuesta para el análisis de este tipo de procesos en el sector salud.

#### A. Determinación de Variable y Límite de Especificación Difuso

Dado que un objetivo fundamental en la evaluación de calidad del proceso de toma de muestras para citologías cervicouterinas es evitar los falsos negativos, la variable de interés es la cantidad de muestras de citologías cervicouterinas inadecuadas o mal tomadas en las sedes de la IPS, la cual conlleva a considerar como parámetro de interés a la proporción de muestras no útiles en cada sede en el periodo de tiempo determinado ( $p_i$ ):

$$p_i = \frac{\text{Número de muestras no útiles}}{\text{Total de muestras}} \quad (7)$$

Mediante (7) se recopila aquellas muestras que no son idóneas para el diagnóstico y deben repetirse en cada sede, ocasionado sobrecostos al laboratorio, inconformidad en las pacientes y que pueden afectar la detección temprana de cáncer en algunos casos.

Por otra parte, el límite de especificación superior corresponde a la proporción máxima de muestras no útiles de frotis cervicales ( $LES$ , en la gráfica tradicional) establecida por la IPS en el contexto de su programa de mejoramiento de la calidad. Así, se determinó un  $LES=0.20$  para datos concretos. Con base en este, se estableció el siguiente límite de especificación superior difuso:

$$\widetilde{LES} = (LES_1, LES_2, LES_3) = (0.10, 0.15, 0.20) \quad (8)$$

#### B. Fuzificación de los Datos

La incertidumbre y aleatoriedad del proceso se incorpora a través de la fuzificación de los datos de proporción de muestras no útiles en cada sede, considerando una tolerancia de  $\pm 5\%$ . En la Tabla II se muestra los resultados de la transformación del dato concreto inicial en un número triangular difuso ( $p_{a_j}, p_{b_j}, p_{c_j}$ ), para cada una de las  $m$  sedes de procedencia.

#### C. Determinación de Cumplimiento de la Especificación Difusa

Finalmente, con base en los resultados de las etapas previas, se analiza el comportamiento del proceso de toma de muestras de citologías en cuanto al cumplimiento o no de la especificación y la identificación de señales de alerta que permitan tomar decisiones tempranas de mejora de la calidad. La decisión sobre el grado de cumplimiento de la

especificación de interés se basa en el conjunto de reglas descritas en la Sección III.C, las cuales comprenden los

TABLA II

DATOS DIFUSOS DE PROPORCIÓN DE MUESTRAS DE CITOLOGÍAS NO ÚTILES

<i>m</i>	<i>P<sub>aj</sub></i>	<i>P<sub>bj</sub></i>	<i>P<sub>cj</sub></i>	<i>m</i>	<i>P<sub>aj</sub></i>	<i>P<sub>bj</sub></i>	<i>P<sub>cj</sub></i>
1	0.2759	0.2904	0.3049	26	0.1063	0.1119	0.1175
2	0.1476	0.1554	0.1632	27	0.2493	0.2625	0.2756
3	0.4026	0.4238	0.4450	28	0.0787	0.0829	0.0870
4	0.3687	0.3882	0.4076	29	0.2221	0.2337	0.2454
5	0.1375	0.1448	0.1520	30	0.0760	0.0800	0.0840
6	0.3172	0.3339	0.3506	31	0.2077	0.2186	0.2295
7	0.1656	0.1743	0.1830	32	0.1065	0.1121	0.1177
8	0.4579	0.4820	0.5060	33	0.1076	0.1133	0.1190
9	0.1610	0.1695	0.1780	34	0.1531	0.1611	0.1692
10	0.1729	0.1820	0.1911	35	0.2415	0.2542	0.2669
11	0.2506	0.2638	0.2770	36	0.1787	0.1881	0.1975
12	0.1297	0.1366	0.1434	37	0.3560	0.3747	0.3935
13	0.3463	0.3645	0.3828	38	0.2311	0.2433	0.2554
14	0.2057	0.2165	0.2273	39	0.1492	0.1571	0.1650
15	0.0960	0.1010	0.1061	40	0.1124	0.1184	0.1243
16	0.0938	0.0988	0.1037	41	0.3299	0.3473	0.3647
17	0.1400	0.1474	0.1548	42	0.1106	0.1164	0.1222
18	0.1800	0.1895	0.1990	43	0.0505	0.0532	0.0558
19	0.1565	0.1647	0.1730	44	0.2821	0.2970	0.3118
20	0.2209	0.2326	0.2442	45	0.2249	0.2368	0.2486
21	0.2725	0.2869	0.3012	46	0.0939	0.0989	0.1038
22	0.2744	0.2889	0.3033	47	0.0687	0.0723	0.0760
23	0.3832	0.4034	0.4236	48	0.2666	0.2806	0.2946
24	0.2397	0.2523	0.2649	49	0.2525	0.2658	0.2791
25	0.3335	0.3511	0.3686	50	0.1693	0.1782	0.1871

posibles casos de inclusión o exclusión parcial y total de cada muestra difusa en el límite de especificación difuso.

En la Tabla III se muestran las decisiones de cumplimiento de la especificación superior, contrastando los resultados del enfoque propuesto en este trabajo con el enfoque de la gráfica *p* tradicional. La primera columna corresponde a la sede, la segunda columna contiene la regla difusa que aplica, la tercera columna contiene el valor calculado de *CE<sub>pi</sub>*, y las columnas cuarta y quinta muestran la decisión del grado de cumplimiento para los enfoques difuso y tradicional, respectivamente.

Se encuentra que hay un grado de similitud de la decisión final en el 74% de los casos (27 sedes) y se llega a decisiones distintas en el 26% de ellos (13 sedes, celdas con fondo gris). En la gráfica tradicional el porcentaje de cumplimiento de la especificación es del 50% (25 sedes), mientras que en la gráfica difusa es del 24% (12 sedes).

El uso de números concretos en la gráfica *p* tradicional puede ocasionar una pérdida de información en el tratamiento de los datos y llevar a decisiones no adecuadas sobre el comportamiento del proceso. Este caso se evidencia en las sedes 10, 18 y 36. Según el enfoque tradicional, estas sedes cumplen con la especificación dado que están cerca del LES definido, sin sobrepasarlo. Sin embargo, en el enfoque de gráfica *p* difusa desarrollado, considerando la incertidumbre del proceso, se llega a la conclusión que estas sedes no cumplen con la especificación dada.

Las etiquetas lingüísticas “casi cumple” y “casi no cumple” de esta metodología sirven como una señal de alerta para la toma de decisiones orientadas a evitar el incumplimiento de la especificación. Por ejemplo, en el caso de las procedencias 2, 7, 9, 19, 34, 39 y 50 hay una señal de alerta mayor. Si bien en la gráfica tradicional se llega a la conclusión de que cumplen

TABLA III  
RESULTADOS DE GRÁFICA DIFUSA VERSUS GRÁFICA TRADICIONAL

<i>m</i>	Regla	<i>CE<sub>pi</sub></i>	Decisión gráfica <i>p</i> difusa	Decisión gráfica <i>p</i> tradicional
1	2	0	No cumple	No cumple
2	8	0.91	Casi no cumple	Cumple
3	2	0	No cumple	No cumple
4	2	0	No cumple	No cumple
5	7	0.91	Casi cumple	Cumple
6	2	0	No cumple	No cumple
7	6	0.59	Casi no cumple	Cumple
8	2	0	No cumple	No cumple
9	6	0.67	Casi no cumple	Cumple
10	6	0.46	No cumple	Cumple
11	2	0	No cumple	No cumple
12	5	0.76	Casi cumple	Cumple
13	2	0	No cumple	No cumple
14	2	0	No cumple	No cumple
15	3	0.11	Cumple	Cumple
16	3	0.07	Cumple	Cumple
17	7	0.95	Casi cumple	Cumple
18	6	0.33	No cumple	Cumple
19	6	0.75	Casi no cumple	Cumple
20	2	0	No cumple	No cumple
21	2	0	No cumple	No cumple
22	2	0	No cumple	No cumple
23	2	0	No cumple	No cumple
24	2	0	No cumple	No cumple
25	2	0	No cumple	No cumple
26	5	0.31	Cumple	Cumple
27	2	0	No cumple	No cumple
28	1	1	Cumple	Cumple
29	2	0	No cumple	No cumple
30	1	1	Cumple	Cumple
31	2	0	No cumple	No cumple
32	5	0.32	Cumple	Cumple
33	5	0.34	Cumple	Cumple
34	6	0.81	Casi no cumple	Cumple
35	2	0	No cumple	No cumple
36	6	0.36	No cumple	Cumple
37	2	0	No cumple	No cumple
38	2	0	No cumple	No cumple
39	8	0.88	Casi no cumple	Cumple
40	5	0.43	Cumple	Cumple
41	2	0	No cumple	No cumple
42	5	0.40	Cumple	Cumple
43	1	1	Cumple	Cumple
44	2	0	No cumple	No cumple
45	2	0	No cumple	No cumple
46	3	0.07	Cumple	Cumple
47	1	1	Cumple	Cumple
48	2	0	No cumple	No cumple
49	2	0	No cumple	No cumple
50	6	0.52	Casi no cumple	Cumple

la especificación, con el enfoque difuso se identifica un riesgo de incumplimiento dado que se establece que “casi no cumplen” la especificación. Se requiere reforzar los controles y protocolos actuales de tomas de muestras o una intervención en aspectos como la capacitación y entrenamiento del personal con el fin de evitar el incremento de la proporción de muestras no útiles.

También, se identifica una señal de alerta menor en las procedencias 5, 12 y 17. En el enfoque tradicional se concluye que cumplen la especificación, sin embargo, en el enfoque difuso la decisión adecuada es que “casi cumplen”. Esto indica que, aunque el proceso actual en dichas sedes tiene un adecuado desempeño, se debe garantizar la aplicación rigurosa del procedimiento de toma de muestras establecido.

Estos resultados demuestran que hay diferencias importantes en el análisis de la toma de muestras de citologías cervicales usando los enfoques de gráficas *p* tradicional y difusa. Al contrario de los métodos tradicionales y los que utilizan transformaciones difusas, este enfoque es más flexible

ya que los parámetros de la gráfica no se transforman en valores representativos, evitando la pérdida de sus propiedades [30]. Otra ventaja del enfoque propuesto sobre el tradicional es la identificación de señales de alerta de pequeños cambios que pueden causar incumplimiento de la especificación, a partir de la categorización de los resultados en cuatro etiquetas lingüísticas y el desarrollo de un conjunto de reglas de decisión que amplían el enfoque binario tradicional.

Finalmente, a efectos ilustrativos y comparativos, en la Fig. 2 se muestran las gráficas  $p$  tradicional y difusa desarrolladas, las cuales complementan la discusión de resultados previa. En la gráfica tradicional, tanto el límite de especificación superior (LES) como la proporción de muestras no útiles en cada sede ( $p_i$ ) se representan en un valor concreto. En la gráfica difusa se muestran las líneas continuas que representan el límite de especificación superior difuso ( $LES_1, LES_2, LES_3$ ) y barras negras verticales que representan el intervalo de cada muestra difusa ( $p_{aj}, p_{bj}, p_{cj}$ ).

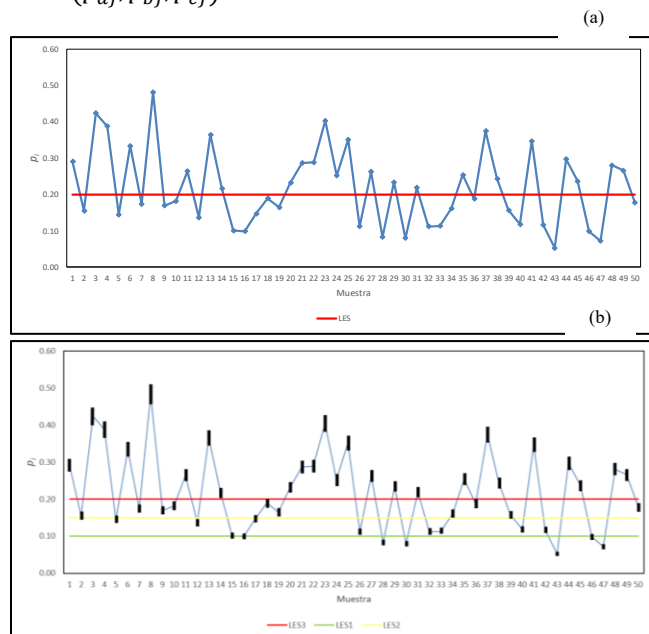


Fig. 2. Gráfica  $p$  tradicional (a) y gráfica  $p$  difusa (b).

## V. CONCLUSIONES

Las gráficas de control difusas permiten mejorar o ampliar las posibilidades de análisis del cumplimiento de las especificaciones de calidad, incorporando el manejo de la imprecisión de los datos y reflejando de mejor manera los comportamientos inciertos del proceso, a diferencia de las gráficas de control tradicionales. Por lo tanto, éstas pueden ser aplicadas en el control de la calidad en el sector salud para dar respuesta a la normativa de los sistemas de garantía de calidad de la atención en salud en diferentes países.

Los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología propuesta para el análisis de resultados de productos no conforme (proporción de muestras no útiles) demostraron que es posible aplicar el enfoque de las gráficas  $p$  difusas para el análisis de cumplimiento de objetivos de

desempeño en la toma de muestras de citologías cervicales, obteniendo mejores resultados en comparación con el enfoque de las gráficas tradicionales, dado que es posible identificar en forma oportuna alertas de incumplimiento que facilitan la pronta toma de decisiones para garantizar una mayor eficiencia en los programas de prevención de cáncer cervicouterino.

La metodología desarrollada constituye un nuevo enfoque para el monitoreo de procesos en el sector salud, dado que permite analizar en condiciones más cercanas a la realidad un proceso clínico crítico para los sistemas de salud, incorporando el tratamiento matemático de la imprecisión del proceso y determinar analíticamente el cumplimiento de especificaciones. Es necesario también afianzar la concientización de las pacientes sobre la importancia de la realización de la citología y del cumplimiento de las condiciones para su realización, de manera que pueda aportarse al manejo oportuno del CaCu como problema de salud pública en los ámbitos nacional y mundial

Este artículo es un producto de una investigación en curso cuyo objetivo principal es la aplicación de métodos avanzados de modelado en el control de la calidad de productos y procesos en sectores específicos. Los trabajos futuros están orientados a la integración de la metodología con otros sistemas de inferencia, el diseño de gráficas difusas multivariadas y la inclusión de técnicas de diseño óptimo de gráficas de control.

## REFERENCIAS

- [1] International Agency for Research on Cancer, "The Global Cancer Observatory (GCO)," [Online]. Available: <https://gco.iarc.fr/today/home>, Accessed on: Jun. 12, 2020.
- [2] Y. Li and C. Xu, "Human Papillomavirus-Related Cancers," In *Infectious Agents Associated Cancers: Epidemiology and Molecular Biology*, Q. Cai, Z. Yuan, and K. Lan (eds). Singapore: Springer, 2017, pp. 23-34. DOI: 10.1007/978-981-10-5765-6\_3.
- [3] S. Farhaly, *Uterine Cervical Cancer: Clinical and Therapeutic Perspectives*. New York, NY, USA: Springer Science, 2019, pp. 1-29.
- [4] J. G. De la Garza, F. Morales, and A. Meneses, *Cervical Cancer*. New York, NY, USA: Springer Science, 2017, pp. 19-33.
- [5] F. Borruto and M. De Ridder, *HPV and Cervical Cancer: Achievements in Prevention and Future Prospects*. New York, NY, USA: Springer Science, 2012, pp. 63-111.
- [6] Ministerio de Salud y Protección Social, *Encuesta Nacional de Demografía y Salud*. Bogotá, Colombia: MinSalud, 2015, pp. 124-134.
- [7] M. Campitelli, E. Jeannot, M. Peter, et al., "Human papillomavirus mutational insertion: Specific marker of circulating tumor DNA in cervical cancer patients," *PLoS One*, vol. 7, no. 8, pp. 1-5, 2012, DOI: 10.1371/journal.pone.0043393.
- [8] A. Cullen, R. Reid, M. Campion, and A. Lorincz, "Analysis of the Physical State of Different Human Papillomavirus DNAs in Intraepithelial and Invasive Cervical Neoplasm," *Microbiology*, vol. 65, no. 2, pp. 606-612, 1991.
- [9] S. Varela, "Citología Cervical," *Rev Med Hondur*, vol. 73, no. 3, pp. 131-136, 2005.
- [10] A. Swailes, C. Hossler, and J. Kesterson, "Pathway to the Papanicolaou smear: The development of cervical cytology in twentieth-century America and implications in the present day," *Gynecol. Oncol.*, vol. 154, no. 1, pp. 3-7, 2019, DOI: 10.1016/j.ygyno.2019.04.004.
- [11] A. Fajardo, F. Mendez, and L. Molina, "Factores que inciden en la no realización de la citología vaginal en las mujeres Bogotanas. 2008," *Investig. Andin.*, vol. 21, no. 12, pp. 61-69, 2010.
- [12] D. McCrory, D. Matchar, L. Bastian, et al., "Evaluation of cervical cytology," *Evid Rep Technol Assess (Summ)*, vol. 5, pp. 1-6, 1999.
- [13] L.G. Koss, "The Papanicolaou test for cervical cancer detection. A triumph and a tragedy". *J. Am Med Assoc.*, vol. 261, no. 5, pp.737-743, 1989, DOI: 10.1001/jama.1989.03420050087046.

- [14] P. Sobrevilla, E. Montseny, and E. Lerma, "A Fuzzy-based Automated Cells Detection System for Color Pap Smear Tests -FACSDS", in *Fuzzy Sets and Their Extensions: Representation, Aggregation and Models*, vol. 220, Studies in Fuzziness and Soft Computing, J. Kacprzyk, Ed., Berlin: Springer, 2008, pp. 657-674.
- [15] L. Villacorta, "Calidad de la toma de muestra de citología cervical reportadas en laboratorio del hospital regional San Juan de Dios del departamento de San Miguel. Marzo y abril 2009", M.S. tesis, Universidad Autónoma de Nicaragua, El Salvador, Nicaragua, 2010.
- [16] P. Vassilicos, "Management of suboptimal cytologic smears: persistent inflammatory smears", *Acta Cytol.*, vol. 42, no. 6, p. 1481, 1998.
- [17] E. Lazcano, P. Alonso, J. Ruiz, and M. Hernandez, "Recommendations for cervical cancer screening programs in developing countries. The need for equity and technological development," *Salud Publica de México*, vol. 45, no. 3, pp. 449-462, 2003, DOI: 10.1590/s0036-36342003000900020.
- [18] W.N. Harrison, M.A. Mohammed, M.K. Wall, and T. Marshall, "Analysis of inadequate cervical smears using Shewhart control charts", *BMC Public Health*, vol. 4, no. 1, 2004, pp. 1-6, DOI: 10.1186/1471-2458-4-25.
- [19] S. Levey and E. Jennings, "The use of Control Charts in the Clinical Laboratory," *American J. Clin. Pathol.*, vol. 20, no. 11, pp. 1059-1066, 1950, DOI: 10.1093/ajcp/20.11\_ts.1059.
- [20] R. Gómez, H. Moscoso, E. Retamales, and C. Valenzuela, *Guía técnica para control de calidad de mediciones cuantitativas en el laboratorio clínico*. Santiago de Chile, Chile: Instituto de Salud Pública, 2015, pp. 1-19.
- [21] T. Wiemken, S. Furmanek, R. Carrico, et al., "Process control charts in infection prevention: Make it simple to make it happen," *Am. J. Infect. Control*, vol. 45, no. 3, pp. 216-221, 2017, DOI: 10.1016/j.ajic.2016.09.021.
- [22] E. Lawson, B. Hall, N. Esnaola, and C. Ko, "Identifying Worsening Surgical Site Infection Performance: control charts versus risk-adjusted rate outlier status," *Am. J. Med. Qual.*, vol. 27, no. 5, pp. 391-397, 2012, DOI: 10.1177/1062860611428760.
- [23] S.O. Gutiérrez, D. Gaytán, J.M. Zamarripa, and Y. Terán, "Desempeño del personal de salud en la toma de las citologías cervicales: conocimientos teóricos y ejecución práctica", *Ginecol. Obstet. Mex.*, vol. 82, no. 5, pp. 9-19, 2014.
- [24] L. Lazzari, E. Machado, and R. Pérez, *Teoría de la decisión fuzzy*. Buenos Aires, Argentina: Macchi, 2000, pp. 14-36.
- [25] C. Briceño, *Redes neuronales artificiales, lógica difusa, geometría de fractales*. Cali, Colombia: Cenicafía, 2004, pp. 5-27.
- [26] D. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*. 8th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019, pp. 175-216.
- [27] H. Gutiérrez and R. De La Vara, *Control estadístico de la calidad y seis sigma*. 3rd ed. México: McGrawHill, 2013, pp. 172-235.
- [28] J. R. Evans and W. M. Lindsay, *Management for Quality and Performance Excellence*. 11th ed. New York, NY, USA: Thomson, 2020, pp. 253-308.
- [29] R. Aykroyd, V. Leiva, and F. Ruggeri, "Recent developments of control charts, identification of big data sources and future trends of current research," *Technol. Forecast. & Soc. Change*, vol. 144, pp. 221-232, 2019, DOI: 10.1016/j.techfore.2019.01.005.
- [30] D. Martínez, M. Correa, and R. Oropesa, "Aplicación de las cartas simples de control en el laboratorio antidoping," *Rev. CENIC Ciencias Químicas*, vol. 38, no. 2, pp. 307-310, 2007.
- [31] P. Pereira, J. Seghatchian, B. Caldeira, S. Xavier, and G. de Sousa, "Statistical methods to the control of the production of blood components: principles and control charts for variables," *Transfus. Apher. Sci.*, vol. 57, no. 1, pp. 132-142, 2018, DOI: 10.1016/j.transci.2018.02.022.
- [32] G. Klir and B. Yuan, *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and application*. New Jersey, NJ, USA: Prentice Hall, 1995, pp. 35-95.
- [33] A. Kaufmann and J. Gil, *Introducción de la teoría de los subconjuntos borrosos a la gestión de las empresas*. 3rd ed. Santiago de Compostela, España: Milladoiro, 1993, pp. 23-45.
- [34] W. Siler and J. Buckley, *Fuzzy expert systems and fuzzy reasoning*. New Jersey, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2005, pp. 29-83.
- [35] M. Gülbay and C. Kahraman, "An alternative approach to fuzzy control charts: Direct fuzzy approach," *Inf. Sci.*, vol. 177, no. 6, pp. 1463-1480, 2007, DOI: 10.1016/j.ins.2006.08.013.
- [36] C-B. Cheng, "Fuzzy process control: Construction of control charts with fuzzy numbers," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 154, no. 2, pp. 287-303, 2005, DOI: 10.1016/j.fss.2005.03.002.
- [37] Y-W. Hsieh, "On the construction of fuzzy control charts for variables," M.S. thesis, Department of Statistics, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, 2005.
- [38] S. Senturk and N. Erginel, "Development of fuzzy X-R and X-S control charts using  $\alpha$ -cuts," *Inf. Sci.*, vol. 179, pp. 1542-1551, 2009, DOI: 10.1016/j.ins.2008.09.022.
- [39] A. Faraz and A. Shapiro, "An application of fuzzy random variables to control charts," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 161, no. 20, pp. 2684-2694, 2010, DOI: 10.1016/j.fss.2010.05.004.
- [40] M. Shu and H. Wu, "Fuzzy X and R control charts: Fuzzy dominance approach," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 61, no. 3, pp. 676-685, 2011, DOI: 10.1016/j.cie.2011.05.001.
- [41] S. Fadaei and A. Pooya, "Fuzzy U control chart based on fuzzy rules and evaluating its performance using fuzzy OC curve," *The TQM Journal*, vol. 30, no. 3, pp. 232-247, 2018, DOI: 10.1108/TQM-10-2017-0118.
- [42] M. Naziri and S. Darestani, "A literature review investigation on quality control charts based on fuzzy logic," *International Journal of Productivity and Quality Management*, vol. 18, no. 4, pp. 474-498, 2016, DOI: 10.1504/IJPM.2016.077778.
- [43] M. Zavvar, A. Mirzazadeh, S. Salehian, and G-W. Weber, "A Literature Review on the Fuzzy Control Chart; Classifications & Analysis," *IJSOM*, vol. 1, no. 2, pp. 167-189, 2014, DOI: 110.22034/2014.2.03.
- [44] C. Kahraman and S. Ç. Onar, *Intelligent Techniques in Engineering Management theory and applications*, vol. 87. New York, NJ, USA: Springer Science, 2015, pp. 449-479.
- [45] M. Gülbay and C. Kahraman, "Development of fuzzy process control charts and fuzzy unnatural pattern analyses," *Comput. Stat. Data Anal.*, vol. 51, no. 1, pp. 434-451, 2006, DOI: 10.1016/j.csda.2006.04.031.
- [46] V. Chud, N. Martinez, and J. Osorio, "Gráficos difusos versus gráficos tradicionales para el control de procesos por atributos," *Rev. Mutis*, vol. 7, no. 1, pp. 34-47, 2017, DOI: 10.21789/22561498.1189.
- [47] E. Zapa and J. Cogollo, "Fuzzy-BSC Methodology for Decision Making in Indemnity Area of Insurance Companies," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 10, pp. 2539-2546, 2018, DOI: 10.1109/TLA.2018.8795133.



**Juan Cogollo** es Profesor Asociado en el Departamento de Calidad y Producción del Instituto Tecnológico Metropolitano-ITM, Medellín, Colombia. Obtuvo el grado de Magíster en Ingeniería Administrativa de la Universidad Nacional de Colombia en 2011. Sus actuales áreas de interés son control de la calidad avanzado, modelado difuso, medición del desempeño y gestión de la calidad en cadenas de suministro.



**Myladis Cogollo** es Profesora Asociada en el Departamento de Matemáticas y Estadística de la Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. Obtuvo el grado de Doctora en Ingeniería – Sistemas e Informática en 2016 y el grado de Magíster en Ciencias-Estadística en 2008, ambos de la Universidad Nacional de Colombia. Sus actuales áreas de interés son modelado predictivo, análisis de series de tiempo no lineales y ciencia de datos.





**Mónica Arteaga** es profesora en la Escuela de Ciencias de la Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. Obtuvo el grado de Magíster en Matemáticas Aplicadas de la Universidad EAFIT (Colombia) en 2017. Sus actuales áreas de interés son control estadístico de la calidad, análisis multivariado, lógica

difusa e inteligencia artificial.