

Universidad de Lima  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Carrera de Ingeniería Industrial



# **REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA EN EL USO DE FLUIDOS SUPERCRÍTICOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL**

Trabajo de investigación para optar el grado académico de bachiller en Ingeniería  
Industrial

**Agustina Micaela Burgos**

**Código 20160210**

**Asesor**

Luis Bedoya Jimenez

Lima – Perú  
Agosto de 2021





**SYSTEMATIC REVIEW OF LITERATURE  
ON THE USE OF SUPERCRITICAL FLUIDS  
IN THE TEXTILE INDUSTRY**

# TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VIII</b>
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemática observada.....	1
1.1 Objetivo de la investigación.....	2
1.2 Aspectos de la investigación .....	3
<b>CAPÍTULO II: MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>4</b>
2.1 Diseño de la investigación.....	4
2.2 Estrategias para la búsqueda de referencias bibliográficas .....	5
2.3 Método para la calificación de referencias a incluir en el estudio .....	6
<b>CAPÍTULO III: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>13</b>
3.1 Descripción y análisis de las referencias en el estudio.....	13
3.2 Clasificación de las referencias en el estudio .....	13
3.2.1 Propósito .....	13
3.2.2 Metodología empleada.....	14
3.2.3 Variables medidas .....	16
3.2.4 Tipo de fluido supercrítico empleado .....	17
3.2.5 Subproceso textil.....	17
3.2.6 Sustratos textiles .....	18
3.2.7 Maquinaria y/o equipos empleados.....	19
3.2.8 Tintes / aditivos empleados.....	21
3.2.9 Resultados .....	23
<b>CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>25</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>29</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>30</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>33</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resultados de Scopus .....	5
Tabla 2.2 Resultados de Scholar.....	6
Tabla 2.3 Clasificación y selección de artículos.....	7
Tabla 2.4 Artículos seleccionados para el estudio.....	11
Tabla 2.5 Evaluación de criterios por paper .....	12
Tabla 3.1 Propósito de los artículos seleccionados para el estudio .....	13
Tabla 3.2 Maquinaria empleada en los artículos seleccionados para el estudio.....	19
Tabla 3.3 Tintes y aditivos empleados en los artículos seleccionados para el estudio...21	
Tabla 3.4 Principales resultados de los artículos seleccionados para el estudio.....	23



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Región de fluido supercrítico .....	1
Figura 3.1 Metodología de los artículos seleccionados para el estudio.....	15
Figura 3.2 Variables medidas en los artículos seleccionados para el estudio.....	16
Figura 3.3 Subprocesos textiles de los artículos seleccionados para el estudio .....	17
Figura 3.4 Sustratos textiles de los artículos seleccionados para el estudio.....	18
Figura 3.5 Diagrama de flujo simplificado para el sistema de teñido supercrítico de CO2.....	21



## RESUMEN

En el presente trabajo se busca documentar mediante una revisión sistemática de literatura el potencial de los fluidos supercríticos en la industria textil y determinar si es probable alcanzar una producción más limpia con su uso, pues diversos científicos han afirmado que esta tecnología trae como beneficios una reducción en el consumo de agua y generación de efluentes contaminados, especialmente en el área de tintorería textil.

Para ello, se realizó un análisis integral de los diversos artículos de investigación existentes referidos al tema de investigación. Para esta búsqueda se tomará en cuenta aquellos de ámbito global posteriores al 2013 que fueron seleccionados luego de implementar filtros basados en criterios objetivos. Acto seguido se procedió a analizarlos agrupando sus resultados y discutiéndolos.

De este modo, se obtuvo como resultado principal que la tecnología que abarca el empleo de fluidos supercríticos es el sustituto perfecto de aquellos subprocesos textiles húmedos dentro de la tintorería que por su naturaleza produzcan muchos efluentes contaminados y posean un alto consumo de energía.

Finalmente, se concluye que se puede emplear los fluidos supercríticos como método de la química verde para producir beneficios considerables para el medio ambiente y debido a la revisión realizada su aplicabilidad se vuelve más plausible.

Palabras clave: fluidos supercríticos, industria textil, producción más limpia, revisión sistemática de literatura.

## ABSTRACT

The present work seeks to document through a systematic review of literature the potential of supercritical fluids in the textile industry and to determine whether it is likely to achieve cleaner production with their use, since several scientists have stated that this technology brings as benefits a reduction in water consumption and generation of contaminated effluents, especially in the area of textile dyeing.

To this end, a comprehensive analysis of the various existing research articles on the subject of research was carried out. For this search, those of global scope after 2013 will be taken into account, selected after implementing filters based on objective criteria. Then, they were analyzed by grouping their results and discussing them.

Thus, the main result was that the technology that includes the use of supercritical fluids is the perfect substitute for those wet textile sub-processes within the dyeing industry that by their nature produce many contaminated effluents and have a high energy consumption.

Finally, it is concluded that supercritical fluids can be used as a method of green chemistry to produce considerable benefits for the environment and, due to the review carried out, their applicability becomes more plausible.

Keywords: supercritical fluids, textile industry, cleaner production, systematic literature review.



# CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

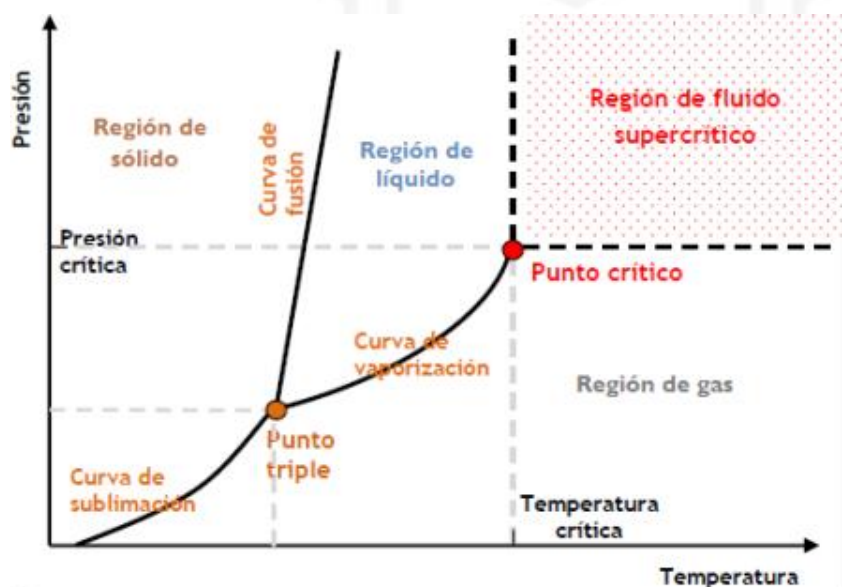
## 1.1 Problemática observada

En los últimos años, se ha hecho más frecuente la cuestión del cómo lidiar con los niveles de contaminación ambiental, que cada año van en aumento. Y es pues, que cada vez que se menciona el tema y se buscan culpables, generalmente se piensa en la industria petrolera o de transporte; sin embargo, se ha dejado de lado un sector que genera altos niveles de aguas residuales y es considerado el segundo mayor contaminante del mundo, estamos hablando de la industria textil. Justamente, la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2019) menciona que “la industria de la moda es responsable del 20% del desperdicio total de agua a nivel global” (párr. 20).

Ante esto surge el empleo fluidos supercríticos (FSC) como alternativa sostenible ante métodos convencionales, puesto que conlleva una serie de ventajas tales como el hecho de que hace uso de disolventes no tóxicos, como el agua o el dióxido de carbono, o de baja toxicidad, como la acetona y el etanol, en proporciones menores a las empleadas en las técnicas tradicionales.

**Figura 1.1**

*Región de fluido supercrítico*



De *Cromatografía de fluidos supercríticos*, por Castaños, 2015  
(<https://cienciaonthecrest.com/2015/08/17/cromatografia-de-fluidos-supercriticos/>).

De la figura siguiente se extrae que un FSC es una sustancia o mezcla de sustancias cuyas condiciones de presión y temperatura son superiores a su punto crítico. Los FSC muestran propiedades fisicoquímicas intermedias entre los líquidos y los gases, que son responsables de su alta densidad y difusividad, así como baja viscosidad. Dichas propiedades les otorgan a los FSC un elevado poder de penetración dentro de la matriz del soluto al actuar como disolventes (como se citó en Guerrero, 2017, p.8).

Ahondando en estas perspectivas, se ha encontrado diferentes estudios con respecto a la utilización de FSC para procesos de teñido, blanqueo, entre otros, aplicando diversas metodologías, sustratos textiles, colorantes y muchas otras sustancias. Sin embargo, no existe hasta el momento una recopilación y análisis a profundidad de todos los métodos, variables consideradas y demás ítems dentro de cada investigación de manera transversal.

Cabe señalar en este punto el concepto de producción más limpia como la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada a los procesos, productos y servicios para aumentar la eficiencia global y reducir los riesgos para los seres humanos y el medio ambiente (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial [ONUDI], s.f.).

De este modo, surge el siguiente planteamiento: ¿será posible alcanzar una producción más limpia en la industria textil global al 2020 aplicando la tecnología de los fluidos supercríticos en los procesos textiles? Para responder esto, en el presente trabajo se realizará una revisión sistemática de literatura en el uso de fluidos supercríticos en la industria textil; por lo cual, se analizarán diversos artículos de investigación indexados en bases de datos reconocidas como Scopus y Google Scholar, con el fin de obtener un mayor conocimiento del tema y, según los resultados encontrados, poder responder la pregunta de investigación.

## **1.1 Objetivo de la investigación**

Como objetivos de la presente investigación se tiene:

- Mediante una revisión sistemática de literatura, verificar si el uso de fluidos supercríticos en los procesos textiles permite alcanzar una producción más limpia en la industria textil.

- Sentar las bases del estado del arte necesarias para comprender la aplicabilidad de los fluidos supercríticos en la actualidad.
- Identificar los autores más relevantes relacionados con la pregunta de investigación para mapear las fuentes de conocimiento más fiables.

## 1.2 Aspectos de la investigación

Respecto al tipo de investigaciones a considerar para el estudio, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- **Ámbito geográfico:** global
- **Marco temporal:** publicaciones posteriores al 2013.
- **Nivel de influencia:** internacional.
- **Criterios para la estructura del cuerpo o desarrollo del artículo:** menos de 30 páginas, contar con un *abstract*, una introducción, pregunta de investigación, la fórmula de búsqueda con booleanos (opcional), las fuentes de búsqueda, la cantidad de documentos obtenidos de cada fuente, los criterios de inclusión y exclusión, resultados y discusión.
- **Criterios para la presentación de resultados:** proceder de manera natural del cuerpo de la investigación.

## CAPÍTULO II: MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1 Diseño de la investigación

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, este trabajo se realiza bajo la modalidad de revisión sistemática de literatura, que consiste en la revisión rigurosa e imparcial de múltiples investigaciones disponibles que permitan responder a una pregunta de investigación correspondiente a un tema de interés (Caro, 2008). Dicho esto, una revisión sistemática no desarrolla nuevos conocimientos y publica resultados por primera vez, sino más bien, según Manterola et al. (2013) es “un artículo de síntesis de la evidencia disponible” (p. 1), ya que se recolecta investigaciones pasadas que han profundizado el objeto de conocimiento, con el fin de resumir toda la información existente y así, responder a la interrogante por la cual se realiza el trabajo de interés.

Es importante que la revisión sistemática sea minuciosa y de calidad, ya que se desarrolla en base a investigaciones anteriores y, si es notoria una incongruencia en los resultados, el artículo carecería de veracidad y generaría desconfianza en los lectores. Por ello, esta técnica utiliza estrategias que permitan disminuir al máximo posibles errores, que son: búsqueda de fuentes de investigación indexadas en bases de datos mediante *key words*, definición de criterios de selección, características esenciales que deben tener las referencias y uso de herramientas cualitativas y cuantitativas que permiten evaluar más a fondo el nivel de calidad de cada artículo (Manterola et al., 2013).

Cuando se haya comprobado la validez de las investigaciones, se procede a analizar los resultados, clasificándolos según su contenido y buscando similitudes en los artículos al igual que las diferencias entre ellos. Es recomendable usar gráficos para identificar mejor los datos encontrados.

Una vez definido la metodología de este trabajo, se procederá al desarrollo de este mediante el diseño presentado: una revisión sistemática de literatura que nos permita conocer la efectividad de los FSC en la generación de procesos textiles más limpios.

## 2.2 Estrategias para la búsqueda de referencias bibliográficas

Se empleará la base de datos Scopus, por su relevancia a nivel internacional y el research engine Google Scholar, debido a la posibilidad de encontrar artículos de buena calidad y en idioma español.

Una vez definidas las bases de búsqueda, se pasó a definir los términos con los que se encontrará la cantidad de artículos iniciales. Se utilizaron los conceptos principales a los que hace referencia la pregunta de investigación. Asimismo, se identificaron distintas formas de escribir los términos, incluyendo abreviaturas y sinónimos. Finalmente, se verificó la inclusión de palabras claves, utilizadas previamente en artículos científicos relevantes.

De este modo, se realizó una búsqueda centrada fundamentalmente en la coincidencia de las palabras utilizadas con el título, palabras claves o resúmenes de los artículos ubicados en las diferentes bases de datos seleccionadas

En consecuencia, las ecuaciones de búsqueda para Scopus y Scholar fueron:

**Tabla 2.1**

*Resultados de Scopus*

Scopus		
Búsqueda en Scopus	Totales	Seleccionados
TITLE-ABS-KEY (supercritical AND "fluid" AND ("text" OR "fabric" OR "cotton" OR "industry" OR "process") AND ("natural") AND ("dye" OR "dyeing" OR "dyes"))	50	5
TITLE-ABS-KEY (textile, AND fluid, colorant)	9	1
TITLE-ABS-KEY (COTTON, AND FLUID, AND SUPERCRITICAL)	100	2
TITLE-ABS-KEY (cotton, process, AND supercritical, AND textile)	19	2
TITLE-ABS-KEY (process, AND supercritical, AND textile)	175	1
TITLE-ABS-KEY (denim, AND dye, AND natural OR supercritic)	30	1
TITLE-ABS-KEY (impacts AND of AND the AND textile AND industry)	98	2
TITLE-ABS-KEY ("supercritical fluids" AND textile)	10	1
<b>Total</b>	<b>491</b>	<b>15</b>

**Tabla 2.2**

*Resultados de Scholar*

<b>Scholar</b>		
<b>Búsqueda avanzada en Scholar</b>	<b>Totales</b>	<b>Seleccionados</b>
colorantes naturales para textil	5010	4
CO2 supercrítico, tela de algodón, gestión de residuos	63	2
tela de algodón, colorantes naturales, CO2 supercrítico.	103	1
"supercritical" "dye" "cotton" "cotton" OR "denim" OR "supercritical" OR "fluids" OR "textile" OR "organic" OR "fabric"	3310	6
<b>Total</b>	<b>8486</b>	<b>13</b>

**2.3 Método para la calificación de referencias a incluir en el estudio**

A la búsqueda de referencias bibliográficas se aplicaron los criterios de búsqueda y selección de artículos, los cuales poseen las subcategorías como se sigue:

- Pertenecer a una revista académica indexada.
- Presentar resultados testeados en base a una metodología definida.
- Estar escrito en inglés o español.
- Pertenecer a los cuartiles Q1, Q2 o Q3.
- Haber sido redactado entre el 2013 y la actualidad.
- Tratar de la producción textil en general y la influencia de los FSC.
- Tener menos de 30 páginas.
- Ser estudios primarios.
- Estar referidos a fluidos supercríticos en la industria textil.

Posteriormente, se hizo uso de la herramienta Mendeley (en este punto se eliminaron 8 artículos por simple inspección por no cumplir con el requisito básico de presentar una estructura comúnmente observada en los papers de investigación); se leyeron en primer lugar los *abstract* de cada artículo para ver si cumplían o no con los criterios de búsqueda y selección presentados (véase la tabla 2.3).

**Tabla 2.3**

*Clasificación y selección de artículos*

Título Artículo en idioma original	Año	Procedencia	Journal	Credibilidad	Palabras clave presentes en el artículo (X = sí hay)								
					Supercríticos	Teñido	CO2	Salud	Orgánico	Algodón	Ecolog	Impregnación	
Impact of chemical substances used in textile industry on the employee's health: Epidemiological study	2020	Scopus	Ecotoxicology and Environmental Safety	Q1/Q2					X				
Single step disperse dyeing and antimicrobial functionalization of polyester fabric with chitosan and derivative in supercritical carbon dioxide	2019	Scopus	Journal of Supercritical Fluids	Q1	X	X	X				X		X
Colouration and bio-activation of polyester fabric with curcumin in supercritical CO2: Part I - Investigating colouration properties	2019	Scopus	Journal of Supercritical Fluids	Q1	X	X	X						
Aprovechamiento del fruto de la melina (Gmelina arborea ROXB)	2020	Scholar	Agronomía Costarricense	Pertenece a la Universidad de Costa Rica									

(continúa)

(continuación)

Título Artículo en idioma original	Año	Procedencia	Journal	Credibilidad	Palabras clave presentes en el artículo (X = sí hay)							
					Supercríticos	Teñido	CO2	Salud	Orgánico	Algodón	Ecolog	Impregnación
Colouration and bio-activation of polyester fabric with curcumin in supercritical CO2: Part II – Effect of dye concentration on the colour and functional properties	2020	Scopus	Journal of Supercritical Fluids	Q1/Q2	X	X	X					
Supercritical carbon dioxide as a green media in textile dyeing: A review	2018	Scopus	Textile Research Journal	Q2	X	X	X					
Supercritical Carbon-dioxide Assisted Dyeing of Textiles: An Environmental Benign Waterless Dyeing Process	2015	Scholar	International Journal of Innovative Research and Creative Technology	Impact factor 3.1	X	X	X			X	X	
Sustainable Cotton Dyeing in Nonaqueous Medium Applying Protic Ionic Liquids	2017	Scholar	ACS Sustainable Chemistry and Engineering	Impact factor 6.97		X				X		
A novel approach for textile cleaning based on supercritical CO2 and Pickering emulsions	2013	Scopus	Journal of Supercritical Fluids	Q1	X	X	X			X	X	X

(continúa)



(continuación)

Título Artículo en idioma original	Año	Procedencia	Journal	Credibilidad	Palabras clave presentes en el artículo (X = sí hay)							
					Supercríticos	Teñido	CO2	Salud	Orgánico	Algodón	Ecolog	Impregnación
Waterless bleaching of knitted cotton fabric using supercritical carbon dioxide fluid technology	2018	Scopus	Cellulose	Q1	X		X				X	
Synthesis of a Novel Disperse Reactive Dye Involving a Versatile Bridge Group for the Sustainable Coloration of Natural Fibers in Supercritical Carbon Dioxide	2019	Scopus	Advanced Science	Q1	X						X	X
Synthesis of reactive disperse dyes containing halogenated acetamide group for dyeing cotton fabric in supercritical carbon dioxide	2014	Scopus	Journal of Supercritical Fluids	Q1	X	X	X				X	
Improving the Fastness Properties of Cotton Fabric through the Implementation of Different Mordanting Agents Dyed with Natural Dye Extracted from Marigold	2016	Scholar	American Journal of Polymer Science & Engineering	Peer reviewed			X					
Novel sustainable synthesis of dyes for clean dyeing of wool and cotton fibres in supercritical carbon dioxide	2018	Scopus	Journal of Cleaner Production	Q1	X	X	X				X	

(continúa)

(continuación)

Título Artículo en idioma original	Año	Procedencia	Journal	Credibilidad	Palabras clave presentes en el artículo (X = sí hay)								
					Supercríticos	Teñido	CO2	Salud	Orgánico	Algodón	Ecolog	Impregnación	
The potential of anthocyanins from blueberries as a natural dye for cotton: A combined experimental and theoretical study	2020	Scopus	Dyes and Pigments	Q1/Q2		X					X		
Development of a special SCFX-AnB3L dye and its application in ecological dyeing of silk with supercritical carbon dioxide	2020	Scopus	Journal of CO2 Utilization	Q1	X	X	X				X	X	
Optimization of Eco-Friendly Reactive Dyeing of Cellulose Fabrics Using Supercritical Carbon Dioxide Fluid with Different Humidity	2018	Scholar	Journal of Natural Fibers	Q3	X	X					X	X	
Bio-based polymer colorants from nonaqueous reactive dyeing of regenerated cellulose for plastics and textiles	2019	Scopus	Carbohydrate Polymers	Q1		X					X		
Supercritical CO2 for color graphic dyeing: Theoretical insight and experimental verification	2015	Scholar	Thermal Science	Q3	X	X	X						
Extracción del colorante natural a partir de la col morada y su efectividad en el teñido	2019	Scholar	Ñawparisun	Pertenece a la Universidad Nacional de Juliaca		X							

Tras la revisión, los artículos que restaron sumaban un total de 13 trabajos (véase la tabla 2.4) a los que se le aplicaron posteriormente una evaluación de calidad con el objeto principal de garantizar la integridad y fiabilidad de la información presentada en la revisión sistemática final. Para ello, se emplearon los criterios para la medición de la calidad de un artículo. Estos criterios tuvieron 3 posibles respuestas: “Excelente” = 1, “Regular” = 0.5, “Deficiente” = 0, la evaluación de calidad se puede ver en la tabla 2.5.

**Tabla 2.4**

*Artículos seleccionados para el estudio*

Nº Paper	Título	Autor(es)
P1	Single-step disperse dyeing and antimicrobial functionalization of polyester fabric with chitosan and derivative in supercritical carbon dioxide.	Abate, M. T., Ferri, A., Guan, J., Chen, G., Ferreira, J. A. y Nierstrasz, V.
P2	Colouration and bio-activation of polyester fabric with curcumin in supercritical CO <sub>2</sub> : Part I - Investigating colouration properties.	Abate, M. T., Ferri, A., Guan, J., Chen, G. y Nierstrasz, V.
P3	Colouration and bio-activation of polyester fabric with curcumin in supercritical CO <sub>2</sub> : Part II – Effect of dye concentration on the colour and functional properties.	Abate, M. T., Zhou, Y., Guan, J., Chen, G., Ferri, A. y Nierstrasz, V.
P4	Supercritical carbon dioxide as a green media in textile dyeing: A review.	Abou Elmaaty, T. y Abd El-Aziz, E.
P5	Supercritical Carbon-dioxide Assisted Dyeing of Textiles: An Environmental Benign Waterless Dyeing Process.	Agrawal, B. J.
P6	A novel approach for textile cleaning based on supercritical CO <sub>2</sub> and Pickering emulsions.	Aslanidou, D., Tsiptsias, C. y Panayiotou, C.
P7	Waterless bleaching of knitted cotton fabric using supercritical carbon dioxide fluid technology.	Eren, S., Avinc, O., Saka, Z. y Eren, H. A.
P8	Synthesis of a Novel Disperse Reactive Dye Involving a Versatile Bridge Group for the Sustainable Coloration of Natural Fibers in Supercritical Carbon Dioxide.	Fan, Y., Zhang, Y. Q., Yan, K. y Long, J. J.
P9	Synthesis of reactive disperse dyes containing halogenated acetamide group for dyeing cotton fabric in supercritical carbon dioxide.	Gao, D., Cui, H. S., Huang, T. T., Yang, D. F. y Lin, J. X.
P10	Novel sustainable synthesis of dyes for clean dyeing of wool and cotton fibres in supercritical carbon dioxide.	Luo, X., White, J., Thompson, R., Rayner, C., Kulik, B., Kazlauciusas, A.
P11	Development of a special SCFX-AnB3L dye and its application in ecological dyeing of silk with supercritical carbon dioxide.	Yan, K., Zhang, Y. Q., Xiao, H., Shi, M. W. y Long, J. J.
P12	Optimization of Eco-Friendly Reactive Dyeing of Cellulose Fabrics Using Supercritical Carbon Dioxide Fluid with Different Humidity.	Zhang, J., Zheng, H. y Zheng, L.
P13	Supercritical CO <sub>2</sub> for color graphic dyeing: Theoretical insight and experimental verification.	Zheng, L. J., Zhang, J., Du, B., Zhao, Y. P. y Ye, F.

**Tabla 2.5***Evaluación de criterios por paper*

<b>Criterio de calificación</b>	<b>Excelente = 1, Regular = 0.5, Deficiente = 0</b>												
	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>	<b>P9</b>	<b>P10</b>	<b>P11</b>	<b>P12</b>	<b>P13</b>
El resumen presenta la investigación, la problemática, objetivos, la metodología desarrollada, así como los hallazgos y conclusiones más relevantes.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Describe la problemática observada que da lugar a la investigación y fundamenta la necesidad de solucionarla	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Define claramente el objetivo de la investigación	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
La introducción describe el marco del conocimiento y está fundamentado en referencias bibliográficas relevantes. Identifica las variables y dimensiones de la investigación.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
La metodología esta descrita en forma suficiente, detalla los métodos y técnicas empleadas.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5	0.5
Los resultados son expuestos en forma completa	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
La discusión explica el comportamiento de los resultados a la luz de sus tendencias y su comparación con los resultados de otras investigaciones similares.	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5
<b>TOTAL</b>	<b>6.5</b>	<b>6.5</b>	<b>7.0</b>	<b>6.5</b>	<b>7.0</b>	<b>7.0</b>	<b>6.5</b>	<b>7.0</b>	<b>7.0</b>	<b>6.0</b>	<b>6.0</b>	<b>5.5</b>	<b>5.5</b>

La evaluación de calidad de los artículos se calcula sumando las puntuaciones de las respuestas a las preguntas previamente definidas. Sólo se consideraron aquellos estudios con calidad aceptable, es decir, con una puntuación de calidad superior a 3.5 (50% de la puntuación perfecta) para la posterior extracción y síntesis de datos. Así pues, tras la aplicación de los criterios de calidad, resultaron un total de 13 artículos definitivos. Para conocer la codificación de los mismos revisar la sección bibliográfica del trabajo.

## CAPÍTULO III: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1 Descripción y análisis de las referencias en el estudio

Para el presente estudio, se encontraron 13 artículos de investigación cuyos temas abordan el uso de fluidos supercríticos en los procesos textiles. Con el fin de analizar a profundo cada una de las investigaciones, estas fueron distribuidas en base a un número de páginas equitativo por miembro de trabajo, para luego clasificarlas en los siguientes ámbitos: propósito, metodología empleada, variables medidas, subproceso textil, substratos textiles, tipo de fluido supercrítico empleado, maquinaria y/o equipos empleados, tintes / colorantes / blanqueadores y/o agentes funcionales empleados y los principales resultados encontrados.

### 3.2 Clasificación de las referencias en el estudio

Se procedió a la descripción de las similitudes entre referencias, así como las diferencias que pudieran presentar, sistematizando y describiendo los aspectos que contribuyan a responder la pregunta de investigación propuesta en el estudio de investigación.

#### 3.2.1 Propósito

El propósito de los papers evaluados se muestran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1**

*Propósito de los artículos seleccionados para el estudio*

<b>N° Paper</b>	<b>Propósito</b>
P1	Reducir el costo de producción y la contaminación ambiental en los procesos de funcionalización antimicrobiana con el uso de quitosano y derivados aplicando la ruta de teñido en scCO <sub>2</sub> .
P2-P3	Verificar el potencial del teñido en scCO <sub>2</sub> para la coloración de tejido de poliéster con curcumina sin mordiente químico y pretratamiento del tejido logrando una fabricación sostenible.

(continúa)

(continuación)

N° Paper	Propósito
P4	Destacar el papel de la tecnología de fluidos de dióxido de carbono supercrítico en los procesos de teñido textil en tejidos sintéticos y naturales, investigando el desarrollo de su alta eficiencia y teñido compacto para ahorrar energía y agua en los procesos de fabricación.
P5	Enfatizar la importancia del uso de CO <sub>2</sub> supercrítico en lugar de agua para teñido de textiles, especialmente los de fibras sintéticas, ya que éste no produce ningún drenaje y puede considerarse como un enfoque de teñido respetuoso con el medio ambiente.
P6	Se propone un novedoso método ecológico para la limpieza de textiles, basado en el dióxido de carbono supercrítico (scCO <sub>2</sub> ) como disolvente y una suspensión acuosa como cosolvente.
P7	Contribuir a alcanzar el hito de la minimización y/o abolición de los productos químicos y el agua utilizados en procesos textiles acuosos comparando los métodos de blanqueo tradicionales con aquellos en medio supercrítico.
P8	Mejorar las propiedades de coloración del colorante en el dióxido de carbono supercrítico.
P9	Garantizar una buena coloración en tejidos de algodón en medios supercríticos estudiando al grupo funcional acetamina halogenada, capaz de reaccionar con las fibras de algodón y formar enlaces químicos sin tratamiento previo ni cosolventes.
P10	Encontrar una ruta para sintetizar los tintes dispersos azoicos y aplicarlos a un teñido de tejidos naturales utilizando tecnología supercrítica.
P11	Sintetizar un colorante de una solidez especial usando fluido supercrítico para el teñido de textiles, particularmente en el sustrato de seda.
P12	Demostrar que es posible mejorar el teñido en telas de celulosa con fluidos supercríticos haciendo énfasis en el parámetro humedad.
P13	Demostrar que el teñido gráfico con FSC es posible.

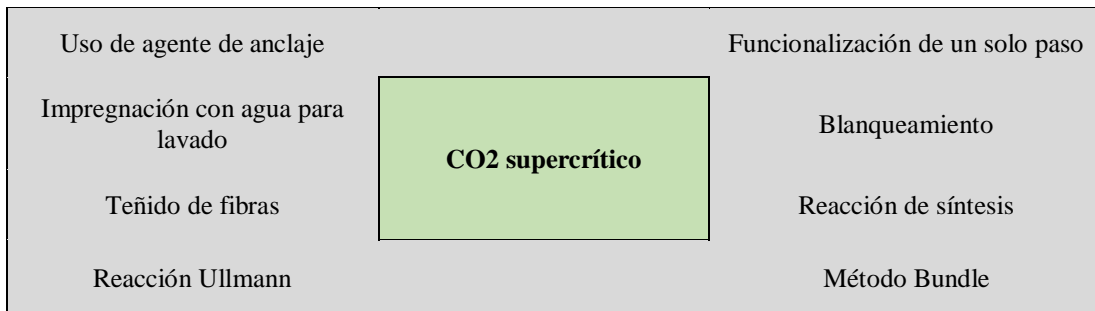
Los autores de estos artículos buscan demostrar el potencial de los FSC en específicos procesos textiles usando diferentes aditivos, ya que cada uno de ellos (uno mejor que otro) otorgará distintas propiedades a las telas.

### 3.2.2 Metodología empleada

Claro está, que cada autor ha decidido emplear cierto procedimiento para cumplir el propósito de su investigación, las metodologías encontradas en los diferentes estudios se encuentran en la figura 3.1.

**Figura 3.1**

*Metodología de los artículos seleccionados para el estudio*



A continuación, se presenta una breve explicación de cada método:

- **Funcionalización de un solo paso:** realizar el acabado de la tela en un solo proceso; por ejemplo, si se desea manufacturar una tela de color azul y antimicrobiana, usando un solo equipo se logrará este resultado, pues en él se incorporará la tela, el pigmento y el agente antimicrobiano a la vez.
- **Impregnación:** cuando la tela se sumerge a una solución para posteriormente ser escurrida usando de cilindros de presión, a este método también se le conoce como “foulardado” (Solé, s.f.).
- **Uso de agente de anclaje:** consiste en usar un aditivo que aumente la fijación de otro aditivo en el material textil con el fin de mejorar sus atributos; por ejemplo, un incremento de la humectabilidad en la tela.
- **Reacción de síntesis:** Formación de un nuevo compuesto a partir de 2 o más sustancias químicas, este método generalmente se usa en la industria textil para encontrar colorantes que puedan adherirse mejor a las fibras naturales.
- **Método Bundle:** método de teñido donde la tela se dobla en forma de abanico y se empaqueta con otras telas, otorgando un diseño con estilo a la prenda (Zheng et al., 2015).
- **Reacción Ullmann:** reacción de acoplamiento que se une enlaces carbono-carbono a estructuras aromáticas utilizando polvo de cobre como catalizador (Fan et al., 2019).
- **Blanqueamiento y teñido de fibras:** tipos de procesos textiles que se explicarán posteriormente en la sección 3.2.4.

### 3.2.3 Variables medidas

A lo largo de los papers evaluados, las variables medidas se muestran en la figura 3.2.

**Figura 3.2**

*Variables medidas en los artículos seleccionados para el estudio*

<b>COLOR</b>	Intensidad	Resistencia	Propiedades antimicrobianas	Presión
	Firmeza	Fuerza	Durabilidad	Temperatura
	Difusión	Nivelación	Protección UV	Tiempo

Entre todos estos parámetros y variables, destacan los siguientes:

- **Fuerza del color:** concentración para el rendimiento del color.
- **Nivelación del color:** uniformidad con la que se dispersa el colorante en la tela.
- **Firmeza del color:** solidez del color en el tejido. Indica qué tan fuerte se anclan las moléculas del colorante al sustrato textil.
- **Difusión del color:** hace referencia a la migración del colorante, es decir, la máxima dispersión del colorante en el sustrato textil. Se obtiene un mejor valor si previamente se han realizado procesos para ayudar a que dicho sustrato absorba mejor el colorante y este se propague a más cantidad de tela. Se conoce también como rendimiento del color
- **Intensidad de color:** depende de delta de L en una lectura espectrofotométrica y mide el grado de intensidad de un color. Es directamente proporcional al porcentaje de la tricromía del color (si se quiere más intensidad se añade más colorante).

Asimismo, a lo largo de los papers se han medido otras variables en función a lo que se esperaba conseguir. Ejemplo de ello fueron la aplicación del quitosano (como aditivo para funcionalizar) y la curcumina (para teñir y funcionalizar) para aumentar las propiedades del sustrato final en cuanto a propiedades antibacterianas y protección UV. De igual modo se esperaba que estas propiedades tuvieran durabilidad frente a varias lavadas post impregnación.



### 3.2.4 Tipo de fluido supercrítico empleado

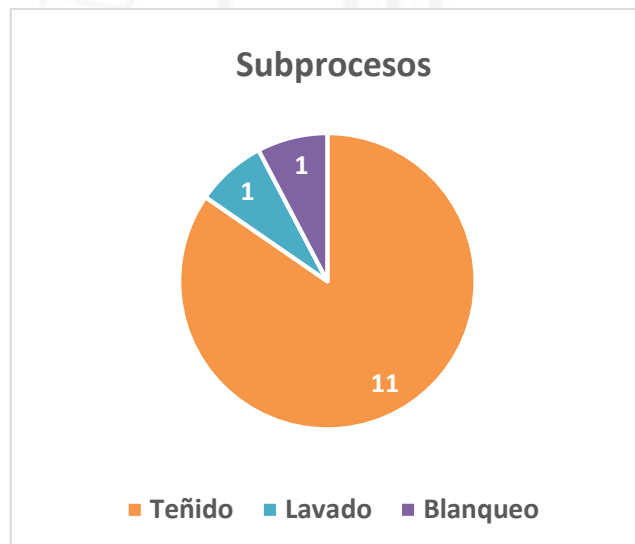
El FSC usado en todos los papers es el CO<sub>2</sub> ya que es barato, no tóxico, no inflamable e inerte en condiciones críticas. Tiene la cualidad de hinchar y plastificar las telas con características hidrofóbicas permitiendo el teñido de las fibras textiles (en especial las artificiales) y la dispersión del colorante sin la necesidad de usar agentes químicos; además, el dióxido de carbono supercrítico es reutilizable junto a los tintes sobrantes y no requiere de un proceso de secado posterior (Abate et al., 2019).

### 3.2.5 Subproceso textil

Aquellos subprocesos textiles estudiados a lo largo de los artículos que involucran el uso de fluidos supercríticos se muestran en la figura 3.3.

**Figura 3.3**

*Subprocesos textiles de los artículos seleccionados para el estudio*



A continuación, se presenta una breve explicación de cada subproceso textil:

- **Teñido supercrítico:** por medio de equipos de alta presión se impregna un sustrato textil (generalmente en forma de rollo), con colorantes de diversos tipos variando las condiciones de operación en función de estos últimos y del sustrato. Se hace en un solo paso y no requiere de químicos auxiliares, mordientes ni del proceso de secado posterior al teñido convencional.

- **Lavado supercrítico:** se basa en la emulsión *pickering*, la cual propone emplear partículas sólidas como agentes surfactantes para mezclar dos líquidos inmiscibles estabilizando al mismo tiempo dicha mezcla. Se logra, de este modo limpiar diferentes tipos de suciedades formando emulsiones *pickering* con una mezcla acuosa de piedra caliza pulverizada y CO<sub>2</sub> supercrítico y exponiendo los sustratos a limpiar a dicha emulsión estabilizada. Ejemplos de suciedades estudiadas en el *Paper 6* fueron: aceite de oliva, cera de abejas, pegamento de piel de conejo, pasta de remolacha y negro de carbón (Aslanidou et al., 2013).
- **Blanqueo supercrítico:** es un paso previo al teñido aplicado en tejido de algodón (en el caso del *Paper 7*) para la obtención de la coloración blanca deseada. Se realiza añadiendo peróxido de hidrógeno y ofrece resultados similares al blanqueo tradicional sin la necesidad de añadir estabilizadores de peróxido o soda cáustica (Eren et al., 2018).

### 3.2.6 Sustratos textiles

A lo largo de los papers evaluados, los sustratos textiles empleados han sido los mostrados en la figura 3.4.

**Figura 3.4**

*Sustratos textiles de los artículos seleccionados para el estudio*



*Nota.* Como se aprecia los sustratos empleados más comunes son el algodón y el poliéster.

Los sustratos textiles se dividen en 2 tipos: fibras sintéticas y fibras naturales. Las fibras sintéticas, o también llamada artificiales, provienen de compuestos derivados del petróleo; los más utilizados en la fabricación textil son el tereftalato de polietileno (PET), la poliamida (PA), el poliacrilonitrilo (PAN) y el polipropileno (PP) (Abou & Abd, 2017). De todos ellos, el poliéster (PET), el nylon (PA) y el polipropileno (PP) fueron estudiados en los artículos seleccionados. Por otro lado, las fibras naturales son aquellas que como su nombre lo dice, provienen de la naturaleza y pueden ser de origen vegetal o animal; las más conocidas en la industria textil son el algodón, la lana, el bonote, la seda, el abacá, el cáñamo, etc. De todos ellos, el algodón, la lana y la seda fueron estudiados en los artículos seleccionados.

Es importante resaltar que las fibras sintéticas son las más usadas en los teñidos con CO<sub>2</sub> supercrítico debido a sus características hidrofóbicas, su estructura compacta y alta cristalinidad (Abate et al., 2019); al contrario, las fibras naturales poseen características hidrofílicas, lo cual dificulta al fluido supercrítico romper los enlaces de hidrógeno presentes en la tela (Agrawal, 2015).

### 3.2.7 Maquinaria y/o equipos empleados

Para el proceso de teñido a través de fluidos supercríticos se usan los siguientes equipos y maquinarias mostrados en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2**

*Maquinaria empleada en los artículos seleccionados para el estudio*

N° Paper	Maquinaria
P1	Lavadora doméstica, congelador, tanque CO <sub>2</sub> , espectrómetro, analizador electrocinética, tensiómetro óptico, espectrofotómetro.
P2	Rueda giratoria (eje), motor, calentador, elemento de refrigeración, recipientes de teñido de acero inoxidable, espectrofotómetro, lavadora de ropa doméstica.
P3	Espectrofotómetro de reflectancia, analizador de transmitancia ultravioleta, equipo espectrofotométrico
P4	Planta piloto especial para teñir el tejido PET y para extraer el exceso del colorante del tejido teñido en CO <sub>2</sub> supercrítico.

(continúa)

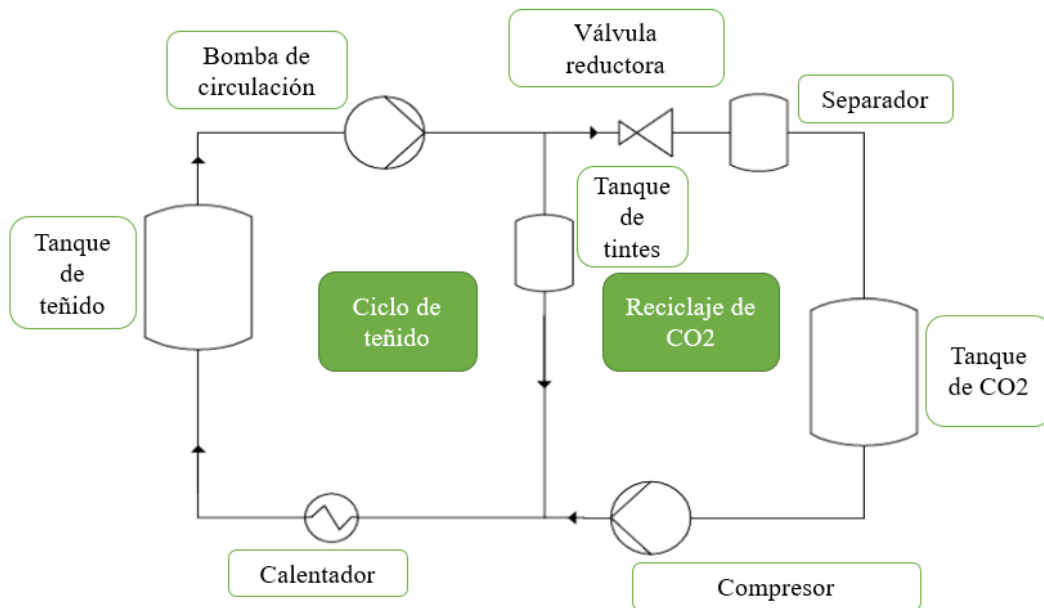
(continuación)

N° Paper	Maquinaria
P5	Controlador de temperatura, calentador de capacidad, manómetro, bomba de dióxido de carbono Varex HPLC y enfriador.
P6	Bombas de jeringa, vasos precipitados, celda de alta presión, controladores de presión.
P7	Cámara de tratamiento de scCO <sub>2</sub> de Dyecoo de 290 ml con baño de aceite de tratamiento Rapid Xiamen, refrigerante, Konica Minolta CM 3600A (mide blancura), probador de control de la humedad y espectrómetro de infrarrojos.
P8	Matraz de tres cuellos, filtro, espectroscopio, placas de gel de sílice.
P9	Aparato de ensamblaje de dióxido de carbono supercrítico para teñir tejido de algodón, espectrómetros de resonancia magnética nuclear y de masa, aparato de solidez al lavado, probador de roce y extractor Soxhlet.
P10	Equipo de alta presión, termómetro, placa de agitación.
P11	Matraz de 3 cuellos, espectrómetro.
P12	Caldera de teñido, celda de teñido, bomba de alta presión, mezclador dinámico, intercambiador de calor, controlador automático de contrapresión.
P13	Colorímetro, caldera de materia colorante, caldera de teñido, espectrofotómetro, secador de tintes, reactor de acero inoxidable poroso.

En la figura 3.5 se muestra un resumen gráfico del sistema de teñido supercrítico de CO<sub>2</sub>, el equipo de teñido contiene CO<sub>2</sub> líquido precalentado que recoge el tinte y realiza el teñido del sustrato textil. El tinte es absorbido por la fibra. Cuando se libera la presión, el CO<sub>2</sub> se vuelve gaseoso y pierde su capacidad de disolverse, y los residuos de tinte se separan después de la licuefacción. El dióxido de carbono, libre de tinte, vuelve al tanque de recolección después de completar el proceso de teñido. Se detiene la circulación del CO<sub>2</sub>, la autoclave de teñido se despresuriza y el polvo de tinte no utilizado se deposita en el fondo de la máquina. Por lo tanto, el teñido supercrítico no produce ningún drenaje y puede ser considerado como un enfoque de teñido ecológico. Este sistema es aplicable a más subprocesos textiles.

**Figura 3.5**

*Diagrama de flujo simplificado para el sistema de teñido supercrítico de CO<sub>2</sub>*



### 3.2.8 Tintes / aditivos empleados

A lo largo de la evaluación de todos los papers, se presentan importantes tintes, blanqueadores y/o agentes funcionales empleados, los cuales se muestran en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3**

*Tintes y aditivos empleados en los artículos seleccionados para el estudio*

Proceso textil	Nº Paper	Tinte	Aditivos
Teñido de fibras sintéticas	P1	Tintes dispersos	Quitosano y derivados
	P2-P3	Curcumina	
	P4	Disperse Blue 79	
	P5	Colorante disperso	Poliglicol y acetona
Lavado de textiles	P6		Ca (OH)
Blanqueamiento	P7		Peróxido de hidrógeno
Teñido de fibras naturales	P8	1-loroantraquinona, N-feniletildiamina,	
	P9	Colorantes reactivo - dispersos	
	P10	Colorantes dispersos	

(continúa)

(continuación)

Proceso textil	N° Paper	Tinte	Aditivos
Teñido de fibras naturales	P11	Colorantes reactivo - dispersos	Sulfato de vinilo
	P12	Colorante reactivo K-2RA	
Teñido gráfico en prendas	P13	Disperse Blue y Disperse Red	

Como se indica en la tabla presentada anteriormente, estos tintes y aditivos empleados son diferentes entre los diversos papers evaluados; por ende, cada uno tiene su importancia y su manera de usarlo correctamente. Asimismo, los colorantes se pueden clasificar de la siguiente forma:

- **Colorantes dispersos (poliéster):** son insolubles en agua, realmente poseen una baja solubilidad en ella. Las partículas del colorante se disuelven en su forma mono-molecular estando muy influenciada esta solubilidad por las condiciones del medio, así como por otros factores propios, entre los cuales podemos nombrar, el agua, pH del medio, etc., además de las altas temperaturas de trabajo (Textil, 2016).
- **Colorantes reactivos (algodón):** son sustancias de estructuras no saturadas, orgánicas, solubles en agua. Se preparan comercialmente para tener uno o dos átomos de cloro que reaccionen con la celulosa formando enlaces covalentes con los grupos nucleofilos de la fibra. Estas sustancias son solubles en medio ácido, neutro o básico, poseen una estructura molecular no saturada (Universidad Técnica del Norte, 2011).
- **Colorantes reactivos-dispersos:** Los tintes reactivos dispersos con una estructura química apropiada son clave para la coloración de las fibras naturales en el medio ecológico libre de agua del dióxido de carbono supercrítico (Fan et al., 2018).
- **Colorantes naturales:** En los últimos años se ha reactivado el uso de colorantes naturales para el teñido de fibras textiles debido a la conciencia ambiental mundial y al énfasis que se ha dado a los procesos de producción más limpios y ecológicos. Una de las ventajas más importantes de los colorantes naturales es su compatibilidad con el medio ambiente, es decir, no causan ningún problema ambiental durante la etapa de producción y su uso

mantiene el equilibrio ecológico. Muchos de los colorantes naturales tienen también propiedades multifuncionales y han sido considerados como agentes de acabado sostenibles y seguros en el desarrollo de textiles funcionales para una variedad de aplicaciones (Molla et al.,2019).

### 3.2.9 Resultados

Los principales resultados encontrados en cada paper como consecuencia de los diferentes experimentos se muestran en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4**

*Principales resultados de los artículos seleccionados para el estudio*

N° Paper	Resultados
P1	Reducción de 75-93% de las bacterias (tasa de reducción bacteriana debe mejorarse para aplicaciones médicas y de higiene).
P2	A 120°C, 25MPa y 1 hora de tiempo de teñido, se logró una excelente intensidad, uniformidad y solidez del color en la tela.
P3	Los tejidos mostraron múltiples funcionalidades como las propiedades antibacterianas, antioxidantes, solidez y de bloqueo de los rayos ultravioleta.
P4	La aplicación de scCO <sub>2</sub> en el teñido es un éxito para las fibras sintéticas excepto para el propileno que necesita más investigación para encontrar tintes adecuados y condiciones de trabajo más fáciles.
P5	Tiempos de teñido más cortos, el poliéster ya no necesita tratamiento previo. Esta tecnología se sigue considerando de última generación y no se encuentra fácilmente a escala comercial en la actualidad.
P6	El proceso de limpieza es más eficiente que otros para diferentes tipos de suciedad. El color de las muestras no se vio afectado. El proceso propuesto puede caracterizarse como un método de limpieza general.
P7	Comparado con el método de blanqueo tradicional sin la adición de estabilizante y sosa, el método con scCO <sub>2</sub> ofreció valores similares de blancura y a 80°C mejoró la blancura (30% y 51%) para cada tipo de concentración de peróxido.
P8	Fijación de las moléculas de colorante absorbidas de 97,69% y de 89,76% para la lana y la seda, respectivamente. El algodón obtuvo una menor eficiencia de fijación de 49,37% reflejado en la baja intensidad de color. Se recomienda un proceso optimizado para sintetizar el nuevo tinte diseñado.

(continúa)

(continuación)

N° Paper	Resultados
P9	La solidez al teñido y al roce cumplieron los requisitos, pero la solidez al lavado puede mejorar. Los tintes 1 y 2 mostraron los valores más altos de fijación. Los colores de la tela teñida con los tintes 2, 4 y 6 eran más profundos. Los tintes con el grupo bromoacetilo tuvieron mejor fijación en el algodón.
P10	A 90°, 140 bar y 60 minutos se produce un tinte uniforme con alta resistencia del color y propiedades de solidez, se obtiene un 99.4% de fijación para la lana.
P11	Muy buenos comportamientos de adsorción, absorción, fijación y una alta solidez en la coloración. La mayor intensidad de color se alcanzó en la seda.
P12	La intensidad del color de las muestras teñidas mejoró con la variación de humedad del scCO <sub>2</sub> . Además, se obtuvo una aceptable resistencia al lavado, al frotamiento y a la luz. Ergo, se redujo el tiempo de teñido.
P13	A 120°C y 24 MPa se obtuvo el mejor coeficiente de difusión y el CO <sub>2</sub> supercrítico con alta difusión y solubilidad favoreció la capilaridad de los tintes al interior de las fibras.





## CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Luego de clasificar y estructurar la información de los artículos, se encontraron ciertas tendencias, limitaciones, similitudes y diferencias entre ellos; por lo cual, es necesario explicar y analizar los resultados para dar respuesta a nuestra pregunta de investigación.

Se evidencia que las referencias bibliográficas evaluadas afirman que el uso de los FSC en la industria textil traería beneficios ambientales y económicos al disminuir la generación de aguas residuales y compuestos químicos en la producción, lo que a la vez permite un ahorro significativo de energía (Abate et al., 2019). Por ello, se aprecia notoriamente que **el propósito** de los investigadores es comprobar el potencial de los fluidos supercríticos en los diferentes procesos textiles, pues ya que ésta es una tecnología relativamente nueva, es necesario verificar que las propiedades otorgadas a la tela cumplan o sobrepasen los requisitos mínimos de calidad y, en caso no se logre, investigar metodologías para la mejora de estos parámetros con el fin de realizar una producción más limpia gracias a los FSC. Por ejemplo, en el *Paper 8* se menciona que la coloración de las fibras naturales (algodón, lana y seda) mediante dióxido de carbono supercrítico es compleja de realizar debido a que estos sustratos tienen una alta afinidad por el agua; por ello, los autores buscan mejorar las propiedades de coloración al emplear un tinte especial en el teñido textil (Fan et al., 2019).

Con respecto a las **metodologías**, en resumen, las más empleadas en los artículos fueron impregnación y reacción de síntesis. Para que el material textil obtenga el color deseado, la impregnación es una técnica básica para el teñido de las telas debido a su uso en producciones continuas y efectividad. Además, diversos papers analizados se enfocaban en la creación de nuevos tintes para mejorar la eficiencia en el teñido de las fibras textiles y, para lograr esto se debe realizar reacciones de síntesis. Cabe resaltar, que los métodos en general son muy diversos ya que cada artículo se centró en un proceso textil con tintes y aditivos distintos, por lo cual se requiere de mecanismos diferentes.

Con respecto a las **variables** analizadas por los artículos, las más comunes son el tiempo con un rango de entre 20 minutos a 12 horas, la presión con un rango de 180 a 250 bares y la temperatura con un rango de entre 40°C a 140°C. La mayoría de los estudios analizados converge en el hecho de que se trabaja a distintas temperatura y

presión para un mismo tiempo para evaluar aquellas en las que obtiene un resultado óptimo en cuanto al contacto entre el sustrato textil y los tintes, colorantes, blanqueadores o agentes funcionales empleados. Asimismo, cabe resaltar que, según el *Paper 2*, el comportamiento del teñido estaba mucho más influenciado por la presión del sistema seguido por la temperatura del proceso (Abate et al., 2019).

Con respecto al **subproceso textil** más estudiado a lo largo de los artículos se presenta el teñido, ya que el teñido con CO<sub>2</sub> supercrítico demostró ser una coloración anhidra la cual incluye la utilización de menos energía y productos químicos, lo que supone un potencial de hasta un 50% menos de costes operativos (como se citó en Eren et al, 2018, p.2). Sin embargo, otros procesos están siendo estudiados como el blanqueo o el lavado, como procesos de pre y postratamiento de la tela antes de ser teñida por el ahorro que permite en agua dulce.

Con respecto a los **sustratos textiles**, el algodón resaltó como uno de los más comunes entre los artículos por tratarse de la fibra natural más producida y utilizada con un uso popular en el mundo entero, tal y como lo indica el *Paper 7* (Eren et al., 2018). Asimismo, resultó de interés testear en poliéster ya que, según el *Paper 2*, el poliéster (PET) es la fibra textil más importante en términos de volumen y valor del producto en el mercado debido a sus importantes propiedades y a su versatilidad en diversas aplicaciones (Abate et al., 2019). También es el material textil más investigado en lo que respecta a la tintura de scCO<sub>2</sub> ya que el poliéster es una fibra hidrófoba de estructura compacta y alta cristalinidad; debido a esto, la coloración de la fibra PET se lleva a cabo principalmente a alta temperatura y presión.

Con respecto al tipo de **fluido supercrítico empleado**, se optó en todos los papers por CO<sub>2</sub>, ya que según el *Paper 1*, en el estado supercrítico, el CO<sub>2</sub> tiene una baja viscosidad y difusividades como las de los gases combinados con una alta densidad y un poder solvente similar al de los solventes líquidos (Abate et al., 2018). Estas propiedades le ayudan a adquirir un alto poder solvente que puede ser fácilmente ajustado variando la presión y la temperatura del sistema. Adicionalmente, según el *Paper 3*, el CO<sub>2</sub> utilizado como solvente proviene de una emisión industrial que es esencialmente barata, abundante, no tóxica y no inflamable, y tiene una temperatura crítica fácilmente alcanzable (31.C) y una presión crítica de 7,4 MPa (Abate et al., 2020).

Con respecto a la **maquinaria**, aquella común a todos los papers fue un tanque de teñido con un cilindro hueco perforado dentro del cual se aplica presión y temperatura para obtener CO<sub>2</sub> supercrítico. Asimismo, se contó con un separador, el cual recupera la mayor cantidad del FSC luego del subproceso respectivo y elimina el exceso de colorante y otros residuos. En la mayoría de papers los instrumentos más usados son para el control de temperatura, presión e intensidad de color, ya que de estos depende, en gran medida, la calidad y eficiencia del teñido. Una temperatura o presión incorrecta puede hacer que una tela, que se esperaba que sea de primera calidad, pase a ser de segunda o tercera calidad, debido a que se destiñe o no logra la intensidad de color requerido. Según el *Paper 1*, después del teñido, el CO<sub>2</sub> y los tintes sobrantes se recuperan y no se necesita ningún paso de secado, lo cual es económico (Abate et al., 2018).

Con respecto a los **tintes y aditivos** empleados, al emplearse sustratos como algodón y poliéster, los tintes más comunes fueron reactivos (para el algodón) y dispersos (para el poliéster). Los reactivos son colorantes que permiten mediante una reacción covalente adherirse a la fibra en temperaturas de entre 20 y 100°C, mientras que los dispersos actúan comúnmente en un medio ácido (4.5) y son poco solubles en agua a 130°C. Asimismo, se emplearon colorantes naturales que, según el *Paper 3*, poseen propiedades multifuncionales y han sido considerados como agentes de acabado sostenibles y seguros en el desarrollo de textiles funcionales para una variedad de aplicaciones (Abate et al., 2020). En este último caso, usando el método de impregnación con FSC, no fue necesario el uso de mordientes (metales pesados para fijar el colorante en métodos tradicionales). Como punto adicional, según el *Paper 4*, en el teñido supercrítico se espera que la concentración de tinte requerida para un tono específico sea menor que en métodos de teñido húmedos (Abou & Abd, 2017).

En cuanto a los **resultados** en consecuencia de los experimentos, se pudo observar que al aplicar esta novedosa propuesta de teñido con CO<sub>2</sub> supercrítico se obtienen resultados sumamente satisfactorios estando el incremento de la resistencia al lavado y el aumento del rendimiento de color entre los principales hallazgos. Además, se observó la obtención de un tinte uniforme con alta resistencia del color y excelentes propiedades de solidez (cumpliendo ampliamente los requisitos para prendas de vestir), fijación (dependiendo de la variación de tinte utilizado) y profundidad del mismo. Otro aspecto que vale la pena resaltar es una importante mejora en la reducción bacteriana, llegando inclusive a un 60%. Por otro lado, para objetivos de blanqueamiento, se pudo notar un

incremento considerable de blancura a la temperatura de 80°C. Son numerosas las ventajas de la aplicación de este fluido y, sin duda, los aspectos influenciados sumamente relevantes dentro de la industria textil, lo que limitaría la globalización de esta tecnología (mencionado en el *Paper 5*) es la alta inversión de este tipo de sistemas a comparación de los procesos tradicionales; aun así, los beneficios económicos posteriores son importantes ya que el consumo de agua disminuiría excesivamente, así como la generación de aguas residuales (Abou & Abd, 2017).

Finalmente, se plantea para una futura investigación que se lleven a cabo propuestas con el uso de FSC en los subprocesos textiles de modificación de superficies, desencolado, fijado, esponja, neutralizado y suavizado, pues estos son procesos aún sin mucha exploración y que tienen un alto consumo de agua en la producción de prendas.



## CONCLUSIONES

- Mediante una revisión sistemática de literatura, se logró verificar que el uso de fluidos supercríticos en los procesos textiles permite alcanzar una producción más limpia en la industria textil.
- Se determinó un panorama del estado para comprender la aplicabilidad de los fluidos supercríticos en la actualidad detallando maquinarias y métodos validados por los artículos estudiados.
- Se mapearon las fuentes de conocimiento más fiables para dar con la información más confiable luego de aplicar los filtros a la información.
- Como ventaja principal, el uso de fluidos supercríticos en la industria textil permite el ahorro de agua y bajo consumo de energía por ahorrar el proceso de secado. Como desventaja principal, aún hay pocos datos con respecto a la solubilidad de los diferentes tipos de colorante en el CO<sub>2</sub> supercrítico.
- Se determinó que es posible alcanzar una producción más limpia en la industria textil global al 2020 aplicando la tecnología de los fluidos supercríticos en los procesos textiles siendo un aspecto crucial las variables de temperatura, tiempo y presión, las cuales varían en gran medida y necesitar estar predeterminadas según el tipo de sustrato, método, tipo de colorante y subproceso textil a llevar a cabo.
- Se encontró que la razón por que la tecnología supercrítica no se comercializa a gran escala es por los costos altos en los que se debe incurrir en este sistema; sin embargo, los artículos referenciados (gran mayoría publicados recientemente) demuestran el potencial de los FSC y los beneficios económicos que podrán generar su empleo. Además, si los científicos concentran sus esfuerzos en investigar nuevos procesos textiles en los que se pueda dar uso a los fluidos supercríticos, no cabe duda de que se tratará de una tecnología eficiente verde que toda empresa industrial debería pensar en emplear para ser responsables con el medio ambiente.

## REFERENCIAS

- Abate, M. T., Ferri, A., Guan, J., Chen, G. y Nierstrasz, V. (2019). Colouration and bio-activation of polyester fabric with curcumin in supercritical CO<sub>2</sub>: Part I - Investigating colouration properties. *The Journal of Supercritical Fluids*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104548>
- Abate, M. T., Ferri, A., Guan, J., Chen, G., Ferreira, J. A. y Nierstrasz, V. (2019). Single-step disperse dyeing and antimicrobial functionalization of polyester fabric with chitosan and derivative in supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 147, 231-240. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.11.002>
- Abate, M. T., Zhou, Y., Guan, J., Chen, G., Ferri, A. y Nierstrasz, V. (2020). Colouration and bio-activation of polyester fabric with curcumin in supercritical CO<sub>2</sub>: Part II – Effect of dye concentration on the colour and functional properties. *The Journal of Supercritical*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104703>
- Abou Elmaaty, T. y Abd El-Aziz, E. (2017). Supercritical carbon dioxide as a green media in textile dyeing: A review. *Textile Research Journal*, 88(10), 1184-1212. <https://doi-org.ezproxy.ulima.edu.pe/10.1177/0040517517697639>
- Agrawal, B. J. (2015). Supercritical Carbon-dioxide Assisted Dyeing of Textiles: An Environmental Benign Waterless Dyeing Process. *Journal of Innovative Research and Creative Technology*, 1(2). <http://www.ijirct.org/papers/IJIRCT1201043.pdf>
- Aslanidou, D., Tsiptsias, C. y Panayiotou, C. (2013). A novel approach for textile cleaning based on supercritical CO<sub>2</sub> and Pickering emulsions. *The Journal of Supercritical Fluids*, 76, 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2013.02.005>
- Beltrán G, Óscar A. (2005). Revisiones sistemáticas de la literatura. *Revista Colombiana de Gastroenterología*, 20(1), 60-69. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-99572005000100009&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99572005000100009&lng=en&tlng=es).
- Caro, A. (mayo de 2008). *Revisiones Sistemáticas de la Literatura*. [Presentación en PowerPoint]. Universidad del Bío-Bío. <http://www.ubiobio.cl/miweb/webfile/media/182/presentacion/Presentaci%C3%B3n-ColoquioUBB1.pdf>
- Castaños, E. (17 de agosto de 2015). *Cromatografía de fluidos supercríticos*. <https://cienciaonthecrest.com/2015/08/17/cromatografia-de-fluidos-super-criticos/>
- Eren, S., Avinc, O., Saka, Z. y Eren, H. A. (2018). Waterless bleaching of knitted cotton fabric using supercritical carbon dioxide fluid technology.

*Cellulose*, 25(10), 6247-6267. <https://link-springer-com.ezproxy.ulima.edu.pe/article/10.1007/s10570-018-2004-z>

- Fajardo, O. (16 de octubre de 2016). Productos de limpieza para lavandería industrial. *Conocimiento textil*. <https://conocimiento-textil.blogspot.com/2016/10/tintoreria-textil-tenido-colorantes-dispersos-poliester.html>
- Fan, Y., Zhang, Y. Q., Yan, K. y Long, J. J. (2019). Synthesis of a Novel Disperse Reactive Dye Involving a Versatile Bridge Group for the Sustainable Coloration of Natural Fibers in Supercritical Carbon Dioxide. *Advanced Science*, 6(1), 1-14. <https://doi-org.ezproxy.ulima.edu.pe/10.1002/advs.201801368>
- Gao, D., Cui, H. S., Huang, T. T., Yang, D. F. y Lin, J. X. (2014). Synthesis of reactive disperse dyes containing halogenated acetamide group for dyeing cotton fabric in supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 86, 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2013.12.006>
- Guerrero Muñoz, N. (2017). *Estudio de un proceso de extracción e impregnación de extractos naturales en telas de poliéster* [Tesis de licenciatura, Universidad de Cádiz]. Repositorio institucional de la Universidad de Cádiz. <https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/19740>
- Luo, X., White, J., Thompson, R., Rayner, C., Kulik, B., Kazlauciusas, A., He, W. y Lin, L. (2018). Novel sustainable synthesis of dyes for clean dyeing of wool and cotton fibres in supercritical carbon dioxide. *Journal of Cleaner Production*, 199, 1-10. <https://doi-org.ezproxy.ulima.edu.pe/10.1016/j.jclepro.2018.07.158>
- Manterola, C., Astudillo, P., Arias, E. y Claros, N. (2013). Revisiones sistemáticas de la literatura. Qué se debe saber acerca de ellas. *Scopus*. <https://doi.org/10.1016/j.ciresp.2011.07.009>
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (s.f.). *Manual de producción más limpia*. <https://docplayer.es/10773854-Onudi-manual-de-produccion-mas-limpia.html>
- Organización de las Naciones Unidas. (12 de abril de 2019). *El costo ambiental de estar a la moda*. <https://news.un.org/es/story/2019/04/1454161>
- Peñafiel, S. (9 de junio de 2011). *Influencia del suavizado con bases de ácidos grasos en el cambio de matiz en tejidos algodón 100% tinturados con colorantes reactivos de baja reactividad* [Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio institucional de la Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/631>
- Solé, A. (Abril de 2016). Procesos de tinte por agotamiento e impregnación. *Asolengin*. <https://asolengin.files.wordpress.com/2016/04/procesos-de-tintura-por-agotamiento-e-impregnacion3b3n.pdf>
- Yan, K., Zhang, Y. Q., Xiao, H., Shi, M. W. y Long, J. J. (2020). Development of a special SCFX-AnB3L dye and its application in ecological dyeing of silk with

supercritical carbon dioxide. *Journal of CO2 Utilization*, 35, 67-78. <https://doi-org.ezproxy.ulima.edu.pe/10.1016/j.jcou.2019.09.004>

Zhang, J., Zheng, H. y Zheng, L. (2018). Optimization of Eco-Friendly Reactive Dyeing of Cellulose Fabrics Using Supercritical Carbon Dioxide Fluid with Different Humidity. *Journal of Natural Fibers*, 15(1), 1-10. <https://doi-org.ezproxy.ulima.edu.pe/10.1080/15440478.2017.1302385>

Zheng, L. J., Zhang, J., Du, B., Zhao, Y. P. y Ye, F. (2015). Supercritical CO2 for color graphic dyeing: Theoretical insight and experimental verification. *Thermal Science*, 19(4), 1287-1291. <https://doi.org/10.2298/TSCI1504287Z>





## BIBLIOGRAFÍA

- García, M. (10 de octubre de 2015). *Peligra mezclilla mexicana*. Agencia Reforma.  
<https://link-gale-com.ezproxy.ulima.edu.pe/apps/doc/A137397231/IFME?u=ulima&sid=IFME&xid=9853dcc7>
- Hoof, B., Monroy, N. y Saer, A. (2008) *Producción más limpia*. (21 ed.). Alfaomega Colombiana.

