

# Evaluación de las propiedades tribológicas y la viscosidad de un lubricante basado en un nanofluido de sílice (SiO<sub>2</sub>)

## Evaluation of the tribological properties and the viscosity of a lubricant based on a silica nanofluid (SiO<sub>2</sub>)

Pereira, Juan Carlos \*<sup>1</sup>; León, Mairubis <sup>1,3</sup>; Castillo, Jimmy <sup>2</sup>; Labrador, Henry<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Carabobo, Doctorado en Química Tecnológica, Facultad Experimental de Ciencia y Tecnología, Laboratorio PHD, Naguanagua, Carabobo, Venezuela.

<sup>2</sup> Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Laboratorio Espectroscopía Láser Caracas, Venezuela

<sup>3</sup> Industrias Rodanol, S.A. Tinaquillo, Cojedes, Venezuela.

[\\*jcpereir@uc.edu.ve](mailto:*jcpereir@uc.edu.ve)

### Resumen

Los nano fluidos son de gran interés en la investigación de lubricantes, ya que las suspensiones con nanopartículas de sílice gel SiO<sub>2</sub> (1-100 nm) en una base lubricante, han demostrado potencial aplicación tribológica por la reducción del coeficiente de fricción y desgaste. La presente investigación tiene como propósito, evaluar la viscosidad y el comportamiento tribológico de las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> dispersadas en una base lubricante mineral (BS150) a diferentes concentraciones entre 0.50 y 1.25%; Con el fin de disminuir el desgaste de los materiales durante su desempeño. Las pruebas tribológicas se realizaron utilizando el tribómetro basado en la norma ASTM G77, para determinar la carga de escoriación. Los resultados mostraron que las nanopartículas a partir de 1% mejoró su capacidad de carga, en comparación con la base lubricante sin las Nps. La determinación de la viscosidad cinemática, demostró un aumento en las concentraciones 0.75%, 1% y 1.25%. Las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> se obtuvieron a partir de la cáscara de arroz, mediante tratamiento ácido, pirólisis controlada y finalmente el método descendente con molienda mecánica para reducir su tamaño. Asimismo, se caracterizó el tamaño de las nanopartículas SiO<sub>2</sub> mediante DLS, obteniendo un tamaño promedio de 50 nanómetros. Por otro lado, se empleó la técnica XRD en las Nps. Esta investigación demuestra que la aplicación de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> mejoró la película lubricante, ya que aumentó su viscosidad y aumentó la capacidad de carga durante el movimiento de deslizamiento.

**Palabras clave:** cáscara de arroz, nanopartículas, tribología, sílice, extrema presión.

### Abstract

Nanofluids are of great interest in lubricant research, since suspensions with silica gel SiO<sub>2</sub> nanoparticles (1-100 nm) in a lubricant base have shown potential tribological application by reducing the coefficient of friction and wear. The purpose of this research is to evaluate the viscosity and tribological behavior of SiO<sub>2</sub> nanoparticles dispersed in a mineral lubricant base (BS150) at different concentrations between 0.50 and 1.25%; In order to reduce the wear of materials during their performance. The tribological tests were carried out using the tribometer based on the ASTM G77 standard, to determine the slag load. The results showed that the nanoparticles from 1% improved their load capacity, compared to the lubricant base without the Nps. The determination of the kinematic viscosity showed an increase in the concentrations 0.75%, 1% and 1.25%. SiO<sub>2</sub> nanoparticles were obtained from rice husks by acid treatment, controlled pyrolysis and finally the descending method with mechanical grinding to reduce their size. Likewise, the size of the SiO<sub>2</sub> nanoparticles was characterized by DLS, obtaining an average size of 50 nanometers. On the other hand, the XRD technique was used in the Nps. This research demonstrates that the application of SiO<sub>2</sub> nanoparticles improved the lubricant film, since it increased its viscosity and increased the load capacity during the sliding movement.

**Keywords:** rice husk, nanoparticles, tribology, silica, extreme pressure

## 1 Introducción

El uso de nanopartículas (Nps) como aditivos modificadores de fricción y antidesgaste continúan despertando un gran interés en las aplicaciones tribológicas (Sui y col., 2018). Las nuevas tecnologías y los nanomateriales, representan un reto en el campo de los lubricantes, debido a la necesidad creciente de impulsar el desarrollo de productos con tecnología a escala nanométrica, que se adapten a las exigencias de un lubricante de alto desempeño. Nps con dimensiones entre 1 y 100 nm, exhiben propiedades específicas que no están presentes en el material a escala macroscópica. Estas propiedades especiales han sido ampliamente estudiadas y explotadas en electrónica, óptica, almacenamiento magnético de datos, biotecnología, etc. (Díaz y col., 2015).

La dispersión de partículas de tamaño nanométrico en una base lubricante, da como resultado suspensiones coloidales, comúnmente denominados "nano fluidos" (Yue y col., 2015) (Sia y col., 2014); Estos compuestos poseen alta relación entre la superficie y el volumen de la fase dispersada en la matriz. En este sentido, la clave es: la selección, el tamaño y morfología de las Nps, el mecanismo y el tiempo de dispersión, estabilidad a la dispersión, métodos para mejorar la estabilidad de la dispersión y medio de dispersión (Gulzar y col., 2016; Sui y col., 2018).

Las Nps de SiO<sub>2</sub>, son uno de los mejores aditivos verdes para lubricantes por su eficiencia económica y amigable con el medio ambiente, además exhibieron excelentes propiedades como aditivos lubricantes (Wang y Mujumdar 2007; Özerinc y col., 2010; Yu y Xie 2012). Algunas ventajas que potencian el uso de Nps como aditivos lubricantes es su insolubilidad en aceites no polares, su baja reactividad con otros aditivos presentes en el lubricante; alta posibilidad de formación de película en diferentes tipos de superficie, tienen mayor vida útil y soportan altas temperaturas por su alta no volatilidad (Spikes 2015).

La introducción de Nps SiO<sub>2</sub> en aceite de coco modificado químicamente como ésteres ácidos grasos, demuestra buen desempeño tribológico en la reducción de coeficiente de fricción y la reducción de la pérdida de volumen por desgaste. Asimismo, comprueba que la variación de concentración de Nps SiO<sub>2</sub>, influye en el comportamiento reológico por velocidad de corte, en comparación con el aceite de coco sin Nps (Spikes 2015, Rastogi y col., 2021) así como en aceites minerales (Cortes y col., 2019, Mahara y col., 2020).

La SiO<sub>2</sub> se encuentra ampliamente en la ceniza de biomasa (Azat y col., 2019), el análisis químico específicamente de la cáscara de arroz cruda, reporta la composición porcentual del SiO<sub>2</sub> que varía aproximadamente entre el 15 y 22 % (Steven

y col., 2021). Es por ello, que la utilización de la cáscara de arroz para producir bio sílice podría cambiar la producción de sílice gel sintética porque el costo de la cáscara de arroz es bajo (Blissett y col., 2017). Estudios destacan la importancia de eliminar las impurezas orgánicas y metálicas presente en la cáscara, con tratamiento químico por lixiviación ácida que puede ser con HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> antes del pirólisis, especialmente la eliminación de los álcalis nocivos como Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O presentes en la cáscara de arroz ya que favorecen la cristalización (Kwan y col., 2020, Patel 1987). La pirolisis controlada de la cáscara de arroz genera cenizas con alto contenido de SiO<sub>2</sub> (aproximadamente >90%), y algunas impurezas metálicas como hierro (Fe), manganeso (Mn), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg) que influyen en la pureza y el color de la SiO<sub>2</sub> (Yalcin y col., 2001).

Diversas investigaciones han comparado los resultados de lixiviación de las cáscaras de arroz con diferentes ácidos en cuanto a la pureza obtenida del SiO<sub>2</sub>, el área superficial, porosidad y la reducción de metales que estaban presentes en la cáscara de arroz (Zarib 2019). El presente trabajo tuvo como propósito, formular un fluido lubricante con Nps de SiO<sub>2</sub> provenientes de la combustión de la cáscara de arroz para evaluar su comportamiento reológico y tribológico.

## 2 Marco Teórico

### 2.1 La tribología

La tribología se centra en el estudio de tres fenómenos: fricción, desgaste y lubricación. La fricción: es la fuerza o resistencia tangencial al movimiento entre dos o más superficies que están en contacto, y puede tener o no, un medio circundante o película en la interfaz. Esta resistencia depende de la interacción entre puntos de contacto, la penetración de las asperezas características de las superficies y condiciones de operación (Meriam y col., 2016).

Desgaste: Los materiales presentan una determinada rugosidad, conformada por pequeñas crestas y valles, dependiendo del método empleado en la fabricación y acabado de las piezas de los equipos y maquinarias. El desgaste se define como la pérdida progresiva de la superficie de un cuerpo provocada por acción mecánica; y ocurre debido a las interacciones de la superficie en las asperezas durante el movimiento relativo. El desgaste es una respuesta del sistema porque las condiciones de operación afectan el proceso, se cuantifica con el término "tasa de desgaste", que se define como la masa, volumen o pérdida de altura del material removido por unidad de tiempo o distancia de deslizamiento. Los mecanismos de desgaste más resaltantes son el desgaste adhesivo, abrasivo, erosivo, por rozamiento, por fatiga y desgaste corrosivo/oxidativo. Los mecanismos de desgastes más comunes en la industria son el adhesivo y abrasivo; en muchos casos, el desgaste es iniciado por un

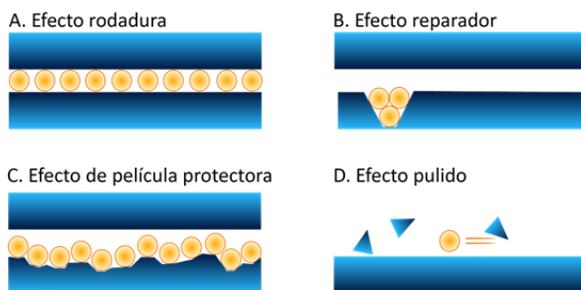
mecanismo y puede continuar por otros mecanismos. Las técnicas para examinar las superficies desgastadas se realizan a través de microscopía electrónica de barrido (SEM), o técnicas analíticas de superficie (Menezes y col., 2013).

**Lubricación:** Es la introducción de una capa o material intermedio entre dos o más superficies en movimiento. Esta capa se llama "película lubricante" y su función es disminuir la fricción y el desgaste de las superficies que están en contacto. Estos materiales intermedios se denominan lubricantes y pueden estar en cualquier estado material: líquido, sólido, gaseoso e incluso semisólido o pastoso.

## 2.2 Mecanismos de lubricación con nanopartículas

Se deben a varios efectos como según Figura 1: Efecto rodadura (A), efecto reparador, efecto de la formación de película protectora y efecto de pulido. El efecto rodadura bajo ciertas condiciones como rugosidad de superficie, dureza y tamaño de nanopartículas que favorece el deslizamiento de las superficies de materiales entre la tribo película. Efecto reparador porque las nanopartículas se depositan en los surcos de la superficie de fricción para rellenarlos y de esta manera reducen la abrasión (Song y col., 2012). El efecto de la formación de película protectora denominada también tribo película; y ocurre por las reacciones entre los material tratado y entorno proporcionado (Gulzar y col., 2015b). Finalmente, el efecto pulido o suavizante, ocurre cuando la rugosidad de la superficie se reduce como consecuencia de la interacción con las nanopartículas (Kalin y col., 2016).

La morfología de las nanopartículas es un factor determinante para el desempeño tribológico. Por ejemplo, las nanopartículas de forma esférica demuestran buena capacidad de carga debido al efecto de cojinetes de bola (Luo y col., 2014) ya que tienen un punto de contacto con respecto a la superficie para soportar la carga. Ahora bien, las nano hojas o nanotubos tienen asociado una forma de contacto tipo línea con respecto a la superficie. Cabe destacar que la forma esférica es la más común (Lee y col., 2009<sup>a</sup>, Luo y col., 2014, Peng y col., 2010a, b).



**Fig. 1.** Efecto de la fricción de las nanopartículas sobre la superficie.

## 3 Procedimiento Experimental

### 3.1 Preparación de la cáscara de arroz para obtener las nanopartículas SiO<sub>2</sub>.

Se obtuvieron las Nps de SiO<sub>2</sub> a partir de la cáscara de arroz en dos etapas: *I Tratamiento ácido:* se realiza tratamiento con ácido (lixiviación) para acelerar la hidrólisis de la celulosa y las hemicelulosas contenidas en cáscaras arroz y eliminando la mayoría de las impurezas metálicas. Esto permite producir ceniza-sílice completamente de color blanco, con elevada superficie específica (Bakar y col., 2016). La cáscara de arroz de origen venezolano, se lavó con abundante agua destilada para eliminar la suciedad y las impurezas solubles en agua. Posteriormente, se trató con una mezcla de ácido acético y ácido cítrico al 15% con agitación mecánica por 24 horas para obtener una cáscara lixiviada. Se filtró la solución y se lavaron las cáscaras con agua desionizada hasta obtener pH 7 según, se filtró y se secó al aire.

*II pirólisis controlada,* se realiza en diferentes etapas: 1era. Se eleva temperatura a 120 °C por 03 horas para eliminar la humedad, 2da. etapa incrementa a 350 °C por 03 horas para degradar celulosa, lignina y otros componentes orgánicos. 3era. etapa se eleva la temperatura a 550 °C por 02 horas para quemar residuos de carbón, y finalmente se lleva la muestra a 700 °C por 03 horas para obtener SiO<sub>2</sub> como se observa en Figura 2. Una vez obtenida la SiO<sub>2</sub>, se molieron para obtener las Nps. Con este proceso se pueden obtener Nps con tamaño de distribución de aproximadamente 40 nm y 78% de porosidad; estas variables se han caracterizado por medio de la microscopía electrónica de barrido (SEM) y DLS según (Castillo y col., 2019).



**Fig. 2** Cáscaras lixiviadas y cenizas de SiO<sub>2</sub>. (Propia, 2022)

### 3.2 Caracterización de las cáscaras de arroz SiO<sub>2</sub>.

*Microscopía óptica,* se empleó para observar la morfología de la superficie de la cascarilla, antes y después de lixiviar.

### 3.3 Caracterización de las nanopartículas $\text{SiO}_2$ lixiviadas con mezcla de ácido cítrico y acético.

*Difracción de rayos (XRD)* para determinar el grado de cristalinidad. Las configuraciones de la medición fueron 30 kV, 10 mA, en rangos de  $7^\circ$ – $100^\circ$ , Tamaño del paso a  $0,02^\circ$   $2\theta$ , Tiempo del paso a 0,5 segundos y temperatura  $22^\circ\text{C}$ .

*Dispersión dinámica de luz DLS* para determinar el tamaño de distribución de las nanopartículas y el tamaño promedio con longitud de onda que opera el láser de 635 nm.

### 3.4 Preparación de nanopartículas ( $\text{SiO}_2$ ) en aceite.

Se agregaron Nps  $\text{SiO}_2$  con un radio hidrodinámico de 30 nm en una base lubricante mineral BS150, en concentración de 0.50%, 0.75%, 1% y 1.25 % con agitación magnética a 200 rpm durante 1 hora en una temperatura entre  $60$ – $80^\circ\text{C}$ .

### 3.5 Efecto de las nanopartículas ( $\text{SiO}_2$ ) en la viscosidad de la base lubricante (BS150).

Se determinó la viscosidad cinemática según ASTM D445 a la base lubricante sin Nps, y con las diferentes concentraciones de Nps de  $\text{SiO}_2$ . Se utilizaron los viscosímetros tipo Ostwald número 600 y 200, a las temperaturas de  $40^\circ\text{C}$  y  $100^\circ\text{C}$  respectivamente. Para efectos de confiabilidad y repetibilidad, el ensayo se repite tres veces y se toma el valor promedio. (Mousavi 2020).

### 3.6 Comportamiento tribológico de nanopartículas ( $\text{SiO}_2$ ) en aceite BS150.

El tribómetro Figura 3, se utiliza para los ensayos estandarizados ASTM G77 que determinan la resistencia de los materiales de acuerdo al desgaste provocado por deslizamiento en contacto lineal. Este equipo consta de un módulo Block-on-Ring con una cámara donde se coloca el nanofluido para lubricar de manera constante el módulo anillo y bloque, mediante la acción de la fuerza centrífuga 1725 rpm. Se aplicaron los siguientes métodos:

*Características de Extrema presión*, el método se aplicó para determinar la carga Ok y la carga de escoriación para las diferentes concentraciones. Cabe destacar que la carga Ok o prueba Ok Timken, ocurre antes de la carga de escoriación; es decir que representa la carga aplicada antes que ocurra el contacto metal con metal, producto del incremento sucesivo de las cargas.

*Características antidesgaste*, bajo condiciones establecidas de carga para cada concentración por 1 hora a 1725 rpm durante 60 min según. Para ello, se colocan las muestras en el timken desde el 0% al 1.25% a las cargas respectivas.

Posteriormente, se determina el desgaste gravimétrico pesando el bloque, previamente lavado y secado, antes del ensayo y luego del mismo. La diferencia del peso corresponde a la pérdida de material por desgaste. Para ello se utilizó Balanza electrónica marca SETRA modelo ESJ200-4 con resolución 0,1 mg.



Fig. 3. Tribómetro para determinar desgaste de superficies. (Propia, 2022)

## 4 Discusión y Resultados

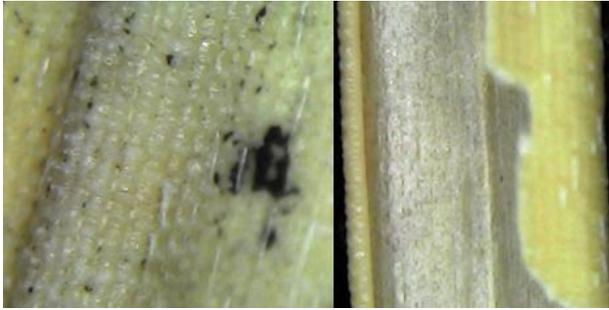
El rendimiento obtenido de  $\text{SiO}_2$  a través del proceso de pirólisis controlada es de 16%; estos valores concuerdan con lo reportado por (Bakar y col., 2016). En esta investigación no se determina la pureza de las nanopartículas  $\text{SiO}_2$  obtenidas; Sin embargo, algunos investigadores (Zarib y col., 2019) compararon la cáscara de arroz sin lixiviar, lixiviada con HCl y lixiviada con ácido cítrico, mejorando la pureza del  $\text{SiO}_2$  desde 82.8% a 99.3% y 98.6%, respectivamente.

### 4.1. Microscopía óptica de las cáscaras de arroz.

La planta de arroz absorbe del suelo el ácido silícico y la acumula alrededor de los micro compartimentos de celulosa (Currie y col., 2007, Tabata y col., 2010). Ahora bien, la parte externa de la cascara de arroz es una membrana silicio-celulosa más dura que la superficie interna, ya que forma una capa protectora contra el ataque de microorganismos, (Yoshida y col., 1962). La cáscara lixiviada en Figura 5, muestran cambios significativos en la superficie, debido a la degradación de la celulosa y reducción de las asperezas, en comparación con la cáscara sin lixiviar (Figura 4) que posee un aspecto más rugoso.



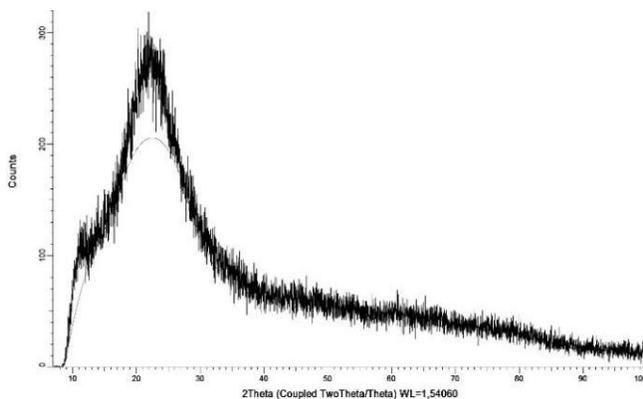
Fig. 4. Cáscara de arroz sin lixiviar. (González, 2022)



**Fig.5** Cascara de arroz lixiviada con mezcla de ácido cítrico/acético. (González, 2022)

#### 4.2 Difracción de Rayos X (XRD) a las Nps SiO<sub>2</sub> lixiviadas con mezcla de ácidos cítrico/acético.

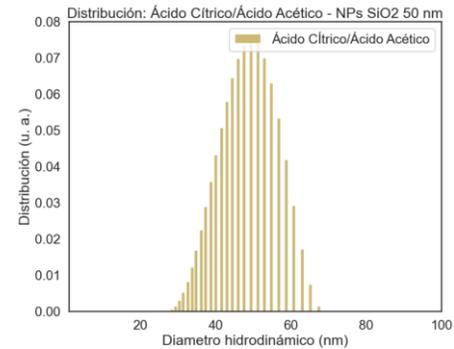
En la Figura 6, para un ángulo en  $2\theta$  presenta un pico agudo y amplio que está centrado en  $22^\circ$  y va desde  $15^\circ$  a  $35^\circ$ , esto demuestra que la sílice obtenida hasta  $700^\circ\text{C}$ , tiene carácter amorfo 80.9%; esto concuerda con los valores obtenidos por (He y col., 2014; Mor y col., 2017). Por otro lado, la ausencia de otros picos estrechos confirma que hubo reducción de impurezas metálicas a través de lixiviación ácida (Hincapié y col., 2018). Ahora bien, la estructura cristalina o amorfa de la sílice depende de la temperatura y el tiempo de calcinación. En efecto, por encima de  $700^\circ\text{C}$  se producen formas cristalinas (Azat y col., 2019) con la presencia de metales alcalinos que favorecen la reacción eutéctica con la sílice (Venezia y col., 2001).



**Fig. 6** XRD de Nps SiO<sub>2</sub> lixiviadas con mezcla de ácidos cítrico/acético. (Servolab, 2022)

#### 4.3 Dispersión dinámica de luz (DLS) de Nps SiO<sub>2</sub>.

El tamaño de Nps por medio ácido, se logró entre 10 y 60 nm con promedio de 50 nm. obteniéndose las Nps de SiO<sub>2</sub> a partir de la cascarrilla de arroz. En la Figura 7 se muestran las distribuciones de tamaño de las Nps.



**Fig. 7** Distribución de tamaño de Nps SiO<sub>2</sub> 50 nm por DLS.

#### 4.4 Viscosidad de base lubricante con nanopartículas de SiO<sub>2</sub>.

Se evaluó la viscosidad cinemática (ASTM D445) a la muestra del lubricante sin Nps (BS150), y a diferentes concentraciones de Nps de SiO<sub>2</sub> ver Tabla I. Se observa que a medida que incrementa la concentración de las Nps SiO<sub>2</sub> en la base lubricante, también aumenta la viscosidad cinemática a  $40^\circ\text{C}$  (Figura 8). A mayor concentración de nanopartículas, aumentan las colisiones y por consecuencia la viscosidad de los nanolubricantes en relación a la base. Esto es debido a la aglomeración de nanopartículas y la formación de agregados y asimétricas en el fluido (Cortes y col., 2019).

**Tabla I** Datos de la viscosidad a diferentes concentraciones. Utilizando el viscosímetro capilar No.600. (Propia, 2022)

Muestra	(%) SiO <sub>2</sub>	Visc. (cSt) a 40 (°C)	Visc. (cSt) a 100 (°C)
BS150	0	540,83	27,63
1	0,5	534,37	27,75
2	0,75	550,90	27,78
3	1	562,68	27,83
4	1,25	566,19	27,89

A  $40^\circ\text{C}$ , se observa que la viscosidad más alta se obtuvo con la concentración máxima de Nps a 1.25%. No obstante, la muestra con 0.50% reporta una caída de la viscosidad en comparación con el lubricante sin Nps según Figura 8. Esto se debe a la baja compatibilidad de las cadenas orgánicas del aceite lubricante con la superficie de las nanopartículas; es decir, por el efecto de la polaridad de las nanopartículas con respecto a la no polaridad de las cadenas orgánicas del aceite lubricante (Sui y col., 2018, Peng y col., 2009).

Un estudio comparó las nanopartículas SiO<sub>2</sub> no funcionalizadas, con nanopartículas SiO<sub>2</sub> funcionalizadas. Ambas se dispersaron a bajas concentraciones (0.05 y 0.1%) en un líquido iónico (1butil3metilimidazolio). La funcionalización de las nanopartículas SiO<sub>2</sub> se llevó a cabo con Octadeciltriclorosilano (OTS). Los autores destacaron que las nanopartículas no funcionalizadas tuvieron un

comportamiento de adelgazamiento por cizalla. Es decir, la viscosidad es dependiente de la tasa de corte a bajas concentraciones (0.05 y 0.1%) mostrando un comportamiento de flujo no Newtoniano y las nanopartículas funcionalizadas presentaron un comportamiento de flujo newtoniano debido al mejoramiento de la estabilidad coloidal con OTS, que redujo las probabilidades de aglomeración entre las mismas partículas. Cabe destacar que cuando se incrementó la concentración de nanopartículas SiO<sub>2</sub> a partir de 1%, se observó un comportamiento de adelgazamiento por cizalla tanto en las nanopartículas funcionalizadas como en las no funcionalizadas. (Cengiz y col., 2016).

Cortes y col., 2019, evaluaron el comportamiento reológico del aceite de coco preparado con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> al 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1% y 1.25%. Demostraron que a concentraciones de 0.75% e inferiores, la viscosidad sometida a una tasa de corte 20 hasta 120 s<sup>-1</sup>, presenta un comportamiento lineal con pendiente casi nula, e incluso más bajos, en comparación con el aceite de coco sin Nps de SiO<sub>2</sub>. Las muestras con concentraciones mayores al 0.75% SiO<sub>2</sub>, presentan mayor viscosidad que la del aceite base; debido a que aumentan las colisiones entre partículas que van generando aglomeraciones y redes fractales (Ueno y col., 2008). Generalmente, los aglomerados persisten a baja tasas de cizallamiento y su disrupción y destrucción a mayor cizallamiento (Bartz 1971)

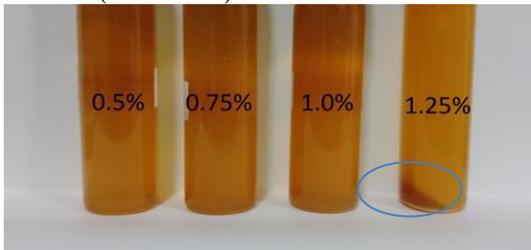


Fig. 7. Muestras de base lubricante mineral BS150 con Nps SiO<sub>2</sub>.

La aglomeración y posteriormente sedimentación de las nanopartículas debido a la gravedad, es una situación no deseada en los nanolubricantes, ya que también afecta la capacidad de reducir la fricción y el desgaste. Por lo tanto, la estabilidad de la dispersión es muy deseable para un desempeño de la lubricación (Lee y col., 2009b, Che 2014)

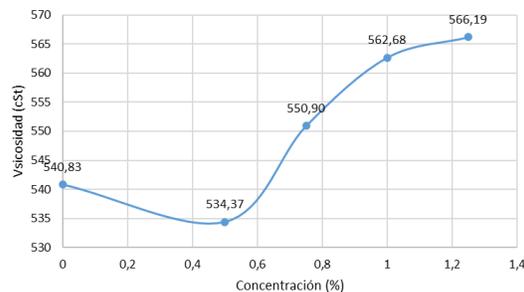


Fig. 8 Viscosidad a 40 °C vs concentración de nanopartículas.

La viscosidad a 100 °C presenta un comportamiento de fluido newtoniano ya que todos los valores aumentan progresivamente con respecto a la concentración de las nanopartículas, evidenciando este fenómeno en la Figura 9; De modo que, cuando la temperatura aumenta, el movimiento de las partículas también aumenta, se reducen las fuerzas moleculares entre el fluido base y la superficie de las nanopartículas y como consecuencia disminuye la viscosidad y la agregación de partículas, esto concuerda con los valores reportados por (Mousavi y col., 2019; Sui y col., 2018). Es por ello que el aumento de la viscosidad a 100 °C, presenta una tendencia lineal con el aumento de las nanopartículas en las muestras.

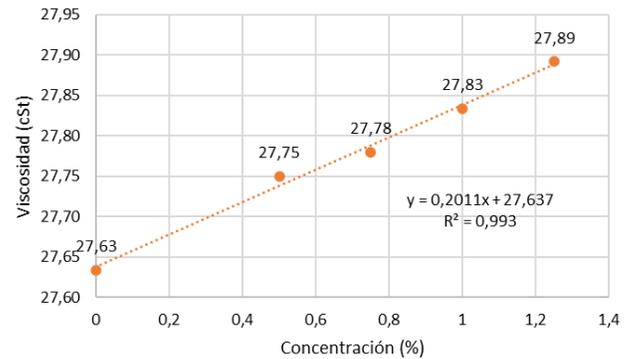
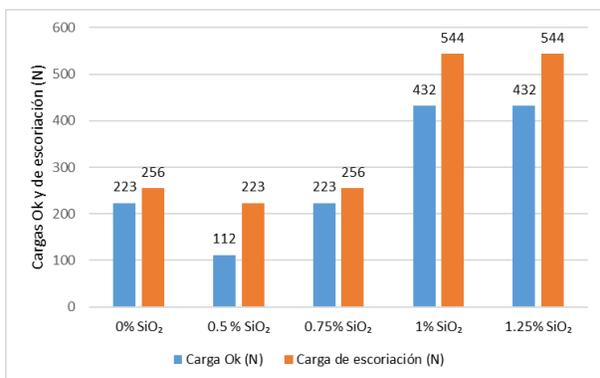


Fig. 9. Viscosidad a 100 °C vs concentración de nanopartículas.

#### 4.5 Comportamiento tribológico de nanopartículas (SiO<sub>2</sub>) en aceite BS150

##### 4.5.1 Características de Extrema presión

En la Figura 10, se observan los resultados obtenidos en el método características de extrema presión que determina la carga Ok y la carga de escoriación para cada concentración de nanopartículas en la base lubricante. Inicialmente, con la concentración 0.50% se observa que la capacidad de carga disminuyó con respecto a la base lubricante sin nanopartículas. En algunos casos, la concentración de las Nps, puede no ser ventajosa, ya que podría aumentar la fricción y el desgaste (Azman y col., 2016). Por el contrario, a medida que aumentan las concentraciones a partir de 1% de Nps SiO<sub>2</sub>, aumenta tanto la capacidad de carga Ok como de escoriación, obteniendo los mejores resultados para las concentraciones de 1 y 1.25%. Los principales mecanismos de lubricación que han ocurrido posiblemente en esta investigación son: el efecto rodadura de las nanopartículas y la formación de la tribo película, debido al deslizamiento relativo de las nanopartículas cuando incrementó las cargas sucesivas hasta obtener las cargas de escoriación.

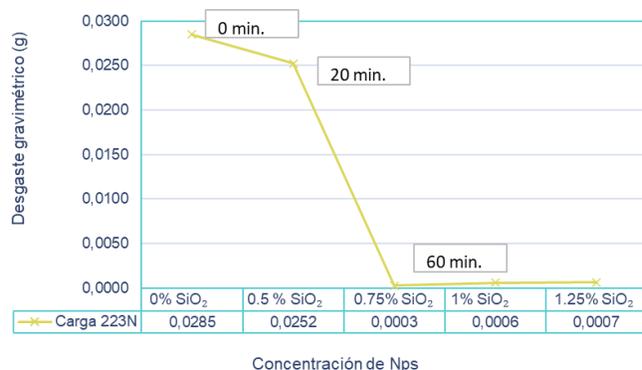


**Fig. 10.** Capacidad de carga Ok vs carga de escoriación para las diferentes concentraciones de nanopartículas de SiO<sub>2</sub>. A 1750 rpm T 25 A 38 °C.

#### 4.5.2 Características antidesgaste

En la Figura 11 se observan las pérdidas de masa (g) por desgaste en el bloque. Se observa que el fluido base sin nanopartículas, no soportó el minuto del ensayo, ya que rompió de manera inmediata la película del lubricante. Por otro lado, la muestra con concentración 0.50% tampoco alcanzó el tiempo del ensayo porque rompió la película lubricante a los 20 minutos, ocasionado desgaste severo. Cabe destacar que las Nps utilizadas en esta investigación, no han sido modificadas para favorecer la estabilidad de dispersión, siendo un factor importante para el buen desempeño del lubricante

A partir de las concentraciones 0,75 % se observa que las Nps, reducen significativamente el desgaste. Peng y col., 2010a, determinaron que la concentración y el tamaño de las Nps de SiO<sub>2</sub> juegan un papel importante en el comportamiento tribológico, ya que diámetros superiores a 281 nm, generan desgaste abrasivo en todas las concentraciones, siendo el tamaño de la partícula un factor determinante para la propiedad antidesgaste.



**Fig. 11.** Desgaste gravimétrico a la carga 223 N vs concentraciones de nanopartículas de SiO<sub>2</sub>. A 1725 rpm durante 60 minutos.

## 5 Conclusiones

La nanopartícula de SiO<sub>2</sub> se obtuvo a partir de la cascara de arroz previamente lixiviada con mezcla de ácido acético y cítrico al 15%. Teniendo un carácter amorfo de 80.9%, demostrando la efectividad del tratamiento ácido para eliminar impurezas metálicas.

Se observaron diferentes comportamientos en la viscosidad cinemática a 40 °C ya que a 0.50 % de Nps de SiO<sub>2</sub> la viscosidad disminuyó; a partir de 0.75% aumentó progresivamente con respecto al aceite base.

La viscosidad a 100 °C no cambió significativamente con el aumento de las Nps de SiO<sub>2</sub>.

La adición de Nps de SiO<sub>2</sub> a partir de 1% mejoró la capacidad de carga Ok y de escoriación.

Las Nps de SiO<sub>2</sub> demostraron una potencial aplicación en las características antidesgaste ya que a partir de 0.75% no hubo desgaste significativo en la superficie de los bloques.

## Referencias

- Sui, T., Ding, M., Ji, C., Yan, S., Wei, J., Wang, A., Zhao, F., & Fei, J. (2018). Dispersibility and rheological behavior of functionalized silica nanoparticles as lubricant additives. *Ceramics International*, 44(15), 18438–18443. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.061>
- López, T. D.-F., González, A. F., Del Reguero, Á., Matos, M., Díaz-García, M. E., Badía-Lafío, R. (2015). Engineered silica nanoparticles as additives in lubricant oils. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16(5), 055005. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/5/055005>
- Yue, D.-C., Ma, T.-B., Hu, Y.-Z., Yeon, J., van Duin, A. C. T., Wang, H., & Luo, J. (2015). Tribochemical Mechanism of Amorphous Silica Asperities in Aqueous Environment: A Reactive Molecular Dynamics Study. *Langmuir*, 31(4), 1429–1436. <https://doi.org/10.1021/la5042663>
- Sia, S. Y., Bassyony, E. Z., & Sarhan, A. A. D. (2014). Development of SiO<sub>2</sub> nanolubrication system to be used in sliding bearings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(5–8), 1277–1284. DOI:10.1007/s00170-013-5566-9
- Wang, X.-Q., & Mujumdar, A. S. (2007). Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010>

- Özerinc, S., Yazıcıođlu, A. G., & Kakac, S. (2010). Convective Heat Transfer Enhancement With Nanofluids: The Effect of Temperature-Variable Thermal Conductivity. *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Volume 2. <https://doi.org/10.1115/ESDA2010-25235>
- Yu, W., Xie, H., Che, L. (2012). *Nanofluids. Smart Nanoparticles Technology. BoD – Books on Demand, 2012. ISBN 9535105000, 9789535105008*
- Spikes, H. (2015). Friction Modifier Additives. *Tribology Letters*, 60(1). <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0589-z>
- Cortes, V., & Ortega, J. A. (2019). Evaluating the Rheological and Tribological Behaviors of Coconut Oil Modified with Nanoparticles as Lubricant Additives. *Lubricants*, 7(9), 76. <https://doi.org/10.3390/lubricants7090076>
- Mahara, M., & Singh, Y. (2020). Tribological analysis of the neem oil during the addition of SiO<sub>2</sub> nanoparticles at different loads. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1412–1415. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.813>
- Azat, S., Korobeinyk, A. V., Moustakas, K., & Inglezakis, V. J. (2019). Sustainable production of pure silica from rice husk waste in Kazakhstan. *Journal of Cleaner Production*, 217, 352–359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.142>
- Steven, S., Restiawaty, E., & Bindar, Y. (2021). Routes for energy and bio-silica production from rice husk: A comprehensive review and emerging prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111329>
- Blissett, R., Sommerville, R., Rowson, N., Jones, J., & Laughlin, B. (2017). Valorisation of rice husks using a TORBED® combustion process. *Fuel Processing Technology*, 159, 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.01.046>
- Kwan, W. H., & Wong, Y. S. (2020). Acid leached rice husk ash (ARHA) in concrete: A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 501–507. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.05.001>
- Yalçın, N., & Sevinç, V. (2001). Studies on silica obtained from rice husk. *Ceramics International*, 27(2), 219–224. [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00068-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00068-7)
- Gulzar, M., Masjuki, H., Varman, M., Kalam, M., Mufti, R. A., Yunus, R., & Zahid, R. (2015). AW/EP behavior of WS<sub>2</sub> nanoparticles added to vegetable oil-based lubricant. In: *Proceedings of Malaysian International Tribology Conference. Malaysian Tribology Society*. 194–195. DOI 10.1007/s11051-016-3537-4
- Bakar, R. A., Yahya, R., & Gan, S. N. (2016). Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk. *Procedia Chemistry*, 19, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.092>
- Patel, M., Karera, A., & Prasanna, P. (1987). Effect of thermal and chemical treatments on carbon and silica contents in rice husk. *Journal of Materials Science*, 22(7), 2457–2464. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01082130>
- Castillo, J., Vargas, V., Gonzalez, G., Ruiz, W., & Bouyssiere, B. (2020). Evidence of selective asphaltene subfraction adsorption on SiO<sub>2</sub> nanoparticles studied by UV-vis absorbance and fluorescence spectroscopy. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 43(6), 873–879. <https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1845956>
- Mousavi, S. B., Heris, S. Z., & Estellé, P. (2020). Experimental comparison between ZnO and MoS<sub>2</sub> nanoparticles as additives on performance of diesel oil-based nano lubricant. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62830-1>
- Mohan Rastogi, P., Kumar, R., & Kumar, N. (2021). Effect of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on the tribological characteristics of jatropha oil. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10109–10112. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.377>
- Zarib, N. S. M., Abdullah, S. A., & Jamil, N. H. (2019). Extraction Of Silica From Rice Husk Via Acid Leaching Treatment. *The European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. <https://doi.org/10.15405/epsbs.2019.05.02.16>
- Ma, X., Zhou, B., Gao, W., Qu, Y., Wang, L., Wang, Z., & Zhu, Y. (2012). A recyclable method for production of pure silica from rice hull ash. *Powder Technology*, 217, 497–501. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.11.009>
- Santana Costa, J. A., & Paranhos, C. M. (2018). Systematic evaluation of amorphous silica production from rice husk ashes. *Journal of Cleaner Production*, 192, 688–697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.028>
- Hossain, S. S., Mathur, L., Bhardwaj, A., & Roy, P. K. (2019). A facile route for the preparation of silica foams using rice husk ash. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 16(3), 1069–1077. <https://doi.org/10.1111/ijac.13164>
- Sarikaya, M., Depci, T., Aydogmus, R., Yucel, A., & Kizilkaya, N. (2016). Production of Nano Amorphous SiO<sub>2</sub> from Malatya Pyrophyllite. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 44, 052004. DOI 10.1088/1755-1315/44/5/052004
- Lee, T., Othman, R., & Yeoh, F.-Y. (2013). Development of photoluminescent glass derived from rice husk. *Biomass and Bioenergy*, 59, 380–392. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.028>
- Peng, D. X., Kang, Y., Hwang, R. M., Shyr, S. S., & Chang, Y. P. (2009). Tribological properties of

- diamond and SiO<sub>2</sub> nanoparticles added in paraffin. *Tribology International*, 42(6), 911–917. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.12.015>
- Yegin, C., Lu, W., Kheireddin, B., Zhang, M., Li, P., Min, Y., Sue, H.-J., Murat Sari, M., & Akbulut, M. (2017). The Effect of Nanoparticle Functionalization on Lubrication Performance of Nanofluids Dispersing Silica Nanoparticles in an Ionic Liquid. *Journal of Tribology*, 139(4). <https://doi.org/10.1115/1.4035342>
- Ueno, K., Inaba, A., Kondoh, M., & Watanabe, M. (2008). Colloidal Stability of Bare and Polymer-Grafted Silica Nanoparticles in Ionic Liquids. *angmuir*, 24(10), 5253–5259. <https://doi.org/10.1021/la704066v>
- Bartz, W. J. (1971). Solid lubricant additives—effect of concentration and other additives on anti-wear performance. *Wear*, 17(5–6), 421–432. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(71\)90048-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(71)90048-2)
- Lee, J., Cho, S., Hwang, Y., Cho, H.-J., Lee, C., Choi, Y., Ku, B.-C., Lee, H., Lee, B., Kim, D., & Kim, S. H. (2009). Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement in friction surfaces. *Tribology International*, 42(3), 440–447. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2008.08.003>
- Lee, K., Hwang, Y., Cheong, S., Choi, Y., Kwon, L., Lee, J., & Kim, S. H. (2009). Understanding the Role of Nanoparticles in Nano-oil Lubrication. *Tribology Letters*, 35(2), 127–131. DOI 10.1007/s11249-009-9441-7
- Peña-Parás, L., Taha-Tijerina, J., Garza, L., Maldonado-Cortés, D., Michalczewski, R., & Lapray, C. (2015). Effect of CuO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additives on the tribological behavior of fully formulated oils. *Wear*, 332–333, 1256–1261. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.038>
- Luo, T., Wei, X., Huang, X., Huang, L., & Yang, F. (2014). Tribological properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles as lubricating oil additives. *Ceramics International*, 40(5), 7143–7149. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.ceramint.2013.12.050>
- Lee, C.-G., Hwang, Y.-J., Choi, Y.-M., Lee, J.-K., Choi, C., & Oh, J.-M. (2009). A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 10(1), 85–90. <https://doi.org/10.1007/s12541-009-0013-4>
- Peng, D., Chen, C., Kang, Y., Chang, Y., & Chang, S. (2010). Size effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles as oil additives on tribology of lubricant. *Industrial Lubrication and Tribology*, 62(2), 111–120. <http://dx.doi.org/10.1108/00368791011025656>
- Peng, D., Kang, Y., Chen, S., Shu, F., & Chang, Y. (2010). Dispersion and tribological properties of liquid paraffin with added aluminum nanoparticles. *Industrial Lubrication and Tribology*, 62(6), 341–348. <http://dx.doi.org/10.1108/00368791011076236>
- Azman, S. S. N., Zulkifli, N. W. M., Masjuki, H., Gulzar, M., & Zahid, R. (2016). Study of tribological properties of lubricating oil blend added with graphene nanoplatelets. *Journal of Materials Research*, 31(13), 1932–1938. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.24>
- Nayak, P. P., & Datta, A. K. (2020). Synthesis of SiO<sub>2</sub>-Nanoparticles from Rice Husk Ash and its Comparison with Commercial Amorphous Silica through Material Characterization. *Silicon*, 13(4), 1209–1214. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00509-y>
- Gulzar, M., Masjuki, H., Varman, M., Kalam, M., Mufti, R. A., Zulkifli, N., Yunus, R., & Zahid, R. (2015). Improving the AW/EP ability of chemically modified palm oil by adding CuO and MoS<sub>2</sub> nanoparticles. *Tribology International*, 88, 271–279. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.03.035>
- Song, X., Zheng, S., Zhang, J., Li, W., Chen, Q., & Cao, B. (2012). Synthesis of monodispersed ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and their tribology properties as lubricant additives. *Materials Research Bulletin*, 47(12), 4305–4310. <http://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2012.09.013>
- Kalin, M., Kogovšek, J., & Remškar, M. (2012). Mechanisms and improvements in the friction and wear behavior using MoS<sub>2</sub> nanotubes as potential oil additives. *Wear*, 280–281, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.01.011>
- He, J.-R., Kuo, W.-C., Su, C.-S., & Lin, H.-P. (2014). Isolation of Bio-Mesoporous Silica from Rice Husk. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 61(7), 836–840. <https://doi.org/10.1002/jccs.201300658>
- Mor, S., Manchanda, C. K., Kansal, S. K., & Ravindra, K. (2017). Nanosilica extraction from processed agricultural residue using green technology. *Journal of Cleaner Production*, 143, 1284–1290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.142>
- Hincapié-Rojas, D. F., Pineda-Gomez, P., & Rosales-Rivera, A. (2018). Synthesis and characterisation of submicron silica particles from rice husk. *Green Materials*, 6(1), 15–22. <https://doi.org/10.1680/jgrma.17.00019>
- Venezia, A. M., La Parola, V., Longo, A., & Martorana, A. (2001). Effect of Alkali Ions on the Amorphous to Crystalline Phase Transition of Silica. *Journal of Solid State Chemistry*, 161(2), 373–378. <https://doi.org/10.1006/jssc.2001.9345>
- Engineering Mechanics. Vol.1, Statics, 8th edition. Friction Chapter 6. Pag. 332–336. ISBN: 978-1-119-04467-3 Meriam, L., Krige, J., Bolton, J. (2016).

- Menezes, P. L., Nosonovsky, M., Kailas, S. V., & Lovell, M. R. (2013). Friction and Wear. *Tribology for Scientists and Engineers*, 43–91. Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1945-7>
- Harris, T.; Kotzalas, M. N. (2006). Lubricants and Lubrication Techniques. *Essential Concepts of Bearing Technology*, 273–294. Boca raton. <https://doi.org/10.1201/9781420006599>
- Currie, H. A., & Perry, C. C. (2007). Silica in Plants: Biological, Biochemical and Chemical Studies. *Annals of Botany*, 100(7), 1383–1389. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm247>
- Tabata, S., Iida, H., Horie, T., & Yamada, S. (2010). Hierarchical porous carbon from cell assemblies of rice husk for in vivo applications. *MedChemComm*, 1(2), 136. <https://doi.org/10.1039/C0MD00011F>
- Yoshida, S., Ohnishi, Y., & Kitagishi, K. (1962). Chemical Forms, Mobility and Deposition of Silicon in Rice Plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, 8(3), 15–21. <https://doi.org/10.1080/00380768.1962.10430992>
- Grupo SERVOLAB. (2022). Velazco, E. UD-304, Parque Industrial los Pinos, Calle 5, Manzana 36, Galpón30, Puerto Ordaz, Edo. Bolívar [laboratorio@servolab.com.ve](mailto:laboratorio@servolab.com.ve). <http://www.servolab.com.ve/>

**Recibido:** 28 de junio 2022

**Aceptado:** 05 de octubre 2022

**Pereira, Juan:** Dr. en ciencias aplicadas. Director del Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados (PHD). Profesor Titular Universidad de Carabobo (Carabobo-Venezuela) y consultor industrial en fenómenos interfaciales.  <https://orcid.org/000-0003-4600-726X>

**Labrador, Henry:** Dr. en Química. Investigador del Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados (PHD). Profesor Titular Universidad de Carabobo (Carabobo-Venezuela). Correo electrónico: [hjlabrad@uc.edu.ve](mailto:hjlabrad@uc.edu.ve)  <https://orcid.org/0000-0002-8500-3379>

**Castillo, Jimmy:** Dr. en Química. Profesor Titular Universidad Central de Venezuela (UCV). Correo electrónico: [castillojimmy@gmail.com](mailto:castillojimmy@gmail.com)  <https://orcid.org/0000-0002-6038-1074>

**León, Mairubis:** Ingeniero Petroquímico egresado de la UNEFA. Estudiante del Doctorado Química Tecnológica de la Universidad de Carabobo. Correo electrónico: [mairubis.leon@gmail.com](mailto:mairubis.leon@gmail.com)  <https://orcid.org/0000-0002-0596-7398>