



Fachhochschule Köln
Cologne University of Applied Sciences



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTADES DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

AND

COLOGNE UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
INSTITUTE FOR TECHNOLOGY AND RESOURCES MANAGEMENT IN THE TROPICS AND SUBTROPICS

**REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS MEDIANTE BIOPOLÍMEROS NATURALES:
EFECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA.**

THESIS TO OBTAIN THE DEGREE OF
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
DEGREE AWARDED BY
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
AND
MASTER OF SCIENCE
TECHNOLOGY AND RESOURCES MANAGEMENT IN THE TROPICS AND SUBTROPICS
IN THE SPECIALIZATION: RESOURCES MANAGEMENT
DEGREE AWARDED BY COLOGNE UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

PRESENTS:

I.A. ELIZABETH SALAZAR HERNÁNDEZ

CO-DIRECTOR OF THESIS PMPCA
DR. PAOLA ELIZABETH DÍAZ FLORES

CO-DIRECTOR OF THESIS ITT:
PROF. DR. MICHAEL STURM

ASSESSOR:
DR. ELSA CERVANTES GONZÁLEZ

PROYECTO FINANCIADO POR:

Remoción simultánea de fenol y plomo sobre telas de carbón activado: Modificación, caracterización y superficies de adsorción. PROMEP 103.5/09/4244 y PROMEP 103.5/10/5475

PROYECTO REALIZADO EN:

PMPCA

COORDINACIÓN ACADÉMICA REGIÓN ALTIPLANO (COARA).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

CON EL APOYO DE:

**DEUTSCHER AKADEMISCHER AUSTAUSCH DIENST (DAAD)
CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT)**

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO A TRAVÉS DEL PROGRAMA NACIONAL
DE POSGRADOS (PNPC - CONACYT)**

Erklärung / Declaración

Name / Nombre: **Elizabeth Salazar Hernández.**

Matri.-Nr. / N° de matrícula: **11081380 (CUAS), 0191568 (UASLP)**

Ich versichere wahrheitsgemäß, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Aseguro que yo redacté la presente tesis de maestría independientemente y no use referencias ni medios auxiliares a parte de los indicados. Todas las partes, que están referidas a escritos o a textos publicados o no publicados son reconocidas como tales.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.

Hasta la fecha, un trabajo como éste o similar no ha sido entregado como trabajo de tesis.

San Luis Potosí, den /el 7 de agosto de 2012

Unterschrift / Firma: Elizabeth Salazar Hdez.

Ich erkläre mich mit einer späteren Veröffentlichung meiner Masterarbeit sowohl auszugsweise, als auch Gesamtwerk in der Institutsreihe oder zu Darstellungszwecken im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Institutes einverstanden.

Estoy de acuerdo con una publicación posterior de mi tesis de maestría en forma completa o parcial por las instituciones con la intención de exponerlos en el contexto del trabajo investigación de las mismas.

Unterschrift / Firma: Elizabeth Salazar Hdez.

RESUMEN

En esta investigación se presenta la evaluación de un biopolímero natural (plumas de pollo) como sorbente de hidrocarburos. Las plumas de pollo tienen un comportamiento hidrofóbico y están compuestas por una red de fibras de queratina que forman una gran cantidad de espacios intersticiales. Existen reportes de que las plumas de pollo poseen una alta área específica favoreciendo tanto la velocidad de absorción de hidrocarburo como los procesos de adsorción.

El desarrollo experimental consistió en realizar diferentes pruebas descritas por la norma ASTM F-276: "Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents". Estas pruebas fueron escaladas para un sistema experimental más reducido y mostraron la capacidad de retención ideal del sorbente y el desempeño de éste en condiciones estáticas y dinámicas. Los experimentos se llevaron a cabo con tres diferentes hidrocarburos: petróleo crudo (hidrocarburo medio), diesel y gasolina (hidrocarburos livianos).

Las capacidades de retención de hidrocarburos de las plumas de pollo fueron mayores que las de varios sorbentes orgánicos naturales que han sido estudiados con este fin. Los resultados obtenidos mostraron que la mejor capacidad de retención se obtuvo para el petróleo con 20.5 g/g sorbente, seguido por el diesel con 9.6 g/g sorbente y finalmente la gasolina con 6.2 g/g sorbente. La disminución en el tamaño del biopolímero de plumas completas a plumas cortadas en segmentos de 1 cm aumentó considerablemente las capacidades de retención a 34.6 g/g sorbente para el petróleo crudo, 12.6 g/g sorbente para el diesel y 10.7 g/g sorbente para la gasolina.

El tiempo óptimo de retención del hidrocarburo fue de 2 min, lo que permite que al usar este sorbente las operaciones de respuesta sean lo suficientemente rápidas para evitar la expansión de la mancha de hidrocarburo y la contaminación de zonas vulnerables.

Las pruebas de desempeño mostraron resultados favorables para el biopolímero ya que las plumas tuvieron mayor afinidad por el hidrocarburo en comparación con las mostradas para el agua. La capacidad de flotación del complejo sorbente-hidrocarburo también quedó demostrada tanto en condiciones estáticas como dinámicas.

Además de su buen desempeño, la abundancia, disponibilidad y bajo costo de este subproducto de la industria avícola lo hacen un excelente material sorbente. Otra de las ventajas del uso de las plumas de pollo es su biodegradabilidad, lo que las hace un sorbente ambientalmente amigable y por otro lado, elimina los costos adicionales de almacenamiento o disposición final que tienen los materiales sorbentes sintéticos.

ABSTRACT

This research presents the evaluation of a natural biopolymer (chicken feathers) as oil sorbent. Chicken feathers have a hydrophobic behavior and consist of a complex network of keratin fibers with a large amount of interstitial spaces. This structure with high surface area promotes both oil absorption rates and oil adsorption processes.

The experimental methodology consisted of an adaptation of various tests described by the ASTM F-276: "Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents." These tests were scaled to a smaller experimental system and showed the ideal retention capacity of the sorbent and the performance of the sorbent material in static and dynamic conditions. The experiments were carried out with three different types of hydrocarbons: crude oil (hydrocarbon medium), diesel and gasoline (light hydrocarbons).

Oil retention capacities of the chicken feathers were higher than those of several natural organic sorbents that have been studied for this purpose. The results showed that the best retention capacity was obtained for crude oil with 20.5 g/g sorbent, followed by diesel with 9.6 g/g sorbent and finally gasoline with 6.2 g/g sorbent. The reduction in size of the biopolymer from entire feathers to 1 cm pieces feathers increased significantly retention capacities to 34.6 g/g sorbent for crude oil, 12.6 g/g sorbent for diesel and 10.7 g/g sorbent for gasoline.

The optimal retention time for the biopolymer was 2 min. This short optimal retention time allows the response operations to be fast enough to prevent the spread of the oil slick and to protect sensitive areas from oil pollution.

Performance tests showed favorable results for the biopolymer: feathers presented higher affinity for hydrocarbon than for water and the buoyancy of the sorbent-hydrocarbon complex was also demonstrated for static and dynamic conditions.

Besides its good performance, the abundance, availability and low cost of this byproduct of the poultry industry makes it an excellent sorbent material. Another advantage of the use of chicken feathers is their biodegradability which allows chicken feathers to be an environmentally friendly sorbent and on the other hand, to eliminate the additional costs of storage or disposal for synthetic sorbent materials.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Forschung zeigt die Auswertung eines natürlichen Biopolymer (Hühnerfedern) als Öl-Sorbens. Die Hühnerfedern haben eine hydrophobe Verhalten und sie sind aus einem Netzwerk von Keratinfasern bestehen, die eine große Menge von Zwischenräumen bildet. Diese Struktur mit großer Oberfläche favorisiert die Absorption und Adsorption Prozesse.

Experimentelle Methodologie in verschiedene Tests bestand, die von ASTM F-276: "Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents" schildern sind. Diese Tests wurden auf einen kleineren experimentellen System skaliert und zeigte die ideale Rückhaltevermögen des Sorptionsmittels und die Leistung des Sorbensmaterial in statischen und dynamischen Bedingungen. Die Experimente wurden mit drei verschiedenen Kohlenwasserstoffen durchgeführt: Rohöl (Kohlenwasserstoff-Medium), Diesel und Benzin (leichte Kohlenwasserstoffe).

Rückhaltevermögen der Hühnerfedern waren höher als die von mehreren natürlichen organischen Sorptionsmittel, die für diesen Zweck untersucht worden sind. Die Ergebnisse zeigten, dass die beste Rückhaltevermögen für Rohöl mit 20,5 g/g Sorptionsmittel wurde, die Dieselmückhaltevermögen war 9,6 g/g Sorptionsmittel und schließlich Benzin mit 6,2 g/g Sorptionsmittel wurde. Die Verringerung der Größe des Biopolymer aus kompletten Federn zu 1 cm große Stücke Federn deutlich gestiegen Rückhaltevermögen auf 34,6 g/g Sorptionsmittel für Rohöl, 12,6 g/g Sorptionsmittel für Diesel und 10,7 g g Sorbens für Benzin.

Die optimale Verweilzeit für die Biopolymer betrug 2 min. Diese kurze optimale Verweilzeit ermöglicht den Reaktion Operationen schnell genug sein, um die Ausbreitung des Ölpest zu verhindern und sensible Bereiche von Ölverschmutzungen zu schützen.

Die Leistungstests zeigten positive Ergebnisse für das Biopolymer: Federn ergab höhere Affinität für Kohlenwasserstoffe als für Wasser und Der Auftrieb des Sorptionsmittel-Kohlenwasserstoff Komplex wurde auch für statischen und dynamischen Bedingungen nachgewiesen.

Neben seine gute Leistung, macht die Abundanz, die Verfügbarkeit und niedrigen Kosten dieses Produkt von der Geflügelindustrie es eine ausgezeichnete Sorptionsmittel. Ein weiterer Vorteil der Verwendung von Hühnerfedern ist ihre biologische Abbaubarkeit. Das macht Hühnerfedern einen umweltfreundlichen Sorptionsmittel und beseitigen die zusätzlichen Kosten für Lagerung oder Entsorgung für synthetischen Sorptionsmittel.

EXTENDED SUMMARY

1. Introduction.

Oil is one of the most important energy and raw material source for synthetic polymers and chemicals worldwide. Whenever oil is explored, transported and stored there is risk of spillage with the potential to cause significant environmental impact. Oil spills affect sea life, economy, tourism and leisure activities (Annunciado *et.al.*, 2005).

Several processes are carried out when oil is spilled into the sea such as: weathering, spreading, evaporation, dissolution, dispersion, oxidation, emulsification, sedimentation and biodegradation (ITOPF, 2011). Some of these processes may hinder the recovery of oil from the sea. Therefore, the quick mechanical recovery of spilled oil is essential during the oil-spill response (Wei *et. al.*, 2003).

One of the most efficient methods for mechanical recovery is the use of oil sorbents. Oil sorbents are able to concentrate oil and they can be removed from the water and handled in a suitable manner (Lim and Huang, 2007). Some properties of good sorbent materials include: hydrophobicity and oleophilicity, high oil sorption capacity, fast oil sorption, low water pick up and high buoyancy (Adebajo *et. al.*, 2003). Sorbent materials should be also inexpensive and readily available (Lim and Huang, 2007).

Sorbent materials can be classified in three general categories: natural organic (include peat moss, straw, hay, sawdust, ground corncobs), natural inorganic (consist of clay, perlite, vermiculite, glass wool, sand, or volcanic ash) and synthetic (such as polyurethane, polyethylene, and polypropylene) (USEPA, 2011).

Nowadays, most commercial sorbent materials are synthetic products such as polypropylene and polyurethane. Nevertheless, they are non-biodegradable and they require an extra investment for containment or landfill (Lim and Huang, 2007).

Poultry industry production in Mexico has increased in 85 % over the past ten years (SIAP, 2010). Chicken feathers represent from four to six percent of the total weight of mature chickens and, as a consequence, they are a waste product generated in large quantities from commercial poultry industry (De la Rosa, *et. al.*, 2008). The generation of chicken feathers in Mexico in 2010 reached 200,000 tons. Furthermore, their interwoven keratin fiber structure, low weight, mechanical resistance, insolubility in water and hydrophobic character makes the chicken feathers an ideal material for testing oil sorption (Roig *et. al.*, 2003; Kar and Misra, 2004).

2. Experimental Methods.

2.1. Chicken feathers preparation.

Chicken feathers were obtained from a poultry plant located in El Grande, municipality of Coatepec, Veracruz. Prior to use, feathers were washed with detergent, rinsed several times with potable water and finally sun dried.

2.2. Feathers classification.

Due to the heterogeneity of the biopolymer, its classification was necessary to carry out the sorption experiments. The classification attended to the size of the feathers and the thickness and distribution of the rachis. According to these features 5 different groups were formed to work with the biopolymer (FT-1, FT-2, FT-3, FT-4 and FT-5). Features of each type of feathers as the length and thickness of rachis were determined by the average of 10 measurements for each type of feathers.

2.3. Determination of oil retention capacity.

The methodology for determining oil retention capacity is an adaptation of the ASTM F 726-99 standard: Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents section Oil Adsorption Short Test.

For FT-1, FT-2 and FT-3 a sample of 0.05 g was weighed, for FT-4 and FT-5 a complete feather was weighed on an analytical balance Ohaus Pioneer PA214. Each sample was placed in a small tray containing the hydrocarbon and then allowed to float freely for 1 minute \pm 20 seconds. After this time, the sample was removed and drained for 1 minute \pm 20 seconds with a polyacrylonitrile net. The sample was removed from the net and weighed again. This operation was repeated 5 times for each feather type. The retention capacity was calculated by the following formula:

$$CR = \frac{m_t - m_0}{m_0}$$

where: CR is the retention capacity, m_t is the weight of the hydrocarbon-impregnated feathers and m_0 is the weight of the dry sorbent.

Same experiments were repeated for crude oil (medium density hydrocarbon), diesel and gasoline (low density hydrocarbons).

2.4. Study of the effect of the feather size.

In order to determine the effect of the particle size on the retention capacity, a batch of feathers (FT-1 cm) was cut into 1 cm pieces and then blended with distilled water

and dried in an oven at 50 °C. Retention capacity for FT-1 cm was calculated using the same methodology described for entire feathers.

2.5. Relationship between rachis percentage and retention capacity.

Vanes and rachis retention capacity were calculated for the three hydrocarbons (crude oil, diesel and gasoline). Both the rachis and the vanes used for this study were taken from FT-1, FT-2 and FT-3 and the rachis was cut into 1 cm segments. In addition, for each type of feather the percentage by weight of rachis was determined and related with its retention capacity using a rachis percentage vs. retention capacity graphic.

2.6. Determination of optimal retention time.

To determine the optimal retention time of the biopolymer, retention capacity was calculated according the methodology described above at the following times: 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 30 min and 1 h.

2.7. Test for performance properties.

This procedure is an adaptation of ASTM F 726-99: Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents section Dynamic Degradation Test and is designed to test water take-up and to determine the oleophilic properties of the sorbent material under dynamic conditions.

A 2L beaker was half-filled with water and then 0.6 g of the sorbent material was gently and evenly placed on the water surface. The container was then sealed and mounted on a shaker, set at a frequency of 100 cycles per minute for 15 min. The contents of the beaker were allowed to settle for a period of 2 min. Observations pertaining to the conditions of the sorbent material and the conditions of the water were recorded.

The content of the beaker were filtered and after a drain period of 30 s the sorbent sample was weighed. The water pick-up ratio was calculated from the weight measurements in a similar manner to the oil retention capacity.

In the second part of the test, the beaker was half-filled with water and oil was added. The adsorbent sample was returned to the beaker which was then sealed. The jar was again mounted on a shaker table at a frequency of 100 cycles per minute by 15 min. The contents of the beaker were allowed to settle for a period of 2 min, at this time observations were noted. This test was carried out with different conditions: with complete feathers (a mixture of FT-1, FT-2 and FT-3) and FT-1 cm as well as with fresh water and a 1 M NaCl water solution.

3. Results and discussions.

3.1 Feathers classification.

Feathers were classified in five groups according to their length and rachis thickness and distribution. Figure 1 shows the different groups of feathers and Table 1 summarizes the characteristics of each group.



Figure 1. Types of feathers.

Table 1. Characteristics of the types of feathers.

Type of feathers	Average length (cm)	Rachis thickness (mm)	Rachis percentage
FT-1	5	0.63	14
FT-2	7	0.96	17.5
FT-3	7	1.20	34.5
FT-4	10	2.25	48.4
FT-5	13	2.77	67.5

3.2. Crude oil retention capacity.

Figure 2 shows the crude oil retention capacities for each type of feather, FT-1 cm and for vanes and rachis. The results are presented in grams of hydrocarbon per gram of sorbent.

Vanes and FT-1 cm showed the highest retention capacity: 36.4 g/ g sorbent and 34.6 g/g sorbent, respectively. For FT-1, FT-2, FT-3, FT-4 AND FT-5 the average retention capacities were 20.5 g/g sorbent, 19.9 g/g sorbent, 16.7 g/g sorbent, 5.9 g/g and 2.7 g/g sorbent respectively. The rachis showed the lowest sorption capacity: only 2.1 g/g sorbent. The performances of the entire feathers compared with vanes were: 56 % for FT-1, 55 % for FT-2, 46 % for FT-3, 16 % for FT-4 and 7 % for FT-5. The rachis presented just 6 % of vanes oil retention capacity.

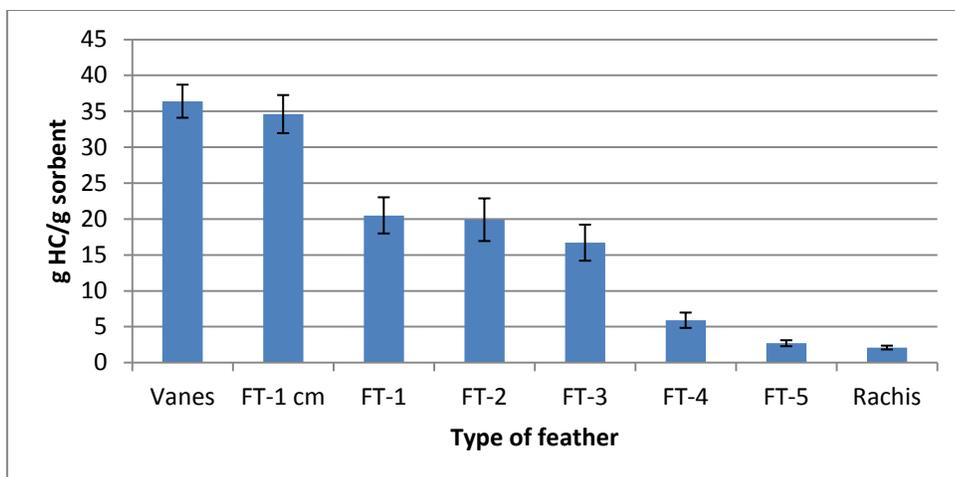


Figure 2. Crude oil retention capacity.

3.3. Diesel retention capacity.

Figure 3 shows the results of sorption experiments with diesel.

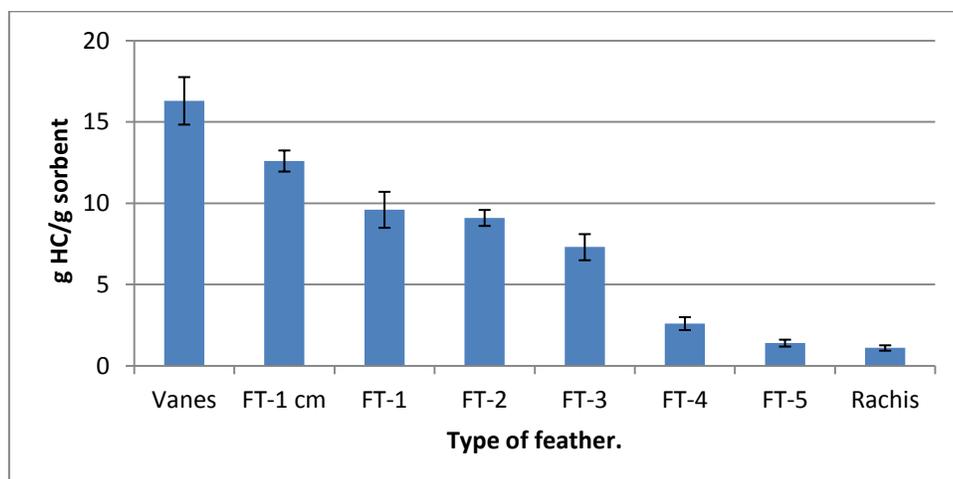


Figure 3. Diesel retention capacity.

The best results were obtained for vanes and FT-1 cm with retention capacities of 16.3 g/g sorbent and 12.6 g/g sorbent, respectively. Retention capacities for the types of feathers were 9.6 g/g sorbent for FT-1, 9.1 g/g sorbent for FT-2, 7.3 g/g sorbent for FT-3, 2.6 g/g sorbent for FT-4 and 1.4 g/g sorbent for FT-5. The rachis showed the lowest retention capacity: 1.1 g / g sorbent. The retention capacity percentages with respect to the vanes for each type of feather were: 59%, 56%, 45%, 16% and 9%, respectively. The rachis showed a retention capacity of 7% with respect to the capacity of the vanes.

3.4. Gasoline retention capacity.

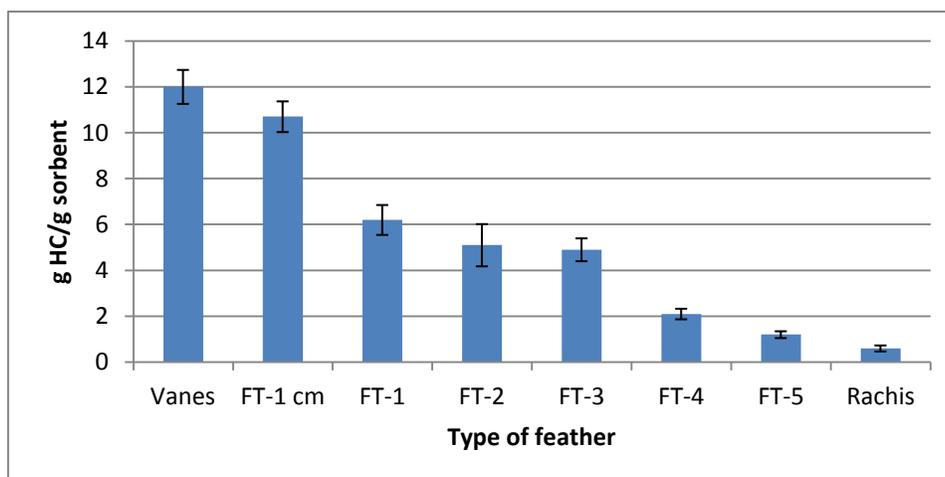


Figure 4. Gasoline retention capacity.

Figure 4 shows the results of the gasoline retention capacity. The vanes and FT-1 cm presented the highest sorption capacities: 12 g/g sorbent and 10.7 g/g sorbent respectively. Retention capacities for the 5 types of feathers were 6.2 g/g sorbent for FT-1; 5.1 g/g sorbent for FT-2; 4.9 g/g sorbent for FT-3; 2.1 g/g sorbent for FT-4 and 1.2 g/g sorbent for FT-5. The rachis showed the lowest retention capacity with 0.6 g/g sorbent. These retention capacities represent 52 %, 43 %, 41 %, 18 %, 10 % and 5 % respectively from the vanes retention capacity.

The retention capacities found for the biopolymer were from 15 to 250 higher in comparison with those found by Choi and Cloud (1992) for materials such as cotton and kenaf with retention capacities of 30 and 10 g/g sorbent for crude oil. The feathers also showed a 120 % higher retention capacity than the cellulosic materials tested by Ortiz-Gonzalez *et. al.*, (2006) as coconut fiber, water hyacinth and cane fiber with retention capacities of 15.8, 11.2 and 7.5 g/g sorbent respectively for medium hydrocarbon. Retention capacities of the feathers were about 200 % higher than the commercial sorbent manufactured using natural organic peat moss, according to the product specifications this sorbent has a retention capacity from 9 to 12 g/g sorbent (Provedora Industrial Vallen, 2010).

The good performance of the chicken feathers can be explained mainly by two reasons: the chemical affinity between feathers and hydrocarbons produced because of their similar hydrophobic behavior and the high surface area of the biopolymer due to the interstitial spaces formed by the complex net of keratin fibers (Roig *et. al.*, 2003).

Sorbent materials function either by adsorption or absorption. In adsorption processes, the oil is preferentially attracted to the surface of the material whereas

absorbents incorporate the oil into the body of the material (ITOPF, 2012). In absorption processes, liquids diffuse into the matrix of a solid material and once absorbed the oil cannot be re-released. This process is more effective with light hydrocarbons (USEPA, 2011).

Light hydrocarbons such as diesel and gasoline are sorbed for both, absorption and adsorption processes. Absorption occurs because the low viscosity of the hydrocarbon allows it to penetrate the molecular structure of the sorbent (Ortiz-González, 2006). Adsorption occurs due to the low viscosity that enables the hydrocarbon to be adsorbed on the material by capillary action (ITOPF, 2012).

For crude oil, sorption also occurs for both processes. However, the main mechanism of the retention is adsorption because thicker hydrocarbons adhere to the surface of the adsorbent more effectively (USEPA, 2011).

3.5. Effect of the feather size.

Figure 5 shows a comparison between the retention capacities of the FT-1cm and the other types of feathers. As can be seen, the results were better for the FT-1 cm than for the rest of the feathers. The best retention capacities of the entire feathers were presented by FT-1 and its retention capacities in comparison with FT-1 cm were 59 % for crude oil, 76 % for diesel and 58 % for gasoline.

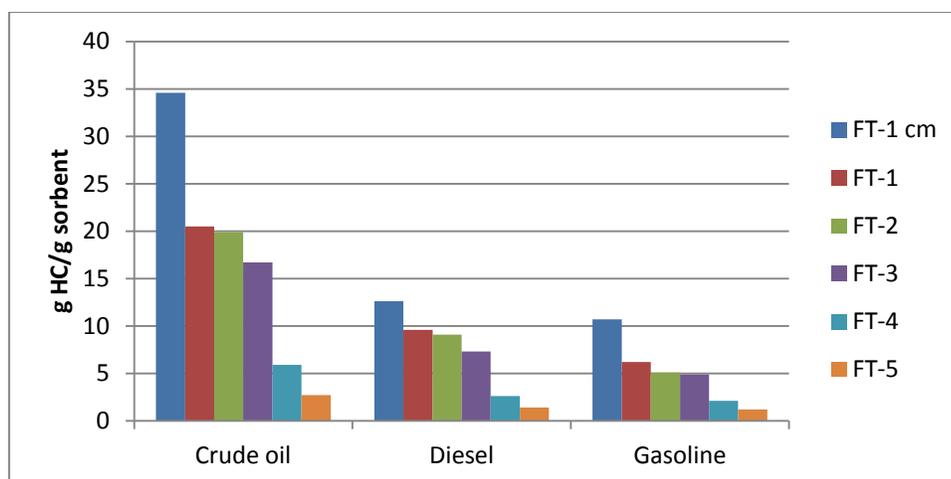


Figure 5. Effect of the feather size in the retention capacity.

The reduction in size of the feathers enhances absorption and adsorption processes. The absorption is favored because the reduction in size generates a large number of paths that allow the diffusion of the hydrocarbon into the spaces generated in the sorbent. The adsorption is enhanced because a small feather size increases the surface area of the biopolymer providing the hydrocarbon a larger area where it can adhere.

3.6. Relationship between rachis percentage and retention capacity.

Figure 6 shows the relationship between the rachis percentage of each type of feather and its retention capacity for the three types of hydrocarbons. As shown in the Figure below, the retention capacity is inversely proportional to the amount of rachis that constitutes the feather. The minimum value for the retention capacity is determined by the rachis while the maximum value is achieved in absence of rachis.

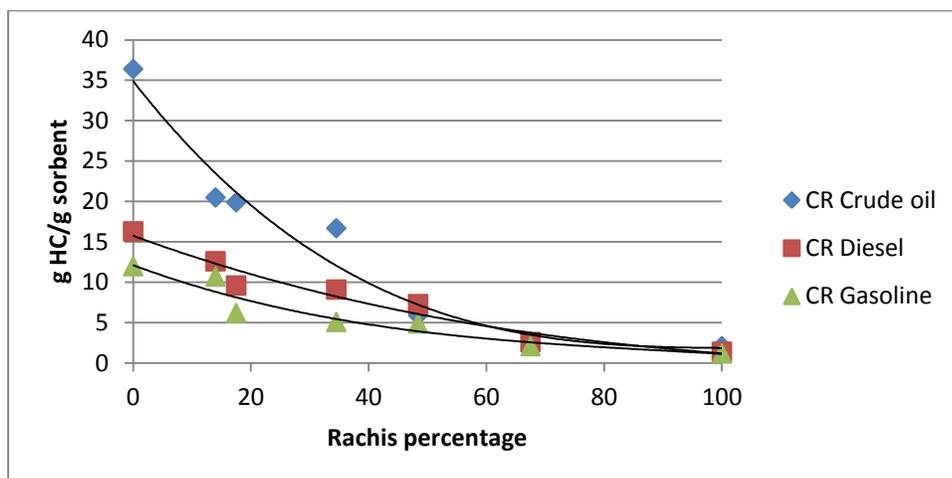


Figure 6. Relationship between rachis percentage and retention capacity.

This behavior can be explained because the rachis is a nonporous solid while the vanes consist of a complex net of keratin fibers with many interstices. This external porosity increases the surface area of the biopolymer favoring specially adsorption processes since this phenomenon is a superficial one.

3.7. Optimal retention time.

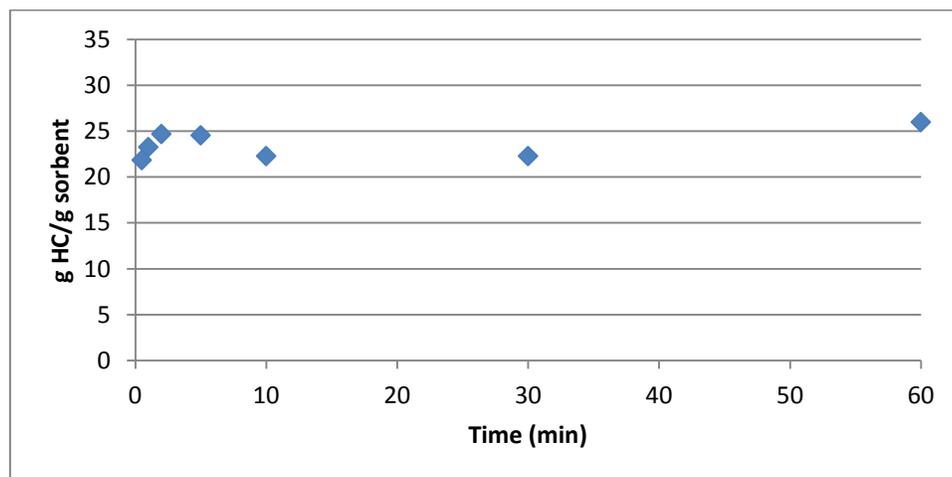


Figure 7. Optimal retention time.

Figure 7 compares retention capacity data with time. As can be seen, from 30 seconds to 2 minutes there is an increasing trend in retention capacity; however, after this time the trend remains almost constant. Therefore, 2 minutes can be considered the optimal retention time for the analyzed sorbent, since during this time feathers have sorbed 95% of its maximum capacity.

3.8. Performance tests.

During these tests the water take-up, buoyancy and oleophilic properties of the sorbent material were analyzed.

For the 1 cm size feathers: a small quantity of feathers sank in both deionized water and saltwater (1 M). The water take-up was 7 g/g sorbent for deionized water and 7.5 g/g sorbent for saltwater. Figure 8 shows the performance of the sorbent in the presence of hydrocarbon. As can be seen, most of the hydrocarbon was retained in the biopolymer and the residual oil formed droplets on the water surface.

For the entire feathers: all the feathers floated in deionized and saltwater. The water take-up was 2.6 g/g sorbent for deionized water and 3.6 g/g sorbent for saltwater. As shown in the Figure 9, in presence of hydrocarbon all the feathers floated and formed a dense surface layer with the hydrocarbon. This layer was easily removed.



Figure 8. Performance of the 1 cm feathers in presence of hydrocarbon.



Figure 9. Performance of the entire feathers in presence of hydrocarbon.

In accordance with these observations entire feathers showed a better performance for buoyancy test. However, the 1 cm size feathers presented better results in the hydrocarbon sorption test.

4. Conclusions.

According to the findings of this research, chicken feathers are an effective sorbent for hydrocarbons in water. The biopolymer showed better retention capacity than other natural organic sorbents such as cotton, kenaf fiber, coconut fiber, water hyacinth and sugar cane fiber. The performance of the feathers was even better than the reported performance for commercial sorbents manufactured from organic moss.

The feathers showed different retention capacities depending on their size and rachis percentage. The best retention capacity was achieved when using only the vanes of the feathers. Nonetheless, the separation of the vanes from the rachis can be time consuming, complicated and impractical. For this reason, it is better to use the 1 cm size feathers since their retention capacity is almost as high as the vanes retention capacity.

In addition, feathers showed high buoyancy in absence and in presence of hydrocarbon during the dynamic tests. The optimal retention time of 2 min is also suitable for an oil sorbent material because it enables a rapid response to a possible spill.

There are two major advantages of using chicken feathers as oil sorbent. The first one is feathers abundance and low cost because so far they are considered an undesirable byproduct of the poultry industry. The second one, the possibility to biodegrade oil and sorbent is an environmentally friendly option that eliminates the additional costs of storage or disposal required for synthetic sorbents.

CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 2. ANTECEDENTES	3
2.1. Composición y estructura de las plumas de pollo.	3
2.2. Producción y usos actuales de las plumas de pollo.....	4
2.3. Usos y aplicaciones de la queratina.	5
2.4. Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH).	5
2.5. Propiedades de los hidrocarburos.	5
2.6. Impactos causados por los derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos. ...	6
2.6.1. <i>Impactos ambientales en sistemas acuáticos.</i>	6
2.6.2. <i>Impactos económicos.</i>	10
2.7. Técnicas de limpieza de hidrocarburos.....	10
2.7.1. <i>Contención mecánica de hidrocarburos después de un derrame.</i>	10
2.7.2. <i>Recuperación de hidrocarburos.</i>	11
2.7.3. <i>Uso de sorbentes.</i>	12
2.7.4. <i>Tratamientos químicos.</i>	19
2.7.5. <i>Tratamientos biológicos.</i>	20
2.7.6. <i>Incineración in situ.</i>	21
2.7.7. <i>Disposición.</i>	21
2.8. Casos de derrames de hidrocarburos.	21
CAPITULO 3. DESCRIPCION DEL PROBLEMA	24
3.1. Justificación	24
3.2. Hipótesis.	25
3.3. Objetivo general.....	25
3.4. Objetivos específicos.	25
CAPITULO 4. METODOLOGIA.....	26
4.1. Pretratamiento del biopolímero.	26
4.2. Clasificación de las plumas.....	26
4.3. Determinación de la capacidad de retención del biopolímero.....	26
4.4. Estudio del efecto de tamaño de partícula.	27
4.5. Relación entre el porcentaje de raquis y la capacidad de retención.	27

4.6. Determinación del tiempo óptimo de retención del hidrocarburo.....	27
4.7. Pruebas de desempeño del sorbente.	28
CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	30
5.1. Clasificación de las plumas.....	30
5.2. Capacidad de retención de petróleo crudo.....	32
5.3. Capacidad de retención para el diesel.....	33
5.4. Capacidad de retención de gasolina.	33
5.5. Efecto del tamaño de la pluma.	36
5.6. Relación entre el porcentaje de raquis y la capacidad de retención.	37
5.7. Tiempo óptimo de retención.	37
5.8. Desempeño del sorbente.	38
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	40
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS.....	42
ANEXO I. CÁLCULOS.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Estructura de una pluma.....	3
Figura 2.2. Constitución del tejido vexilo.....	4
Figura 2.3. Comportamiento de los hidrocarburos en el ambiente acuático.....	8
Figura 5.1. Clasificación de las plumas.....	30
Figura 5.2. Porcentaje de raquis para cada tipo de plumas.....	32
Figura 5.3. Capacidad de retención de petróleo crudo.....	32
Figura 5.4. Capacidad de retención de diesel.....	33
Figura 5.5. Capacidad de retención de gasolina.....	34
Figura 5.6. Efecto del tamaño de partícula en la capacidad de retención.....	36
Figura 5.7. Relación entre el porcentaje de raquis y la capacidad de retención.....	37
Figura 5.8. Tiempo óptimo de retención del biopolímero.....	38
Figura 5.9. Flotabilidad de las plumas de 1cm en agua salada.....	39
Figura 5.10. Desempeño de las plumas de 1cm en agua salada/hidrocarburo.....	39
Figura 5.11. Apariencia del agua al retirar la capa el sorbente con hidrocarburo.....	39
Figura 5.12. Flotabilidad de las plumas enteras en agua salada.....	39
Figura 5.13. Desempeño de las plumas enteras en agua salada/hidrocarburo.....	39
Figura 5.14. Apariencia del agua al retirar la capa de sorbente e hidrocarburo.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Aplicaciones de los sorbentes.....	14
Tabla 2.2. Principales derrames de hidrocarburos.....	22
Tabla 4.1. Condiciones de los experimentos de desempeño del sorbente.....	29
Tabla 5.1. Características de los diferentes tipos de plumas.....	31

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

El petróleo es hoy en día una de las fuentes más importantes para la generación de energía y materias primas para la elaboración de compuestos químicos. La producción de petróleo anual en el mundo se estima que asciende a las dos mil millones de toneladas (Fernández-Linares, 2006).

En cada una de las fases de exploración, explotación, transporte, refinamiento y almacenamiento de hidrocarburos del petróleo existe el riesgo de fuga o derrame. Estos sucesos pueden causar contaminación en los ambientes terrestres y acuáticos derivando en graves impactos ecológicos y económicos. Estos impactos se pueden observar en la mortandad de especies acuáticas, la bioacumulación en las cadenas tróficas y la afectación de actividades turísticas y de esparcimiento (Annunciado, 2005).

A lo largo de la historia se han dado a conocer a la opinión pública derrames de hidrocarburos de magnitudes catastróficas. La cobertura dada a incidentes como el del Torrey Canyon en 1967 o del Exxon Valdez en 1989, propició dos efectos importantes: por un lado sentar las bases de la legislación internacional en materia de derrames de hidrocarburos y por otro lado, el cuestionamiento a los procesos de tratamiento que se habían usado hasta entonces para combatirlos. Entre los métodos más comunes se encuentran la incineración *in situ* y el uso de dispersantes químicos como surfactantes. El resultado de estas prácticas son daños ambientales tales como contaminación atmosférica y efectos tóxicos en las especies marinas (ITOPF, 2010).

Debido a esta situación, la búsqueda de métodos eficaces para controlar, y remediar parcial o totalmente los efectos adversos ocasionados por los derrames de petróleo es constante. Esta búsqueda se encamina a encontrar materiales naturales y/o sintéticos que puedan remover rápidamente el hidrocarburo derramado en el ambiente para así evitar que sufra procesos como la intemperización, dispersión o emulsificación, que vuelvan al hidrocarburo más tóxico o más difícil de recuperar (Wei *et. al.*,2003).

Los materiales sorbentes de hidrocarburos pueden clasificarse de manera general en tres categorías: naturales orgánicos, naturales inorgánicos y sintéticos. Entre los primeros se pueden mencionar el bagazo de caña, la fibra de coco y el aserrín; ejemplos de los naturales inorgánicos son la arcilla, la vermiculita, la arena y la ceniza volcánica y dentro de los sintéticos se encuentran el poliuretano, polietileno y las fibras de nylon (Ortiz-González, 2006).

Los sorbentes comerciales actuales para la remoción de hidrocarburos están fabricados principalmente de materiales sintéticos. Sin embargo, su uso aún presenta algunos inconvenientes tales como: costos adicionales para su reutilización y/o almacenamiento y al no ser biodegradables requieren confinamiento para su disposición final (IMO, 2005).

Es por esto que la investigación de nuevos materiales naturales orgánicos ha tenido gran auge en los últimos años. Estos materiales pueden ser usados como sorbentes de hidrocarburos debido a sus propiedades como abundancia, disponibilidad y factibilidad de ser biodegradados.

La producción de pollo ha aumentado en México en un 85 % durante los últimos diez años (SIAP, 2010) siendo las plumas hasta este momento consideradas uno de los subproductos que se genera en mayor cantidad. La generación de plumas de pollo en el año 2010 ascendió a más de 200,000 toneladas. Al carecer de valor comercial, las plumas acarrearán altos costos de disposición final para los productores. Además de su abundancia y disponibilidad, la estructura de las plumas de pollo consistente en fibras entretejidas de queratina, bajo peso, resistencia mecánica, insolubilidad en agua y carácter hidrófobo hacen de ellas un material idóneo para experimentar la sorción de hidrocarburos (Roig *et. al.*, 2003 y Kar y Misra, 2004).

CAPITULO 2. ANTECEDENTES

2.1. Composición y estructura de las plumas de pollo.

Las plumas son estructuras dérmicas de las aves cuya función principal es la de regular la temperatura, están compuestas hasta en un 90 % por queratina (Aguayo-Villareal, 2011), misma proteína que forma las uñas, el pelo y las escamas de otros grupos de vertebrados.

La estructura de una pluma es compleja y se compone de varios elementos como se puede observar en la Figura 2.1. La parte central recibe el nombre de raquis, el cual es hueco y sirve de eje y soporte a la pluma. La parte inferior del raquis que es más ancha y hueca se conoce como cañón o cálamo y sirve como unión entre la pluma y la piel; el hueco inferior del raquis denominado ombligo inferior sirve para alimentar a la pluma con las sustancias necesarias para su crecimiento y el ombligo superior es el inicio del cuerpo laminar de la pluma (Biblioteca Digital ILCE, 2012).

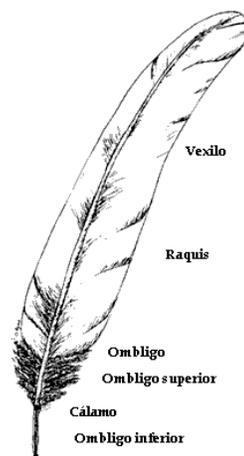


Figura 2.1. Estructura de una pluma. Fuente: Biblioteca Digital ILCE, 2012.

A lo largo del raquis crece de ambos lados el vexilo, éste consiste en una estructura laminar compuesta por una red de barbas perpendiculares al raquis de las que se originan bárbulas que se unen entre sí por medio de ganchillos formando una red entretrejida como se muestra en la Figura 2.2.

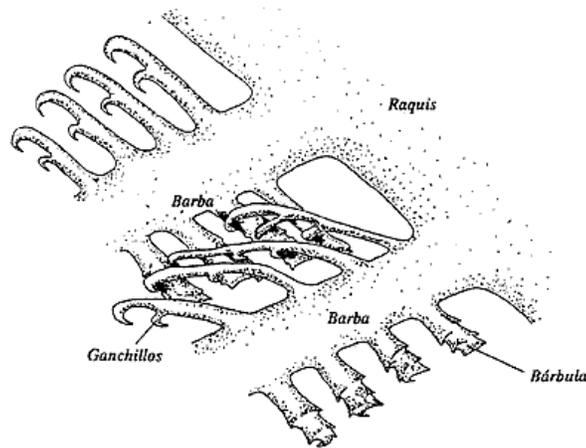


Figura 2.2. Constitución del tejido vexillo. Fuente: Biblioteca Digital ILCE, 2012.

Es precisamente esta complicada estructura queratinosa la que le confiere a las plumas sus propiedades de alta resistencia mecánica y área superficial (Biblioteca Digital ILCE, 2012).

2.2. Producción y usos actuales de las plumas de pollo.

La producción de pollo en México ha tenido un aumento considerable en los últimos años. De acuerdo con el Resumen Nacional Pecuario (SIAP, 2010) en México se produjeron 3,369,915 toneladas de pollo en el año 2010. Esto representa un incremento de aproximadamente el 85 % con respecto al año 2000. Esta industria genera una gran cantidad de subproductos, entre los cuales destacan en proporción las plumas; se calcula que entre el 4 y el 6 % en peso de cada pollo es pluma (De la Rosa, *et. al.*, 2008), por lo que en el año 2010 se generaron más de 200,000 toneladas de este residuo a nivel nacional.

Hasta años recientes, este material era considerado un desecho sin ningún valor comercial y por el contrario, para las empresas avícolas, su disposición representaba un alto costo. Por esta razón, diversos investigadores se han enfocado en buscar nuevos usos para las plumas de pollo, aprovechando sus propiedades como insolubilidad en agua, alta resistencia mecánica y porosidad. Entre los usos potenciales de este material se encontraron: elaboración de papel, fabricación de plásticos de baja densidad, uso como medio filtrante muy fino e incluso el almacenamiento de hidrógeno como combustible (USDA, 2002).

Otro uso importante dado a las plumas de pollo es la remoción de contaminantes en agua. Las plumas de pollo son una intrincada red de fibras compuestas hasta en un 90 % de queratina y con elevada área específica (Roig *et. al.*, 2003). La queratina es un sorbente atractivo de contaminantes como los metales pesados (Kar y Misra,

2004). Además de esto, el comportamiento hidrofóbico de las plumas puede traducirse en una afinidad por compuestos no polares como los hidrocarburos.

2.3. Usos y aplicaciones de la queratina.

La fibra de la pluma de pollo es altamente microcristalina y muy resistente al estrés mecánico y térmico. La queratina es la proteína que les confiere a las plumas estas propiedades. Investigaciones recientes han encontrado que las fibras de queratina tienen diversas aplicaciones en la fabricación de nuevos materiales como películas delgadas para empaques. Además, se usan como refuerzo de materiales como acrílico y polietileno para mejorar sus propiedades mecánicas (Ossa-H *et. al.*, 2007).

Las fibras de queratina también son útiles para aumentar el área superficial de los filtros de aire, mejorar el aislamiento térmico, fabricar materiales compuestos menos densos que los polímeros originales y aumentar la biodegradabilidad de dichos polímeros (Schmidt y Barone, 2004).

2.4. Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH).

El término hidrocarburos totales del petróleo (TPH) es usado para describir una mezcla de un gran número de compuestos químicos derivados del petróleo crudo. Dentro de sus características generales se pueden mencionar: composición (carbono e hidrógeno), hidrofobicidad y flamabilidad. Algunos de estos hidrocarburos son líquidos claros y ligeros que se evaporan fácilmente y otros son líquidos o semisólidos oscuros y pesados que no se evaporan. En su gran mayoría, estos productos tienen olores característicos a gasolina, queroseno o petróleo (Olguín, *et. al.*, 2007).

2.5. Propiedades de los hidrocarburos.

Los hidrocarburos pueden ser clasificados dependiendo de su densidad API según el Instituto Americano del Petróleo. La densidad es medida en grados API y calculada mediante la siguiente fórmula (Canadian Centre for Energy, 2012):

$$\text{Densidad API} = \left(\frac{141.5}{\text{Gravedad específica}} \right) - 131.5$$

La industria petrolera considera un hidrocarburo liviano aquel que tiene una densidad menor de 31.1 ° API (menor de 870 kg/m³); un hidrocarburo medio el que presenta una densidad entre 31.1 y 22.3 ° API (870 kg/m³ a 920 kg/m³); un hidrocarburo pesado cuya densidad está entre 22.3 y 10 ° API. Finalmente, hidrocarburo extra

pesado cuya densidad es menor a 10 ° API (900 kg/m³) (Canadian Centre for Energy, 2012).

Los hidrocarburos también pueden ser divididos atendiendo a sus propiedades químicas en tres grupos (Olguín *et. al.*, 2007):

- 1) Hidrocarburos alifáticos de cadena lineal o ramificada, saturados (alcanos) o insaturados (alquenos y alquinos). Los alcanos son casi totalmente insolubles en agua debido a su baja polaridad y a su incapacidad para formar enlaces con el hidrógeno. Los alcanos líquidos son miscibles entre sí y generalmente se disuelven en solventes de baja polaridad como: benceno, tetracloruro de carbono, cloroformo, etc. La densidad de cada uno de ellos incrementa con el tamaño de su molécula pero en todos los casos, son menos densos que el agua.
- 2) Hidrocarburos de cadenas cíclicas. Los cicloalcanos presentan un punto de ebullición y de fusión mayores a los que se presentan en los alcanos.
- 3) Hidrocarburos con uno o más anillos bencénicos (aromáticos). Los hidrocarburos aromáticos son líquidos o sólidos a temperatura ambiente y sus puntos de ebullición son cercanos a los de su cicloalcano correspondiente, son poco polares o no polares por lo que se consideran compuestos hidrofóbicos.

2.6. Impactos causados por los derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos.

Los hidrocarburos pueden entrar en el ambiente por diferentes vías: mediante accidentes, como emisiones de algunas industrias o como subproductos provenientes de actividades industriales o domésticas (ASTDR, 1999).

Los derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos pueden tener impactos severos, dependiendo de las características y cantidad de hidrocarburo derramado. Estos factores determinan el comportamiento de los TPH en el ambiente (ITOPF, 2011).

2.6.1. Impactos ambientales en sistemas acuáticos.

Las costas están enormemente expuestas a los impactos de los derrames por hidrocarburos. Sin embargo, los organismos que allí habitan son muy resistentes a cambios en su entorno debido a que deben enfrentar el intenso golpeteo de las olas,

fuertes vientos, altas temperaturas, lluvia y otras condiciones severas; esta tolerancia le da a los organismos que viven en la costa la capacidad de recuperarse de manera rápida (ITOPF, 2011).

Sin embargo, otros organismos son muy vulnerables a los derrames de hidrocarburos. El plancton es de gran importancia para el sostenimiento de la vida acuática debido a que es la base de las redes tróficas en este ambiente. El plancton consume el petróleo del ambiente marino incorporándolo a su organismo y por consecuencia, a las cadenas tróficas. Los hidrocarburos pueden inhibir la fotosíntesis a concentraciones menores de 1 ppm retardando la división celular y el crecimiento del plancton. A concentraciones mayores de 1 ppm ocasionan la muerte de especies planctónicas y de larvas y huevecillos de peces (Botello *et. al.*, 2007).

Los organismos filtradores como ostiones y mejillones adhieren pequeñas partículas de los TPH a sus tejidos, afectando su calidad comercial debido al sabor y olor que adquieren. Por otro lado, en los peces los hidrocarburos cubren sus branquias impidiendo el intercambio de gases y causando la muerte (Botello *et. al.*, 2007).

Las aves marinas son otra especie gravemente afectada por los derrames de hidrocarburos. Las causas más comunes de muerte de éstas aves son: ingestión al tratar de limpiarse acicalándose, ahogamiento, inanición y pérdida del calor corporal debido a la capa de hidrocarburos que se forma sobre ellas (ITOPF, 2011).

Tres características del hidrocarburo derramado que afectan su capacidad de expansión son (USEPA, 1999):

- La tensión superficial. Es la medida de atracción de las moléculas de la superficie de un líquido, una alta tensión superficial reduce la posibilidad de expansión del derrame mientras que una baja tensión superficial la favorecerá.
- La gravedad específica. Es la densidad de una sustancia comparada con la del agua. Los hidrocarburos por lo regular tienen una gravedad específica menor que la del agua, sin embargo la evaporación de sus componentes más livianos la incrementa pudiendo causar que el hidrocarburo se hunda y pueda interactuar con el sedimento.
- La viscosidad. Es la resistencia de un líquido a fluir. Por tanto, cuanto más alta sea la viscosidad del hidrocarburo, será mayor la tendencia a permanecer en el mismo lugar.

2.6.1.1. Comportamiento de los derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos.

Dentro de los ambientes acuáticos, los hidrocarburos sufren una serie de procesos naturales que ayudan a atenuar los impactos producidos por los derrames, éstos incluyen: i) intemperización, ii) propagación, iii) evaporación, iv) disolución, v) dispersión, vi) oxidación, vii) emulsificación, viii) sedimentación y ix) biodegradación como se ilustra en la Figura 2.3.

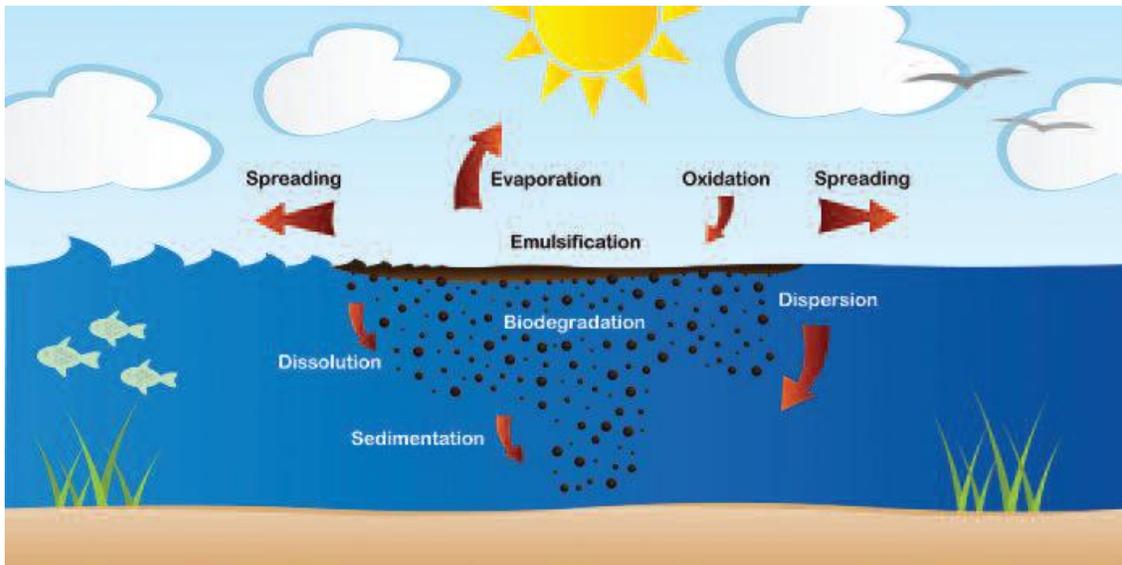


Figura 2.3. Comportamiento de los hidrocarburos en el ambiente acuático. Fuente: ITOFF, 2010.

i) La intemperización también conocida como meteorización, consiste en una serie de procesos físicos y químicos que conducen a la descomposición del hidrocarburo favoreciendo su dispersión natural. La velocidad de meteorización es afectada por factores como: las características físicas del producto y su composición química, las condiciones meteorológicas del lugar del derrame y las características del agua del mar (densidad relativa, corrientes, temperatura, nutrientes y oxígeno disuelto, entre otras) (Silos-Rodríguez, 2008).

ii) La propagación es la extensión de los hidrocarburos formando una mancha sobre el mar. El tamaño de esta mancha refleja generalmente el volumen de hidrocarburo derramado a excepción de los hidrocarburos muy pesados que tienden a no esparcirse mucho. La viscosidad y las condiciones meteorológicas (velocidad del viento) y marinas (temperatura del agua, oleaje y corrientes) son los factores que determinan la velocidad de propagación (Silos-Rodríguez, 2008).

iii) La evaporación sucede cuando la fracción más ligera o volátil de la mezcla de hidrocarburos se convierte en vapor y se escapa de la superficie del agua, esto

permite que varios de los componentes más flamables causen daños mínimos en el ambiente acuático al evaporarse rápidamente (USEPA, 1999). Además, el hidrocarburo se vuelve menos soluble en agua, aumentando su densidad y por tanto llega a hundirse. La velocidad de evaporación depende tanto de factores referentes al hidrocarburo como la tensión de vapor, área del derrame y espesor de la capa del derrame, y de factores ambientales tales como el estado del mar, la temperatura del agua y la radiación solar (Silos-Rodríguez, 2008).

iv) La disolución es el proceso debido al cual las fracciones más ligeras del hidrocarburo se diluyen en la columna de agua. El tiempo de disolución depende de la composición del derrame, esparcimiento de la mancha, temperatura del agua, turbulencias y grado de dispersión. Algunas veces no se toma en cuenta el fenómeno de disolución de hidrocarburos en el agua, no obstante, la disolución de hidrocarburos en el agua tiene gran importancia desde el punto de vista ecológico ya que las fracciones que se diluyen poseen distintos grados de toxicidad (Silos-Rodríguez, 2008).

v) La dispersión es la fragmentación de la mancha de hidrocarburo en pequeñas gotas de diferentes tamaños debido principalmente a la acción de las olas y la turbulencia en el mar. Algunas de estas gotitas permanecen en la columna de agua mientras que las más grandes tienden a regresar a la superficie. En la columna de agua las gotas tienen una mayor área superficial que antes de la dispersión lo que favorece otros procesos como la disolución, la sedimentación y la biodegradación del hidrocarburo (ITOPF, 2010).

vi) La oxidación ocurre al entrar en contacto el hidrocarburo con el oxígeno atmosférico produciendo compuestos solubles en agua. La cantidad de hidrocarburo oxidado depende de la extensión de la mancha, la presencia de sales minerales en el agua, la presencia de metales y de compuestos sulfurosos en el petróleo y la acción de los rayos ultravioletas de la luz solar (Silos-Rodríguez, 2008).

vii) La emulsificación es la formación de una suspensión formada por un líquido disperso en forma de pequeñas gotitas en otro líquido. El petróleo puede formar dos tipos de emulsiones: hidrocarburo en agua y agua en hidrocarburo. La emulsión hidrocarburo en agua se dispersa de manera rápida por las corrientes marinas y oleaje, acelera los procesos de disolución, foto-oxidación y biodegradación; la emulsión agua en hidrocarburo en contraste, es muy persistente y difícil de degradar (Silos-Rodríguez, 2008). La formación de emulsiones puede incrementar el volumen del derrame lo cual puede dificultar en gran medida su tratamiento (ITOPF, 2002).

viii) La sedimentación o hundimiento del petróleo puede suceder por dos mecanismos: el incremento en su densidad debido a fenómenos naturales o

meteorológicos o a la adhesión de partículas al petróleo. En aguas abiertas, la evaporación de las fracciones del hidrocarburo más livianas causa que éste aumente su densidad (Silos-Rodríguez, 2008).

ix) La biodegradación ocurre cuando microorganismos como hongos y bacterias descomponen los hidrocarburos en compuestos más simples para obtener de ellos nutrientes y energía (USEPA, 1999). La tasa de biodegradación es afectada por factores como el contenido de nutrientes, oxígeno en disolución, temperatura, salinidad, superficie del derrame y composición y tamaño de la población microbiana (ITOPF, 2002). El oleaje y las corrientes favorecen la biodegradación debido a que aportan una mayor cantidad de oxígeno al derrame. Este aumento en oxígeno favorece la proliferación de los microorganismos responsables de la biodegradación (Silos-Rodríguez, 2008).

2.6.2. Impactos económicos.

La contaminación por derrames de hidrocarburos no sólo causa impactos en los ecosistemas acuáticos sino que además afecta las actividades económicas que se llevan a cabo en el área entre ellas las actividades recreativas y turísticas como pescar, bucear, nadar o pasear en bote (ITOPF, 2011).

Algunas industrias también pueden sufrir afectaciones si dependen del agua del mar como insumo para sus procesos, por ejemplo, centrales eléctricas o plantas desalinizadoras; las actividades de astilleros y puertos también pueden verse interrumpidas debido a los derrames y a las operaciones de limpieza de éstos (ITOPF, 2011).

Los derrames de hidrocarburos afectan directamente la pesca y la maricultura ya que ante estos accidentes los motores de los botes se dañan y las redes para pescar son contaminadas. En el caso de especies cultivadas en estanques, el contacto de éstas con el hidrocarburo puede causar su muerte (ITOPF, 2011).

2.7. Técnicas de limpieza de hidrocarburos.

2.7.1. Contención mecánica de hidrocarburos después de un derrame.

La contención de hidrocarburos después de un derrame debe llevarse a cabo tan rápido como sea posible con la finalidad de minimizar los daños provocados en los ecosistemas. Los hidrocarburos derramados en un medio acuático tienden a extenderse por efecto de los vientos y las corrientes pudiendo alcanzar zonas críticas (USEPA, 1999).

Uno de los equipos más comúnmente usados durante esta etapa son las barreras de contención o *booms*. Estas barreras están fabricadas principalmente con materiales sintéticos como las fibras de polietileno o espuma de poliuretano, nylon, neopreno, PVC, etc. Las barreras de contención se usan para controlar la propagación de hidrocarburos y permitir su posterior recuperación, remoción o dispersión (Silos-Rodríguez, 2008). Además, controlan la expansión de los derrames de hidrocarburos para reducir la posibilidad de contaminación en costas y otros recursos así como para concentrarlos en capas facilitando su recuperación. Estos equipos también pueden usarse para desviar y conducir los derrames de hidrocarburos a través de rutas deseadas (USEPA, 1999).

La eficiencia de estas barreras en ambientes acuáticos puede ser severamente afectada por fenómenos como corrientes, olas y vientos. En circunstancias como fuertes vientos y oleajes, las barreras de contención convencionales deben ser sustituidas por nuevas tecnologías como barreras de contención sumergibles (USEPA, 1999).

2.7.2. Recuperación de hidrocarburos.

Posterior a la contención, otros equipos llamados *skimmers* o recolectores son usados para la recuperación de hidrocarburos, estos equipos pueden ser operados desde las costas o los barcos. Al igual que las barreras, su eficiencia depende de las condiciones climáticas ya que en circunstancias desfavorables estos dispositivos pueden retener más agua que hidrocarburos (USEPA, 1999).

Los recolectores pueden ser de tres tipos: vertedero, adhesión o inducción. Los recolectores de vertedero tienen un vertedero situado en la interfase agua-hidrocarburo. El hidrocarburo flotante en la superficie del agua se derrama sobre el vertedero y es atrapado en un colector de donde posteriormente es bombeado para su recuperación. Este tipo de recolectores tiene la desventaja de ser propensos a la obstrucción del vertedero debido a los desechos presentes en el agua (USEPA, 1999).

Los dispositivos de adhesión consisten en estructuras con superficies oleófilas como discos, cabos, cepillos o tambores. Los hidrocarburos adheridos son extraídos del agua y recuperados para su almacenamiento. La principal ventaja de los recolectores de adhesión es su flexibilidad, que permite la aplicación de estos equipos en derrames de cualquier espesor. Algunos de estos recolectores funcionan bien en agua con gran cantidad de desechos o presencia de hielo (USEPA, 1999).

Los recolectores de succión funcionan igual que una aspiradora. El hidrocarburo es succionado a través de cabezas flotantes y bombeado a los tanques de

almacenamiento. A pesar de que los recolectores de succión son muy eficientes, son vulnerables a ser obstruidos por los desechos y requieren vigilancia constante. Los recolectores de succión funcionan mejor en aguas tranquilas donde el petróleo ha sido contenido mediante barreras mecánicas (USEPA, 1999).

Algunos criterios de decisión para usar uno u otro son: tipo de hidrocarburo a remover, condiciones del mar y presencia de hielo o desechos (USEPA, 1999).

2.7.3. Uso de sorbentes.

Los sorbentes son materiales o mezclas de materiales usados para remover líquidos mediante los procesos de absorción, adsorción o una combinación de ambos. Durante el proceso de adsorción el sorbato es distribuido sobre la superficie del material siendo un proceso superficial mientras que en la absorción la sustancia a remover es incorporada dentro del cuerpo del material y por tanto un fenómeno volumétrico. El uso de sorbentes es muy útil en áreas que no pueden ser alcanzadas por estructuras como barreras o *skimmers* (Silos-Rodríguez, 2008).

Algunas características fundamentales de un material sorbente son su hidrofobicidad y lipofilidad. Otras características que deben considerarse al elegir un sorbente para un derrame de hidrocarburos son: velocidad de absorción, velocidad de adsorción, tipo de hidrocarburo derramado y facilidad de aplicación (USEPA, 2011).

Los sorbentes pueden ser clasificados en tres categorías generales: naturales orgánicos, naturales inorgánicos y sintéticos. Entre los sorbentes naturales orgánicos, se pueden mencionar la paja, el aserrín, el algodón, la pulpa de nopal, el bagazo de caña, la cascarilla de trigo, la fibra de coco y las plumas de aves (Ortiz-González *et. al.*, 2006 y USEPA, 2011). Estos materiales son relativamente económicos y por lo general son abundantes en la naturaleza y tienen capacidades de retención de 3 hasta 15 veces su peso en hidrocarburo. Sin embargo, estos materiales pueden retener agua lo que puede causar su hundimiento (USEPA, 2011).

Los sorbentes naturales inorgánicos pueden sorber de 4 a 20 veces su peso en hidrocarburo, además son económicos y abundantes en la naturaleza. Entre estos sorbentes destacan: arcilla, vermiculita, perlita, lana, arena y ceniza volcánica (USEPA, 2011).

Los sorbentes sintéticos incluyen materiales producidos por el hombre tales como poliuretano, polietileno y fibras de nylon. La mayoría de estos pueden retener más de 70 veces su peso en hidrocarburo y algunos de ellos presentan la posibilidad de ser limpiados y reutilizados (USEPA, 2011). Entre sus principales desventajas se

encuentran: su origen xenobiótico que dificulta su manejo, su no biodegradabilidad y el almacenamiento antes de su disposición final (Lim y Huang, 2007).

Debido a su fácil disponibilidad, bajo costo y buena capacidad de retención, el uso de sorbentes naturales para combatir la contaminación por derrames de hidrocarburos ha cobrado importancia en el campo de la investigación de los materiales (IMO, 2005).

Algunas ventajas del uso de sorbentes de cualquier naturaleza son (Silos-Rodríguez, 2008):

- Aparente falta de toxicidad.
- Posibilidad de aplicación independiente del espesor de la mancha.
- Reducción de la extensión del derrame.
- Facilidad de uso y disponibilidad.
- Utilidad en áreas ecológicamente sensibles.

Entre los inconvenientes de la utilización de sorbentes en general se pueden mencionar (Silos-Rodríguez, 2008):

- Efectividad sólo con crudos de baja o media viscosidad.
- Diversidad de pasos para su utilización (aplicación, recuperación, exprimido, reutilización o eliminación).
- Necesidad de utilización de otros equipos de contención.
- Dependencia de las condiciones meteorológicas.

Debido a que el uso de sorbentes se puede ver limitado por las condiciones climatológicas, su aplicación se ve restringida a los pequeños derrames en bahías, estuarios y zonas donde el agua es tranquila y las corrientes mínimas. La aplicación de los sorbentes es muy útil con el uso simultáneo de barreras de contención y en zonas donde el uso de dispersantes es indeseable debido a sus efectos ecológicos (Silos-Rodríguez, 2008).

Los sorbentes pueden utilizarse en una amplia gama de presentaciones, dependiendo de la función que se busca cumplir con su aplicación. La Tabla 1 muestra las principales presentaciones de sorbentes y sus aplicaciones.

Tabla 2.1. Aplicaciones de los sorbentes.

Forma de sorbentes inorgánicos tales como: polipropileno, poliuretano y nylon.	Aplicación
Almohadillas (cuadrados y tiras)	<ul style="list-style-type: none"> • Colocadas en zonas confinadas para recoger pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros. • Requieren cierto tiempo de contacto y vigilancia para su recuperación.
Rollos	<ul style="list-style-type: none"> • Se pueden adaptar a la longitud deseada, útiles para proteger zonas de trabajo y no contaminadas o ya limpias. • Después de ser utilizados pueden enrollarse y retirarse con facilidad.
Almohadas	<ul style="list-style-type: none"> • Se pueden utilizar para recoger pequeños derrames en zonas costeras. • Están fabricadas con material suelto introducido en una malla permeable. • Son más fáciles de recuperar que el material suelto.
Cepos (madejas o cuerdas fregadoras)	<ul style="list-style-type: none"> • Formados por tiras de polipropileno unidas y atadas por un cable y se pueden utilizar de forma individual o asegurar a un cabo a intervalos regulares. • Eficaces para hidrocarburos pesados y viscosos.
Barreras	<ul style="list-style-type: none"> • Ejercen una doble función como medio de contención y como sorbente. Sólo son eficaces en aguas en calma. • La capacidad de penetración disminuye debido a la compresión del material dentro de la malla. • Con hidrocarburos pesados se recubre la superficie y disminuye la penetración.
Materiales sueltos	<ul style="list-style-type: none"> • Su uso es restringido a lugares con poca accesibilidad.

Fuente: Silos-Rodríguez, 2008.

2.7.3.1. Estudios de sorción de hidrocarburos con diferentes materiales.

Ante la necesidad de remoción de hidrocarburos, en la década de los 70 Kondo *et. al.*, (1975) llevó a cabo una serie de trabajos relativos al uso de sorbentes para el control de la contaminación por hidrocarburos. Los materiales que mostraron mejor capacidad de sorción fueron las fibras de polipropileno y las espumas de poliuretano. Estos materiales presentaron la capacidad de sorber una cantidad de hidrocarburo igual a su propio peso. Además, el estudio mostró que las mejores condiciones de sorción para estos materiales son hidrocarburos de baja viscosidad y el sorbente deberá ser blando. En la actualidad estos materiales siguen siendo los más usados para la contención de hidrocarburos.

Desde entonces, diversas investigaciones se han hecho para buscar materiales óptimos para la sorción de hidrocarburos, ya que si bien los sorbentes antes mencionados son bastante efectivos, presentan desventajas inherentes a su origen sintético como el costo de su producción y una inversión adicional para su reutilización o disposición final. Además, se han usado otros materiales para la remoción de hidrocarburos de sistemas acuáticos tales como minerales inorgánicos como perlita, vermiculita, dolomita y grafito (Cervantes-González *et. al.*, 2007). Los resultados obtenidos han llevado hacia la investigación de diversos sorbentes naturales o biopolímeros que representan ventajas como su abundancia, disponibilidad y bajo costo.

Choi y Cloud (1992) estudiaron la remoción de hidrocarburos mediante biopolímeros como las fibras de algodoncillo (*Asclepsias*) y de algodón así como el kenaf. Tanto el algodoncillo como el kenaf son materiales celulósicos con comportamiento hidrofóbico de manera natural debido a sus superficies cerosas. El algodoncillo además posee una estructura hueca similar a la de la ceiba lo que favorece la sorción de algunos contaminantes como los hidrocarburos. Entre los materiales examinados, el algodoncillo mostró la mejor capacidad de retención para el hidrocarburo liviano alcanzando alrededor de 40 g/g sorbente mientras que la fibra de polipropileno sorbió aproximadamente 10 veces su peso en hidrocarburo liviano. Este excepcional desempeño puede ser atribuido a la gran cantidad de cera en la superficie del algodoncillo que aumenta las propiedades oleófilas e hidrofóbicas de este material. En cuanto al desempeño del algodón, se estimó que a pesar de ser menor que el del algodoncillo, se encontraba de 2.5 a 3 veces mayor que el del polipropileno. La capacidad de sorción del kenaf fue de alrededor de 10 g/g sorbente; más baja que las de los otros biopolímeros pero similar a la de las fibras de polipropileno. En cuanto a las pruebas de reutilización, los resultados mostraron que los materiales propuestos pueden ser reutilizados por varios ciclos con la misma eficiencia que los sorbentes fabricados a base de polipropileno. Los autores

concluyen que el algondoncillo, algodón y kenaf, debido a su alta capacidad de retención y a que pueden ser reutilizados por varios ciclos, pueden sustituir total o parcialmente el uso de los sorbentes comerciales.

Annunciado *et. al.*, (2005) llevaron a cabo una investigación experimental con materiales sorbentes de varias fibras vegetales, entre estas fibras: una mezcla de residuos de hojas, aserrín, henequén (*Agave sisalana*), fibra de coco (*Cocos nucifera*), esponja vegetal (*Luffa cylindrica*) e hilo de seda. Durante la investigación se realizaron pruebas con diferentes condiciones para el experimento como tiempos de retención entre 5 y 1440 min; sistemas estático, dinámico (con agitación) y seco (sólo hidrocarburo) y con 8 diferentes granulometrías: <0.0212 mm, 0.212-0.300 mm, 0.300-0.425 mm, 0.425-600 mm, 0.600-0.850 mm, 0.850-1.70 mm, 1.70-3.35 mm y >3.35 mm. Con respecto a las granulometrías, los resultados mostraron que una reducción en el tamaño de partícula de >3.35 mm a 1.70-0.850 mm incrementó la sorción hasta en un 205 % confirmando la importancia del tamaño de partícula en los experimentos de sorción. Los resultados para el sistema estático mostraron que la sorción incrementó con el tiempo de contacto; las capacidades de retención (a excepción del hilo de seda) se encontraron entre 6.4 y 2.7 g/g sorbente, decreciendo su capacidad de sorción en el orden siguiente: hilo de seda > henequén > aserrín > fibra de coco > esponja vegetal > residuos de hojas; siendo el hilo de seda el que mayor capacidad de retención mostrando 85.5 g/g sorbente. El henequén y el hilo de seda sorbieron más del 80 por ciento de su capacidad durante los primeros 5 minutos. Estos resultados fueron comparados con dos sorbentes vegetales comerciales de turba en un sistema seco, éstos mostraron capacidades de retención superiores a las fibras vegetales analizadas durante el estudio, excepto por el hilo de seda que resultó tener de 8.5 a 12 veces la de los sorbentes comerciales de turba y comparable incluso con materiales sintéticos como las fibras de polipropileno y las espumas de poliuretano. Una de las limitantes más importantes encontradas para el uso de algunas de estas fibras (henequén, esponja y aserrín) como sorbentes de hidrocarburos es que bajo condiciones de derrame de hidrocarburos en agua el complejo agua-sorbente podría hundirse.

Ortiz-González *et. al.*, (2006) estudiaron la remoción de hidrocarburos a través de diferentes biomateriales sorbentes para la limpieza de derrames en suelos y cuerpos de agua. Los autores experimentaron con tres materiales celulósicos residuales para determinar su capacidad y cinética de sorción. Estos materiales fueron: fibra de coco, fibra de caña y buchón de agua y se compararon con un material sorbente comercial de origen natural (*Sphagnum*) recomendado para su aplicación en derrames tanto en suelo como en agua. Los experimentos de sorción se llevaron a cabo con tres tipos de hidrocarburos: liviano (35° API), medio (30° API) y pesado (25° API) y con tamaños de partícula fino y grueso. Para el hidrocarburo liviano, la fibra de coco de

granulometría gruesa mostró la mejor capacidad de sorción con 11.1 g/g seguida por el buchón de agua de granulometría gruesa con 8.26 g/g y el material comercial 5.74 g/g. La fibra de caña de granulometría fina tuvo una capacidad de sorción de 5.37 g/g siendo el desempeño más bajo de los materiales probados. Para la remoción del hidrocarburo medio, el material que presentó un mejor desempeño fue la fibra de coco gruesa con una capacidad de 15.77 g/g, seguida del buchón de agua grueso con 11.23 g/g y la caña de granulometría fina con 7.45 g/g; todos mostraron un desempeño similar o superior al del material comercial que fue de 7.88 g/g para el tamaño de partícula grueso y 5.95 g/g para el tamaño de partícula fino. Los resultados en la sorción de hidrocarburo pesado, fueron capacidades de sorción de alrededor de 12 g/g para el buchón de agua y 13.3 g/g para la fibra de coco comparados con 8.2 g/g para el material comercial. En la sorción del hidrocarburo pesado no se presentó una influencia marcada del tamaño de partícula en la capacidad de sorción. Los resultados demostraron que los tres materiales evaluados son efectivos para ser usados como materiales sorbentes de hidrocarburos en la mitigación y control de derrames ya que presentan capacidades de sorción iguales e incluso mejores en relación al material comercial contra el cual se comparó. La fibra de coco fue el material que presentó mejores capacidades de remoción para los tres tipos de hidrocarburos.

Lim y Huang (2007) examinaron la capacidad de remoción de la fibra de la ceiba (*Ceiba pentandra*) con tres tipos diferentes de hidrocarburos y lo compararon con el material más usado como sorbente, el propileno. Los hidrocarburos usados fueron diesel (hidrocarburo de baja viscosidad), aceite hidráulico AWS46 (de viscosidad media) y aceite de motor HD-40 (de alta viscosidad). Para este estudio, la fibra de ceiba fue introducida con diferentes densidades de empaque en celdillas de prueba y luego sumergidas en los diferentes hidrocarburos, estas densidades oscilaron entre los 0.02 y 0.09 g/cm³. Los datos obtenidos demostraron que la capacidad de sorción disminuyó exponencialmente con respecto al incremento de la densidad de empaque en las celdillas para los tres hidrocarburos probados. Las capacidades de retención fueron de 45 g/g sorbente para HD40, 43 g/g sorbente para AWS46 y 36 g/g sorbente para diesel, respectivamente, con una densidad de empaque de 0.02 g/cm³ y de 8.6 g/g sorbente para HD40; 8.1 g/g sorbente para AWS46 y 7.9 g/g sorbente para diesel cuando la densidad de empaque se aumentó a 0.09 g/cm³. Todas estas capacidades de sorción fueron mayores a las presentadas por el polipropileno que presentó capacidades de retención de 8.8 g/g sorbente para HD40, 8.2 g/g sorbente para AWS46 y 7.9 g/g sorbente para diesel con una densidad de empaque de 0.09 g/cm³. Además, las pruebas de reuso dieron mejores resultados para el sorbente propuesto que para el material sintético. Las características hidrofóbicas de la ceiba pueden ser atribuidas a su superficie cerosa mientras que su capacidad de retención a su estructura hueca llena de espacios con posibilidad de almacenar hidrocarburo.

Hussein *et. al.*, (2009) estudiaron la sorción de hidrocarburos usando como sorbente bagazo carbonizado y la compararon con dos materiales comerciales: Adsorb-IT filtration fabric (elaborada a base de fibras recicladas de la industria textil) y Oil-only sorbent (hoja fabricada a base de polipropileno). Para ello experimentaron con tres hidrocarburos diferentes: gasóleo que representa hidrocarburos de baja densidad; petróleo crudo Árabe intemperizado un día y el mismo petróleo pero intemperizado por siete días como hidrocarburos de mediana y alta densidad, respectivamente. La mejor capacidad de retención se obtuvo con el hidrocarburo pesado alcanzando un valor de 19.06 g/g sorbente, seguido por el hidrocarburo mediano con 14.74 g/g sorbente y por último el hidrocarburo liviano para el cual la capacidad de retención fue de 14 g/g sorbente. Los resultados de la capacidad de sorción del hidrocarburo pesado fueron comparados con las de los sorbentes comerciales. La hoja sorbente retuvo 15.8 g/g sorbente mientras que el Adsorb-IT sólo retuvo 10 g/g sorbente, esto significa un 20 % y un 90 % menos respectivamente, por lo que se concluyó que el bagazo tiene un mejor desempeño como sorbente para los hidrocarburos pesados que los sorbentes comerciales que se usaron para la comparación.

Cervantes-González *et. al.*, (2009) señalaron la necesidad de buscar nuevos materiales sorbentes que no sólo tuvieran una alta capacidad de retención de hidrocarburos sino que además fueran biodegradables. Esto con el objetivo de poder eliminar simultáneamente el hidrocarburo y el sorbente. Entre estos materiales se encuentran: el kenaf, algodón y desechos como las plumas de pollo o bagazo de la caña. Los autores estudiaron el efecto de la adición de plumas como desecho queratinoso para mejorar la biodegradación de hidrocarburo crudo de petróleo y encontraron que las plumas de pollo presentaron una capacidad de retención de 2.7 g/g sorbente la cual es comparable e incluso mayor que la de otros sorbentes naturales como el quitosano y quitina. Los experimentos compararon la degradación microbiológica del hidrocarburo como única fuente de carbono con la biodegradación del hidrocarburo al adicionar el desecho queratinoso. Los resultados revelaron que los experimentos enriquecidos con el desecho queratinoso tuvieron una remoción del 80 % de hidrocarburo (1.435 g) mientras que los que contaron con el hidrocarburo como única fuente de carbono sólo mostraron una remoción de alrededor del 55 % (0.89 g). Este comportamiento puede encontrarse relacionado con que las plumas de pollo incrementan el contacto entre el hidrocarburo y los microorganismos o con que las plumas de pollo proporcionan nutrientes adicionales a los microorganismos mejorando la biodegradación de los hidrocarburos.

Salinas (2010) estudió la producción de harina de plumas de pollo y su utilización como un sorbente de hidrocarburos en agua dulce. De acuerdo con los resultados experimentales, se concluyó que la capacidad de sorción de la pluma de pollo fue de 2.5 g/g para la harina sin tamizar, 2.6 g/g para el tamaño de partícula gruesa y 2.6

g/g para el tamaño de partícula fino. En este mismo estudio se realizaron experimentos con fibra de coco con una capacidad de 16.8 g/g sorbente y un sorbente comercial (*Sphagnum*) con capacidad de 5.7 g/g sorbente. En los tres tamaños de partícula de la harina de pluma de pollo, la capacidad de sorción es menor con relación a los dos sorbentes que se usaron para la comparación. El estudio hace énfasis en que las principales ventajas de usar plumas de pollo en lugar de los sorbentes usados para la comparación son su bajo costo y abundancia.

2.7.3.2. Sorbentes comerciales.

Existe una gran variedad de productos comerciales para contener y recuperar hidrocarburos de un derrame, la mayor parte de ellos están fabricados con polipropileno o poliuretano, materiales capaces de sorber hasta 25 veces su peso en hidrocarburos. Las presentaciones de ellos varían con la función a cumplir. Por ejemplo, para la contención mecánica los productos más utilizados son los calcetines, los cordones y minicordones y las salchichas sorbentes mientras que para la remoción se puede usar el material particulado o almohadillas y para la limpieza final o de capas delgadas de hidrocarburos se utilizan las hojas o rollos absorbentes. Los costos de estos materiales van desde \$ 1,700 M.N. por un paquete de barreras absorbentes capaces de sorber 258 litros de hidrocarburo hasta poco más de \$ 10,000 M.N. por un kit de materiales sorbentes en diferentes presentaciones que pueden sorber hasta 360 litros de hidrocarburo (Vallen Proveedora Industrial, 2010).

Un nuevo producto que se usa para la sorción de hidrocarburos es el musgo de turba, este material completamente natural se modifica mediante un tratamiento térmico para cambiar su comportamiento hidrofílico a oleofílico y es capaz de sorber de 9 a 12 veces su peso dependiendo de la viscosidad del hidrocarburo a tratar, al ser natural es biodegradable y el tiempo óptimo de retención es prácticamente instantáneo (Daasons, S.A., 2012). El costo de un saco de 10 kg de este absorbente natural es de alrededor de \$ 400 M.N. y puede absorber en promedio 100 kg de hidrocarburo (Vallen Proveedora Industrial, 2010).

2.7.4. Tratamientos químicos.

Los dispersantes son sustancias químicas que contienen surfactantes u otros compuestos que descomponen sustancias líquidas en pequeñas gotitas lo cual facilita su dispersión en la columna de agua y su posterior descomposición por procesos naturales. Éstos son aplicados cuando los métodos convencionales de contención y recuperación de hidrocarburos se ven limitados por condiciones climatológicas (Silos-Rodríguez, 2008).

La efectividad de este método depende de factores determinantes tales como: la velocidad y la técnica de aplicación del dispersante así como el tipo de hidrocarburo a remover. Los hidrocarburos más pesados son más difíciles de tratar mediante la aplicación de dispersantes, por lo tanto el uso de éstos es más efectivo cuando la aplicación se realiza inmediatamente después del derrame y antes de que las fracciones más livianas se evaporen. Algunos factores climáticos que también influyen en la efectividad del proceso son la salinidad del agua, temperatura y las condiciones del mar (USEPA, 1999).

El uso de dispersantes evita que la mancha de hidrocarburos se extienda, por lo que contribuye a la protección del litoral y otras zonas sensibles además de potenciar la biodegradación, en contraste, acentúa la exposición local de la vida marina a los hidrocarburos. Por estas razones, debe considerarse el uso de dispersantes sólo en condiciones meteorológicas que impidan el uso eficiente de métodos de contención mecánica y cuando se requiere proteger las costas y playas para evitar la formación de emulsiones agua en hidrocarburo o de bolas de alquitrán (Silos-Rodríguez, 2008).

2.7.5. Tratamientos biológicos.

La biorremediación es un proceso biológico en el cual microorganismos como bacterias, hongos y levaduras degradan diversos contaminantes hasta compuestos menos tóxicos o no tóxicos presentes en suelo, agua o aire (Olguín, 2007).

La biodegradación de hidrocarburos ocurre lentamente de manera natural, sin embargo, la remoción de hidrocarburos debe realizarse de manera rápida para minimizar daños ambientales. Las tecnologías de biorremediación como la bioestimulación y la bioaumentación son de gran ayuda y estas técnicas son a menudo empleadas después de que los métodos de contención mecánica y recuperación de hidrocarburos ya han sido aplicados (USEPA, 1999).

La bioestimulación consiste en agregar nutrientes como fósforo y nitrógeno en un ambiente contaminado para estimular el crecimiento de los microorganismos que descomponen los hidrocarburos. Estos nutrientes son limitantes para el crecimiento de las poblaciones nativas de microorganismos, por lo que al agregarlos se incrementa potencialmente la velocidad de biodegradación (USEPA, 1999).

La bioaumentación es la adición de microorganismos degradadores de hidrocarburos a la población nativa existente. En algunas ocasiones, las bacterias degradadoras no existen de manera natural en el área a tratar, por lo que especies de estos microorganismos deben ser “sembradas” en el lugar (USEPA, 1999).

2.7.6. Incineración *in situ*.

Otra medida que puede ser aplicada para combatir un derrame de hidrocarburos es la incineración *in situ* que es la combustión controlada del hidrocarburo. La incineración *in situ* se aplica generalmente de manera simultánea con métodos de contención mecánica, en la mayoría de los casos con barreras de contención resistentes al fuego para delimitar la mancha de hidrocarburo a incinerar (Silos-Rodríguez, 2008).

Algunos factores de decisión para aplicar esta medida son la temperatura del agua, dirección y velocidad del viento, amplitud de las olas, espesor de la mancha, tipo de hidrocarburo y la cantidad de hidrocarburo que ya ha sido intemperizado y emulsificado. Otras cuestiones importantes a considerar son la proximidad a las poblaciones humanas, el tipo de suelo, el potencial de erosión y la presencia de especies de plantas y animales silvestres (USEPA, 1999).

Uno de los principales inconvenientes de la aplicación de esta medida es la liberación de contaminantes a la atmósfera, lo que implica la necesidad del monitoreo de la calidad del aire. En áreas remotas y en agua o suelo cubierto con nieve o hielo, la combustión de hidrocarburos *in situ* es la medida más conveniente que impide la expansión de la mancha debido a la inaccesibilidad del derrame que impide el uso de métodos de contención mecánica (USEPA, 1999).

2.7.7. Disposición.

La recuperación de hidrocarburos de un derrame en el mar o en la costa genera grandes volúmenes de desechos que deben ser transportados y almacenados de manera adecuada (ITOPF, 2011).

Los hidrocarburos líquidos y agua contaminada con grasas pueden ser reprocesados en una refinería mientras que materiales impregnados con hidrocarburos pueden ser usados como materia prima en algunos procesos industriales. Las formas más tradicionales de disposición final de residuos con hidrocarburos incluyen la incineración y el vertido en relleno sanitario (ITOPF, 2011).

2.8. Casos de derrames de hidrocarburos.

La Tabla 2.2 muestra algunos de los incidentes más significativos de derrames de hidrocarburos, ya sea por su magnitud, impactos causados o tipo de respuesta. Algunos de estos impactos siguen siendo estudiados en la actualidad como en el

caso de los daños a largo plazo causados a especies marinas por el accidente del Exxon Valdez (ITOPF, 2010).

Tabla 2.2. Principales derrames de hidrocarburos.

Incidente	Fecha de inicio del derrame	País del derrame	Magnitud del derrame (toneladas derramadas)	Operaciones de respuesta	Impactos generados
Torrey Canyon	18 de marzo de 1967	Reino Unido	119,000	Incineración <i>in situ</i> . Uso indiscriminado de dispersantes químicos.	Muerte de miles de aves en la zona. Pérdidas económicas debido a la falta de actividad turística.
Amoco Cádiz	16 de marzo de 1978	Francia	223,000	Uso de dispersantes. Empleo de yeso para favorecer la precipitación. Uso de equipos de remoción como <i>skimmers</i> y aspiradoras. Remoción manual en costas.	Afectación a especies de moluscos, equinodermos, crustáceos, ostras, aves acuáticas, peces y algas. Pérdidas económicas por la mortandad de especies comerciales y cese de la actividad turística.
Pozo Ixtoc I	3 de junio de 1979	475,000	México	Uso de barreras de contención, <i>skimmers</i> y sorbentes. Empleo de 9000 toneladas de dispersantes químicos.	Contaminación de diversas playas del Golfo de México. Pérdidas económicas por la afectación en la actividad turística. Daño a los arrecifes de coral.
Exxon Valdez	24 de marzo de 1989	37,000	Estados Unidos	Aplicación de dispersantes. Incineración <i>in situ</i> . Uso de booms, <i>skimmers</i> y sorbentes. Biorremediación.	Mortandad de mamíferos marinos y aves. Pérdidas económicas por contaminación de criaderos de especies comerciales.

Incidente	Fecha de inicio del derrame	País del derrame	Magnitud del derrame (toneladas derramadas)	Operaciones de respuesta	Impactos generados
Erika	11 de diciembre de 1999	20,000	Francia	Uso de barreras de contención y skimmers. Remoción manual de hidrocarburos en las costas afectadas.	Muerte de cerca de 50,000 aves marinas. Pérdidas económicas por afectación en actividades como: pesca, maricultura, turismo y producción de sal.
Prestige	13 de noviembre de 2002	63,000	España	Uso de barreras de contención, skimmers y sorbentes. Remoción manual de hidrocarburos en las costas afectadas.	Contaminación de 1900 km de costas. Pérdidas económicas por la prohibición de la pesca en la zona afectada y por la disminución de la actividad turística.

Fuente: ITOPF, 2010.

CAPITULO 3. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

3.1. Justificación

La industria del petróleo tiene una importancia medular para el crecimiento de la economía en México. Para el año 2005, la industria petrolera contribuyó con 37 % de los ingresos del sector público del país y para 2006, las ventas de petróleo fueron equivalentes al 10 % del Producto Interno Bruto (PIB) de México (INEGI, 2011).

En contraste, la industria petrolera ha causado daños ambientales severos en el sureste de México. La contaminación por hidrocarburos se presenta más comúnmente cuando existen derrames petroleros en las costas, provocando graves deterioros principalmente a los ecosistemas marinos, estuarinos y manglares. Estos ecosistemas son altamente vulnerables a la contaminación por hidrocarburos y su limpieza representa un gran reto debido al difícil acceso de maquinaria.

Ante esta problemática, el uso de sorbentes como método de remoción es una técnica eficaz que produce menores impactos ambientales que otras opciones de limpieza como el uso de dispersantes químicos o la incineración *in situ* (USEPA, 1999).

Diferentes sorbentes sintéticos como el polipropileno o el poliuretano se han utilizado con esta finalidad. Sin embargo, la necesidad de confinamiento para su disposición es una seria limitante al uso de estos materiales.

Los sorbentes naturales y biodegradables representan una opción ambientalmente amigable para la remoción de hidrocarburos en sitios de difícil acceso como costas y estuarios. Algunos de estos sorbentes son el algodón, bagazo, cascarilla de trigo y plumas de pollo (Cervantes-González *et. al.*, 2007).

La producción de pollo en México es abundante y genera una gran cantidad de desechos, entre ellos las plumas. Hasta ahora, las plumas se consideraban un desecho indeseable, sin embargo estas pueden usarse como un sorbente natural de hidrocarburos debido a sus características como insolubilidad en agua, resistencia mecánica y elevada área específica.

3.2. Hipótesis.

Las plumas remueven hidrocarburos debido a su carácter hidrófobo y la disminución del tamaño de la partícula favorece la formación de espacios intersticiales en el biopolímero aumentando su capacidad de retención.

3.3. Objetivo general.

Estudiar la retención de hidrocarburos a partir de biopolímeros naturales (plumas de pollo).

3.4. Objetivos específicos.

- Determinar la capacidad de retención de hidrocarburos (petróleo crudo, gasolina y diesel) del biopolímero.
- Determinar el tiempo óptimo de retención de hidrocarburos del biopolímero (gráficas capacidad de retención vs. tiempo).
- Estudiar el efecto del tamaño de partícula del biopolímero en la capacidad de retención.
- Estudiar el desempeño del biopolímero bajo condiciones dinámicas.

CAPITULO 4. METODOLOGIA

4.1. Pretratamiento del biopolímero.

Las plumas de pollo fueron obtenidas de un rastro avícola ubicado en la congregación El Grande municipio de Coatepec, Veracruz. Previo a su uso, las plumas fueron lavadas con detergente y enjuagadas varias veces con agua potable y finalmente se dejaron secar al sol.

4.2. Clasificación de las plumas.

Debido a la heterogeneidad del biopolímero, fue necesaria su clasificación para llevar a cabo la caracterización del material y los experimentos de sorción. Esta clasificación atendió al tamaño de la pluma y al grosor y distribución del raquis en la pluma. De acuerdo con estas características se formaron 5 diferentes grupos para trabajar con el biopolímero (TP-1, TP-2, TP-3, TP-4 y TP-5). Las características de cada tipo de plumas como la longitud y el grosor de raquis fueron determinadas mediante el promedio de 10 mediciones para cada tipo de plumas.

4.3. Determinación de la capacidad de retención del biopolímero.

La metodología empleada para la determinación de la capacidad de retención es una adaptación de la norma ASTM F 726-99: *Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents* en su apartado *Oil Adsorption Short Test*.

Esta prueba no simula las condiciones reales de operación de un material sorbente en un derrame, sino que proporciona datos ideales del desempeño del sorbente. Las principales diferencias entre esta prueba y la operación real de un sorbente son: 1) el espesor de la capa de hidrocarburo en un derrame no siempre es lo suficientemente grueso para alcanzar la capacidad de retención máxima y 2) esta prueba determina la máxima capacidad de retención sin tomar en cuenta que el sorbente también puede retener agua. La principal utilidad de esta metodología es la de comparar capacidades de retención y la relación costo-beneficio de diferentes materiales para elegir entre uno u otro.

La metodología empleada consistió en pesar para TP-1, TP-2 y TP-3 una muestra de 0.05 g de pluma, para TP-4 y TP-5 se pesó una pluma completa en una balanza analítica Ohaus Pioneer PA214. Cada muestra se introdujo en una bandeja que contenía el hidrocarburo y se dejó flotar libremente durante 1 minuto \pm 20 segundos. Después de este tiempo, la muestra fue sacada y drenada durante 1 minuto \pm 20 segundos mediante la ayuda de una red de poliacrilonitrilo. La muestra fue retirada

de la red y pesada nuevamente. Esta operación se repitió 5 veces para cada uno de los tipos de pluma. La capacidad de retención fue calculada para cada tipo de pluma mediante la siguiente fórmula:

$$CR = \frac{m_t - m_0}{m_0}$$

Donde:

CR = Capacidad de retención.

m_t = Masa del material impregnado (peso del sorbente e hidrocarburo sorbido).

m_0 = Masa del material sorbente seco.

Este procedimiento fue repetido para petróleo crudo (hidrocarburo de media densidad), diesel y gasolina (hidrocarburos de baja densidad).

4.4. Estudio del efecto de tamaño de partícula.

Para determinar el efecto del tamaño de partícula del sorbente, a un lote de plumas (TP-1 cm) le fue cortado el cálamo y el resto fue cortado en segmentos de 1 cm. Posteriormente, estas plumas fueron fraccionadas en presencia de agua destilada y secadas en un horno a 50 °C.

La capacidad de retención para este lote de plumas fue calculada mediante el mismo procedimiento que para las plumas clasificadas en grupos.

4.5. Relación entre el porcentaje de raquis y la capacidad de retención.

La capacidad de retención del vexilo y raquis de las plumas se calculó para los tres hidrocarburos (petróleo, diesel y gasolina). Tanto el raquis como el vexilo usados para este estudio fueron tomados de plumas TP-1, TP-2 y TP-3 y el raquis fue cortado en trozos de aproximadamente 1 cm. Además, para cada tipo de pluma fue determinado el porcentaje en peso de raquis y se analizó la relación entre el porcentaje de raquis y la capacidad de retención de los 5 tipos de plumas.

4.6. Determinación del tiempo óptimo de retención del hidrocarburo.

Para determinar el tiempo óptimo de contacto entre el sorbente y el hidrocarburo se calcularon las capacidades de retención del biopolímero según la metodología

descrita anteriormente a los siguientes tiempos: 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 30 min y 1 h.

4.7. Pruebas de desempeño del sorbente.

La metodología para realizar estas pruebas es una adaptación de la norma ASTM F 726-99: *Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents* en su apartado *Dynamic Degradation Test*. El objetivo principal de esta prueba es el de determinar la capacidad de retención de agua de un material sorbente y sus propiedades lipofílicas bajo condiciones dinámicas.

Para llevar a cabo estos experimentos el procedimiento consistió en agregar 1 L de agua a una jarra de 2 L de capacidad y adicionar la cantidad de pluma necesaria para cubrir la superficie del agua. El peso de la pluma fue previamente determinado. El contenedor fue sellado y montado sobre un agitador a una velocidad de 100 ciclos/minuto durante un periodo de 15 minutos. El contenido de la jarra se dejó decantar durante 2 minutos durante los cuales se anotaron las observaciones correspondientes a las condiciones del sorbente y del agua.

El contenido de la jarra fue filtrado y drenado durante 30 segundos. El peso de la pluma mojada y la capacidad de retención de agua fueron calculadas mediante la misma fórmula empleada para determinar la capacidad de retención de hidrocarburo.

La segunda parte de la prueba consistió en agregar hidrocarburo en la jarra y posteriormente colocar el material sorbente recuperado en el paso anterior. El contenedor se selló y se montó nuevamente en el agitador a una velocidad de 100 ciclos/minuto durante un periodo de 15 minutos. El contenido permaneció en reposo dentro de la jarra durante 2 minutos para que el residuo se sedimentara y se anotaron las observaciones correspondientes.

Cuatro réplicas fueron realizadas de cada experimento con diferentes tamaños de pluma y tipos de agua. Las plumas usadas para estas pruebas fueron TP-1 cm y plumas enteras (mezcla de TP-1, TP-2 y TP-3) mientras que los tipos de agua empleada fueron agua desionizada y una solución acuosa de NaCl 1 M. La solución de NaCl 1 M fue preparada mediante la adición de 1 mol de NaCl (58.5 g) a un matraz aforado de 1 L y su posterior aforo con agua desionizada. La Tabla 4.1 muestra las condiciones para cada experimento.

Tabla 4.1. Condiciones de los experimentos de desempeño del sorbente.

Experimento	Tipo de agua	Tipo de pluma
1	Desionizada	TP-1 cm
2	Desionizada	Enteras (TP-1, TP-2 y TP-3)
3	Salada	TP-1 cm
4	Salada	Enteras (TP-1, TP-2 y TP-3)

CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1. Clasificación de las plumas.

Como muestra la Figura 5.1 la clasificación de las plumas se realizó usando como criterios la longitud de la pluma y el grosor y distribución del raquis. Esta distribución dio origen a cinco tipos que se describen a continuación.

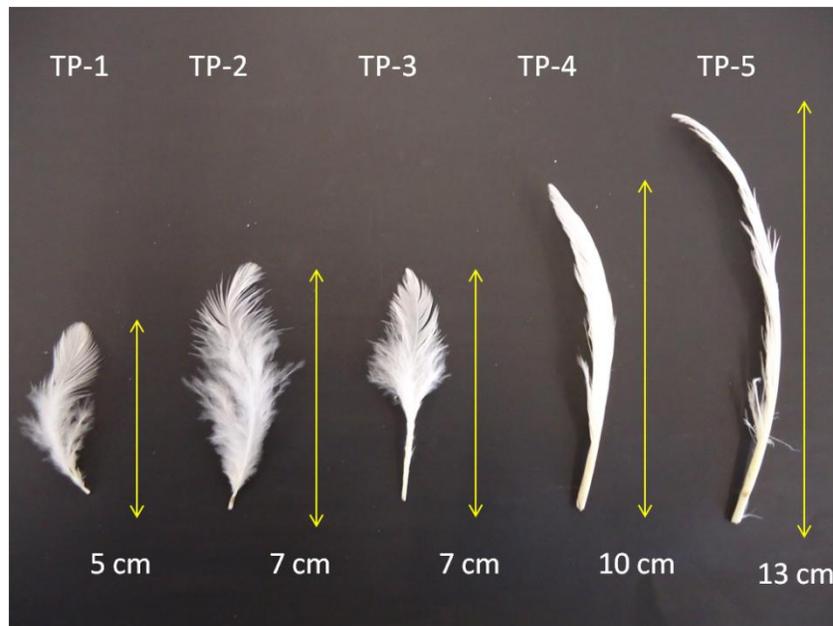


Figura 5.1. Clasificación de las plumas.

Tipo de pluma 1 (TP-1): es la pluma más pequeña, su longitud promedio es de 5 cm y presenta el raquis más delgado de todos con un grosor promedio de 0.63 mm. Este diámetro presenta una disminución gradual a lo largo de la pluma. Su vaxilo es corto y de textura suave. En promedio el peso del raquis es el 14 % del peso de la pluma.

Tipo de pluma 2 (TP-2): la longitud promedio es de 7 cm y grosor promedio de raquis de 0.96 mm. En esta pluma el raquis también disminuye gradualmente y su vaxilo es más abundante y largo que en la pluma 1. La textura del vaxilo también es suave. El raquis representa el 17.5 % del peso de la pluma.

Tipo de pluma 3 (TP-3): este grupo está constituido por plumas de la misma longitud promedio que TP-2 pero con un raquis más grueso (1.20 mm) y más largo (aproximadamente el 50 % de la longitud de la pluma). Otra característica que las distingue de TP-2 es su distribución del raquis a lo largo de la pluma ya que el adelgazamiento del raquis no es gradual sino que es grueso en la base de la pluma y delgado en la parte superior (0.16 mm en promedio). El vaxilo no es tan abundante ni

tan largo como en TP-2 y al estar presente sólo en la mitad de la pluma, el porcentaje de raquis se incrementa hasta 34.5 % (el doble que en TP- 2).

Tipo de pluma 4 (TP-4): es una pluma con un promedio de 10 cm de longitud y un raquis de 2.25 mm de grosor (53 % más grueso que en TP- 3). En esta pluma el raquis también se adelgaza gradualmente. El vexilo es abundante con una consistencia fibrosa. El porcentaje de raquis es de 48.4 %.

Tipo de pluma 5 (TP-5): es la pluma con mayor longitud promedio (13 cm) y con el raquis de mayor grosor (2.77 mm en promedio). A pesar de tener un raquis con un grosor parecido al de la pluma anterior, las características que la diferencian de TP- 4 son: la pluma es 30 % más larga y el vexilo es escaso por lo que su porcentaje en peso de raquis es más alto (67.5 %).

Esta clasificación permitió contar con un biopolímero más homogéneo para llevar a cabo tanto su caracterización como los experimentos de sorción. Las características de cada tipo de pluma se vieron reflejadas en los resultados de su capacidad de retención.

La Tabla 5.1 muestra un resumen de las características de cada uno de los grupos en que fueron clasificadas las plumas.

Tabla 5.1. Características de los diferentes tipos de plumas.

Tipo de pluma	Longitud promedio (cm)	Grosor del raquis (mm)	Porcentaje de raquis.
TP-1	5	0.63	14
TP-2	7	0.96	17.5
TP-3	7	1.20	34.5
TP-4	10	2.25	48.4
TP-5	13	2.77	67.5

La Figura 5.2 muestra en resumen los porcentajes de raquis que constituyen cada tipo de pluma.

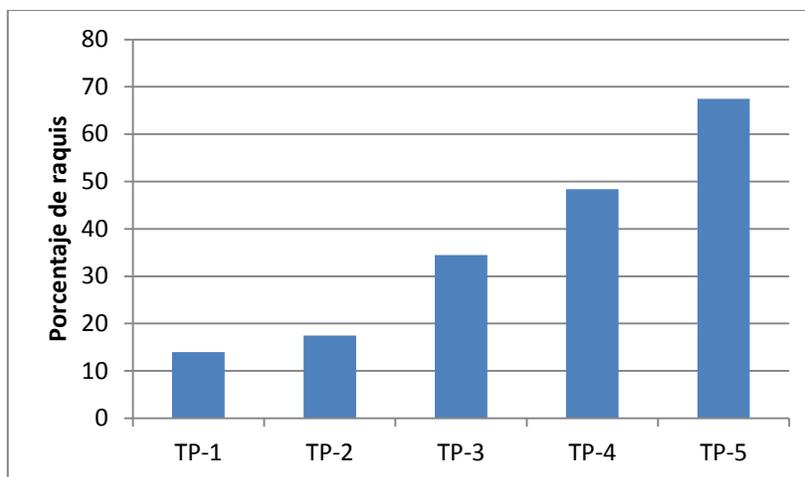


Figura 5.2. Porcentaje de raquis para cada tipo de plumas.

5.2. Capacidad de retención de petróleo crudo.

La Figura 5.3 muestra las capacidades de retención de petróleo crudo para cada tipo de pluma, así como para la pluma cortada en segmentos de 1cm y para el vexilo y raquis. Los resultados se presentan en gramo de hidrocarburo por gramo de sorbente.

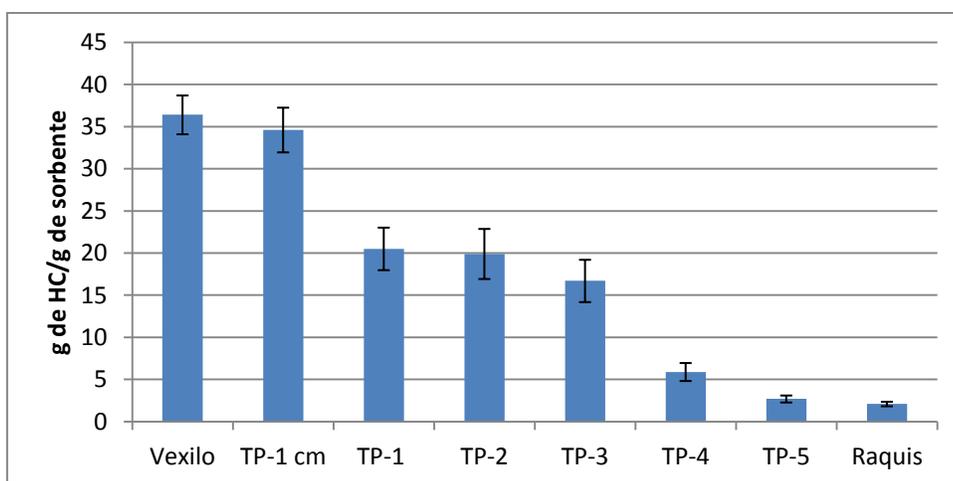


Figura 5.3. Capacidad de retención de petróleo crudo.

El vexilo y la pluma cortada en trozos de 1 cm mostraron capacidades de retención de 36.4 g/ g sorbente y 34.6 g/g sorbente respectivamente. Estos valores reflejan un desempeño superior al resto de las plumas probadas. Para TP-1, TP-2, TP-3, TP-4 y TP-5 las capacidades de retención promedio fueron de 20.5 g/g sorbente, 19.9 g/g sorbente, 16.7 g/g sorbente, 5.9 g/g sorbente y 2.7 g/g sorbente respectivamente. El raquis mostró la capacidad de sorción más baja con apenas 2.1 g/g sorbente. El TP-1 presentó el mejor desempeño de las plumas enteras con el 56 % de la capacidad

de retención con respecto al vexilo, mientras que TP-2, TP-3, TP-4 y TP-5 tuvieron 55 %, 46 %, 16 % y 7 %, respectivamente. El raquis tuvo el 6 % de la capacidad de retención del vexilo.

5.3. Capacidad de retención para el diesel.

La Figura 5.4 muestra los resultados de los experimentos de sorción con diesel.

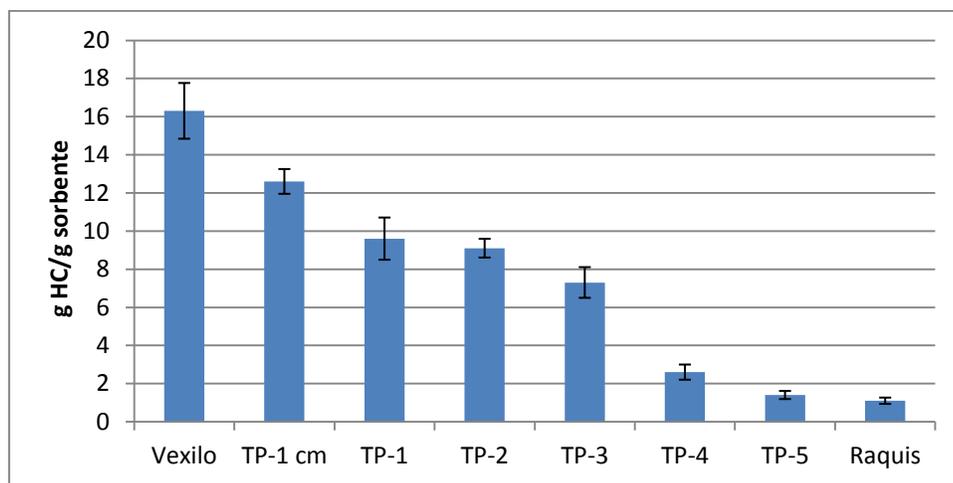


Figura 5.4. Capacidad de retención de diesel.

En general, las capacidades de retención de las plumas en sus diferentes tipos para el diesel fueron más bajas que para el petróleo crudo. Una vez más, los mejores resultados se obtuvieron para el vexilo y la pluma de 1 cm con capacidades de retención de 16.3 g/g sorbente y 12.6 g/g sorbente, respectivamente. Las capacidades de retención para las plumas enteras fueron de 9.6 g/g sorbente para TP-1; 9.1 g/g sorbente para la TP-2; 7.3 g/g sorbente para TP-3; 2.6 g/g sorbente para TP-4; y 1.4 g/g sorbente para TP-5. El raquis mostró la capacidad de retención más baja con 1.1 g/g sorbente. Los porcentajes de la capacidad de retención con respecto al vexilo (máxima capacidad de retención) fueron para cada tipo de pluma entera: 59 %, 56 %, 45 %, 16 % y 9 % respectivamente. El raquis mostró una capacidad de retención del 7 % con respecto a la capacidad del vexilo.

5.4. Capacidad de retención de gasolina.

Los resultados de la capacidad de retención de gasolina del biopolímero se muestran en la Figura 5.5. Estos resultados siguen la misma tendencia de las capacidades de retención de los otros dos hidrocarburos: la capacidad de retención más alta fue para el vexilo con 12 g/g sorbente, seguido por TP-1 cm cuya capacidad de retención fue de 10.7 g/g sorbente. Las capacidades de retención para los 5 tipos de plumas

fueron: para TP-1 6.2 g/g sorbente; TP-2 5.1 g/g sorbente; TP-3 4.9 g/g sorbente; TP-4 2.1 g/g sorbente y para TP-5 1.2 g/g sorbente. Nuevamente el raquis mostró la menor capacidad de retención con 0.6 g/g sorbente. Estas capacidades de retención representan el 52 %, 43 %, 41 %, 18%, 10% y 5 % de la capacidad de retención del vexilo para TP-1, TP-2, TP-3, TP-4, TP-5 y el raquis, respectivamente.

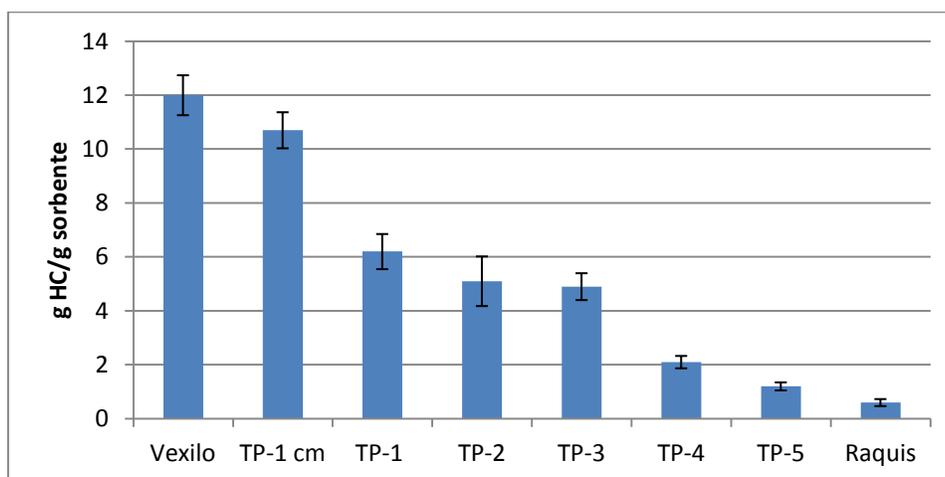


Figura 5.5. Capacidad de retención de gasolina.

Las capacidades de retención encontradas para las plumas de pollo son desde un 15 hasta un 250 % mayores en comparación con las encontradas por Choi y Cloud (1992) para materiales como el algodón y el kenaf con capacidades de retención de 30 y 10 g/g sorbente para petróleo crudo. Las plumas también mostraron un desempeño hasta 120 % mejor que los materiales celulósicos probados por Ortiz-González *et. al.*, (2006) como la fibra de coco, buchón de agua y fibra de caña con capacidades de retención de 15.8, 11.2 y 7.5 g/g sorbente para hidrocarburo medio. La capacidad de retención de las plumas son cerca del 200 % más altas que las del sorbente comercial orgánico natural fabricado a base de musgo de turba, ya que según las especificaciones del proveedor este sorbente tiene una capacidad de retención de 9 a 12 g/g sorbente (Vallen Proveedora Industrial, 2010).

El buen desempeño de la sorción de hidrocarburos de las plumas de pollo puede ser explicado fundamentalmente por dos razones. La primera, el carácter hidrofóbico de las plumas que es similar al de los hidrocarburos lo que produce afinidad química entre ellos. La segunda, la elevada área específica del biopolímero debida a los espacios intersticiales formados por su compleja red de fibras de queratina (Roig *et. al.*, 2003).

Los sorbentes pueden retener hidrocarburos tanto por mecanismos de absorción como de adsorción. En la absorción el hidrocarburo es incorporado dentro del cuerpo

del material mientras que en la adsorción el hidrocarburo es atraído hacia la superficie del material sorbente (ITOPF, 2012).

En el mecanismo de la absorción, el líquido entra por difusión a la matriz del material sorbente y se incorpora a ella de manera que no se puede recuperar por escurrimiento o mediante su exprimido. Este fenómeno es efectivo para hidrocarburos livianos y en menor medida para hidrocarburos de mediana viscosidad (USEPA, 2011).

La adsorción de hidrocarburos en los materiales sorbentes se debe a factores como: las propiedades de humedecimiento del material, capilaridad, cohesión/adhesión y área específica que son explicados a continuación.

Propiedades de humedecimiento. Para que se lleve a cabo la adsorción, el hidrocarburo debe mojar el material y expandirse sobre su superficie mejor que el agua. Para que un líquido moje un sólido, el líquido debe tener una tensión superficial menor que la tensión superficial crítica del sólido (ITOPF, 2012).

Capilaridad. En algunos materiales la adsorción ocurre por capilaridad. La capilaridad es dependiente de las tensiones superficiales del sólido y el líquido y de la viscosidad del hidrocarburo. La capilaridad es un mecanismo de sorción importante sobre todo para los hidrocarburos de baja viscosidad (ITOPF, 2012).

Cohesión/adhesión. La cohesión es la atracción entre las moléculas de una misma sustancia, esta fuerza se opone al deslizamiento de unas moléculas sobre otras por lo que se opone a la expansión de dicha sustancia sobre una superficie sólida. La adhesión por su parte, se refiere a la atracción de un material hacia otro. El funcionamiento de los materiales sorbentes se basa en estos dos procesos: en la adhesión del hidrocarburo a la superficie del sorbente y en la cohesión del hidrocarburo que causa que mayor cantidad de hidrocarburo sea retenido en el sorbente (ITOPF, 2012).

Área específica. El área específica es determinante en la capacidad de retención y velocidad de sorción de un material sorbente. Un sorbente debe tener un área específica grande con relación a su volumen. Esta área se refiere tanto a la superficie externa como a la superficie interna disponible de un material. Para los hidrocarburos viscosos incapaces de penetrar un sorbente, la retención estará determinada por el área externa del material (ITOPF, 2012).

La sorción de los hidrocarburos livianos como la gasolina y el diesel se debe por un lado al fenómeno de la absorción, ya que al ser tan poco viscosos, pueden penetrar por difusión a la estructura molecular del sorbente (Ortiz-González, 2006). Por otro

lado, la adsorción se presenta porque esta baja viscosidad también les permite adsorberse en el material por capilaridad (ITOPF, 2012).

En el caso del petróleo crudo que es un hidrocarburo medio, la capacidad de retención se debe también a ambos procesos: absorción y adsorción. La absorción funciona como en el caso de los hidrocarburos ligeros por difusión (Ortiz-González, 2006). Sin embargo, el mecanismo principal de retención del crudo en las plumas es la adsorción debido a que los hidrocarburos más viscosos se adhieren a la superficie del sorbente más efectivamente que los hidrocarburos ligeros (USEPA, 2011).

5.5. Efecto del tamaño de la pluma.

La Figura 5.6 muestra una comparación entre las capacidades de retención de TP-1 cm y los demás tipos de plumas. En ella se aprecia que el desempeño fue mucho mejor para TP-1 cm que para el resto de las plumas. TP-1 mostró las mejores capacidades de retención de las plumas enteras, sus capacidades de retención comparadas con las de TP-1 cm fueron del 59 % para petróleo crudo, 76 % para diesel y 58 % para gasolina.

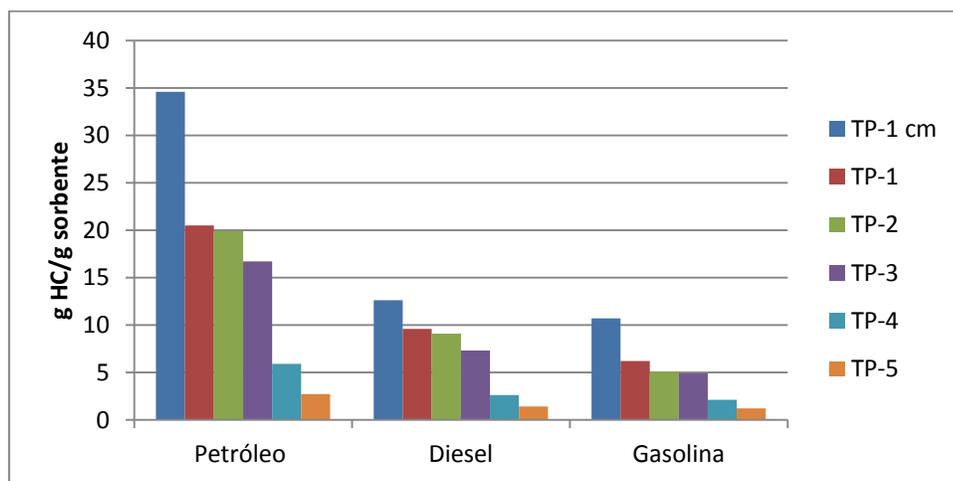


Figura 5.6. Efecto del tamaño de partícula en la capacidad de retención.

Este efecto puede atribuirse a que la disminución del tamaño de las plumas favorece tanto los procesos de absorción como de adsorción. La absorción se favorece ya que al cortar las plumas se generan un gran número de caminos que permiten la difusión del hidrocarburo hacia el interior de los espacios generados en el sorbente. La adsorción es incrementada debido a que un tamaño de pluma pequeño aumenta el área específica del biopolímero permitiendo que el hidrocarburo disponga de un área mayor donde poder adherirse.

5.6. Relación entre el porcentaje de raquis y la capacidad de retención.

La Figura 5.7 muestra la relación entre la proporción de raquis de cada tipo de pluma y su capacidad de retención para los tres tipos de hidrocarburos. Como se puede observar, la capacidad de retención es inversamente proporcional a la cantidad de raquis que constituye a la pluma. El valor máximo para la capacidad de retención se alcanza en ausencia de raquis mientras que el raquis solo determina el valor mínimo.

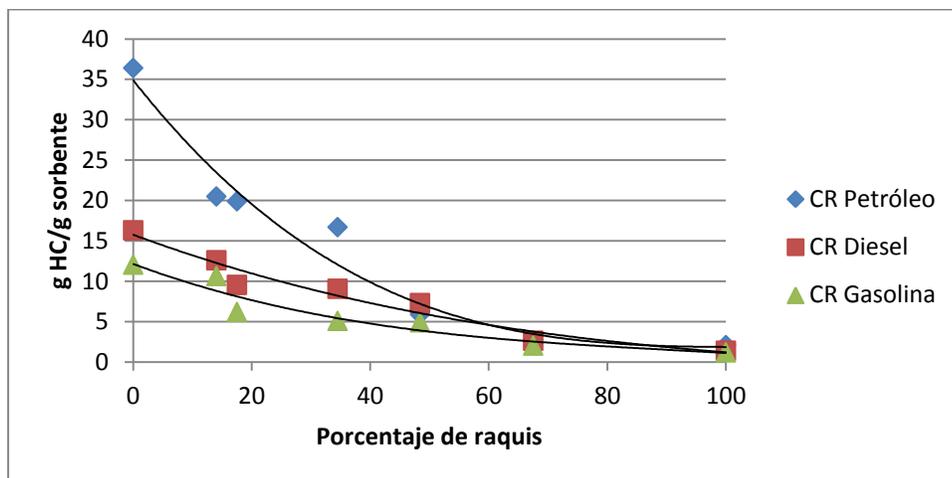


Figura 5.7. Relación entre el porcentaje de raquis y la capacidad de retención.

Esta tendencia se debe a que mientras el raquis es un sólido poco poroso, el tejido vexilar está compuesto de una red de fibras con gran cantidad de intersticios. Esta porosidad externa aumenta el área específica del material favoreciendo sobre todo los procesos de adsorción del hidrocarburo ya que este fenómeno es de tipo superficial.

5.7. Tiempo óptimo de retención.

La Figura 5.8 relaciona los datos de capacidad de retención con el tiempo transcurrido. Como se puede observar en la gráfica, de los 30 segundos a los 2 minutos se observa una tendencia ascendente en la capacidad de retención, sin embargo, después de este tiempo la tendencia permanece casi constante. Después de los cinco minutos se observa cierta disminución en la capacidad de retención. Este fenómeno se debe a que cuando el biopolímero ha sorbido su máxima capacidad, el exceso de hidrocarburo puede causar su deformación y la liberación de hidrocarburo que ya se encontraba sorbido (USEPA, 2011).

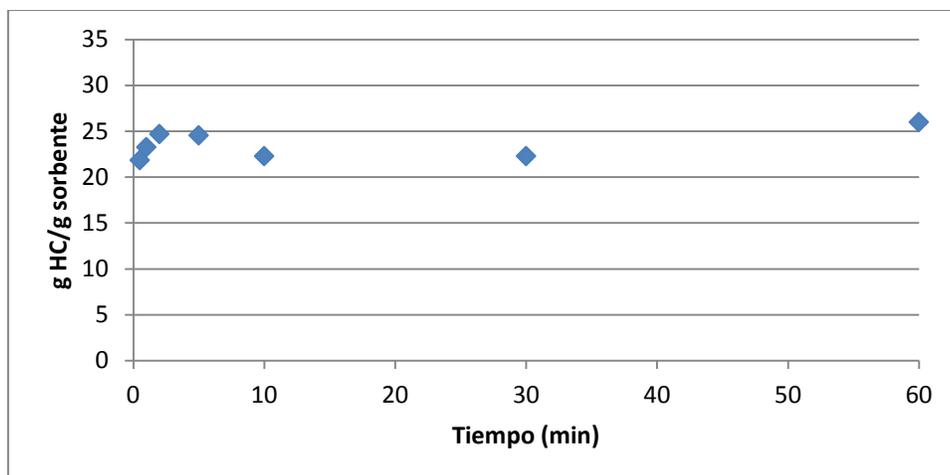


Figura 5.8. Tiempo óptimo de retención del biopolímero.

Por lo tanto, podemos considerar que el tiempo óptimo de retención de hidrocarburo para el sorbente analizado es de 2 minutos, ya que a este intervalo de tiempo las plumas han sorbido el 95 % de su capacidad máxima.

5.8. Desempeño del sorbente.

La finalidad de estas pruebas fue la de someter al sorbente a condiciones de operación similares a las de un derrame de hidrocarburos como la presencia de agua e hidrocarburo y movimiento.

La Figura 5.9 muestra la capacidad de flotación de las plumas de 1 cm (TP-1 cm) en agua salada y se observa que una pequeña cantidad de plumas se hundió causando turbidez en el agua. Este comportamiento fue similar tanto en el agua desionizada como en el agua salada (1M). La retención de agua de estas plumas fue de 7 g/g sorbente para el agua desionizada y de 7.5 g/g sorbente para el agua salada. La Figura 5.10 muestra el desempeño del sorbente en presencia de hidrocarburo. Como se puede apreciar, gran parte del hidrocarburo fue retenido en el biopolímero y el hidrocarburo residual formó pequeñas gotas en la superficie del agua. La Figura 5.11 muestra la apariencia del agua al retirar el sorbente con hidrocarburo adherido a las paredes de la jarra.



Figura 5.9. Flotabilidad de las plumas de 1cm en agua salada.

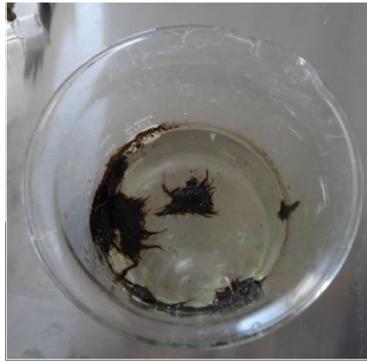


Figura 5.10. Desempeño de las plumas de 1cm en agua salada y presencia de hidrocarburo.

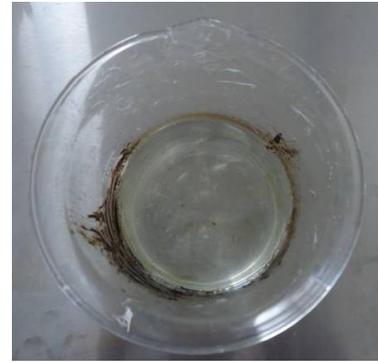


Figura 5.11. Apariencia del agua al retirar la capa el sorbente con hidrocarburo.

Las Figuras 5.12 y 5.13 muestran el desempeño de las plumas enteras durante estas pruebas en ausencia y en presencia de hidrocarburo. Contrario a lo que ocurrió con TP-1cm, la totalidad de las plumas enteras se mantuvo a flote en ambos tipos de agua. La retención de agua para estas plumas fue de 2.6 g/g sorbente de agua desionizada y 3.6 g/g sorbente de agua salada. En cuanto al desempeño mostrado en presencia de hidrocarburo, todas las plumas impregnadas flotaron pero a diferencia de TP-1 cm, el hidrocarburo no fue retenido por las plumas sino que formó una capa superficial espesa y fácil de retirar. La Figura 5.14 muestra la apariencia del agua al retirar dicha capa.



Figura 5.12. Flotabilidad de las plumas enteras en agua salada.



Figura 5.13. Desempeño de las plumas enteras en agua salada y presencia de hidrocarburo.



Figura 5.14. Apariencia del agua al retirar la capa de sorbente e hidrocarburo.

De acuerdo con estas observaciones las plumas enteras tuvieron un mejor desempeño para la prueba de flotabilidad, sin embargo, TP-1 cm mostró mejores resultados en la prueba de sorción de hidrocarburo.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

De acuerdo con los resultados encontrados durante esta investigación, las plumas de pollo son un sorbente efectivo de hidrocarburos en agua. Este biopolímero mostró una mejor capacidad de retención que otros sorbentes naturales orgánicos como el algodón, kenaf, fibra de coco, buchón de agua y fibra de caña. El desempeño de las plumas fue incluso mejor que el reportado para sorbentes comerciales orgánicos fabricados a base de musgo.

Las plumas tienen diferentes capacidades de retención dependiendo de su tamaño y porcentaje de raquis. La mejor capacidad de retención se logra cuando se usa solamente el vexilo de la pluma. Sin embargo, el procedimiento de separar el vexilo del raquis de la pluma puede ser tardado y complicado por tanto, poco funcional para aplicaciones prácticas. Por esta razón, es mejor usar las plumas cortadas en segmentos de 1cm ya que con ellas se obtiene una capacidad de retención casi tan alta como con el vexilo.

Además, los resultados de las pruebas de desempeño fueron aceptables ya que la mayoría de las plumas se mantuvo a flote tanto en ausencia como en presencia de hidrocarburo. El tiempo óptimo de retención de 2 min también es adecuado para un sorbente de hidrocarburos, ya que permitiría dar una rápida respuesta ante un posible derrame.

Existen dos ventajas importantes de usar las plumas de pollo como sorbente de hidrocarburos. En primer lugar, su abundancia y bajo costo ya que hasta ahora son consideradas un subproducto indeseable de la industria avícola del cual se generan alrededor de 200,000 toneladas anuales. Por otro lado, la posibilidad de biodegradar las plumas con hidrocarburo es una opción ambientalmente amigable y además, elimina los costos de almacenamiento y disposición final que requieren otros sorbentes de origen sintético.

Dentro de las recomendaciones que se pueden hacer al concluir este trabajo se encuentran:

- Continuar con la investigación de la biodegradación de plumas impregnadas con hidrocarburos mediante cepas bacterianas.
- Llevar a cabo un estudio económico exhaustivo de la viabilidad económica del uso de las plumas de pollo como sorbente de hidrocarburos.
- Usar las plumas de pollo en pequeños derrames para observar su desempeño en condiciones reales de operación.

- Probar la sorción de las plumas de pollo en configuraciones como *booms* o calcetines en pequeños derrames.
- Implementar las plumas de pollo como un sorbente comercial de hidrocarburos.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

- Adebajo, M.O., Frost, R.L., Kloprogge, J.T. Carmody, O., Kokot, S. (2003). Porous materials for oil spill cleanup: a review of synthesis and absorbing properties. *Journal of Porous Mater* 10, 159-170.
- Aguayo-Villareal, I.A. Bonilla-Petriciolet, A. Hernández-Montoya, V. Montes-Morán, M.A. Reynel-Ávila, H.E. (2011). Batch and column studies of Zn²⁺ removal from aqueous solution using chicken feathers as sorbents. *Chemical Engineering Journal* 167, 67-76.
- Annunciado, T.R. Sydenstricker, T.H.D. y Amico, S.C. (2005). Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills. *Marine Pollution Bulletin* 50, 1340-1346.
- Ammer, A. A. Hussein, M y Sawsan I. I. (2009). Oil sorption using carbonized pith bagasse. Application of carbonized pith bagasse as loose fiber. *Global Nest Journal* 11, 440-448.
- ASTM International. (2012). ASTM F 726-99 *Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents*. Recuperado el 23 de abril de 2012, de <http://ebookbrowse.com/astm-f726-2006-pdf-d220768065>.
- ATSDR. (1999). Public Health Statement: Total Petroleum Hydrocarbons (TPH). Recuperado el 7 de febrero de 2012 de http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs123.html.
- Biblioteca Digital ILCE. (2012). Plumas y plumajes. Recuperado el 9 de marzo de 2012, de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/138/htm/sec_8.htm.
- Botello, A. V. Villanueva, S. García-Hernández, L. (2007). Los derrames de petróleo en el medio marino. Instituto Nacional de Ecología. Recuperado el 7 de mayo de 2012 de <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/507/cap10.html>.

Canadian Centre for Energy. (2012). Oil sands and heavy oil. Recuperado el 7 de febrero de 2012 de <http://www.centreforenergy.com/AboutEnergy/ONG/OilsandsHeavyOil/Overview.asp>

Cervantes-González, E. Rojas-Avelizapa, L.I. Cruz-Camarillo, R. Rojas-Avelizapa, N.G. (2009). Effect of keratinous waste addition on improvement of crude oil hydrocarbon removal by a hydrocarbon-degrading and keratinolytic mixed culture. *International Biodeterioration & Biodegradation* 63, 1018-1022.

Choi, H. Cloud, R. M. (1992). Natural Sorbents in Oil Spill Cleanup. *Environmental Science Technology* 26, 772-776.

De la Rosa, G. Reynel-Ávila, H.E., Bonilla-Petriciolet, A., Cano-Rodríguez, I. Velasco-Santos, C y Martínez-Hernández, A.L. (2008). Recycling Poultry Feathers for Pb removal from wastewater: kinetic and equilibrium studies. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 47, 394-402.

Fernández-Linares, L.C. Rojas-Avelizapa, N. G. Roldán-Carrillo, T. G. Ramírez-Islas, M. E. Zegarra Martínez, Héctor G. Uribe-Hernández, R. Reyes Ávila, R. J. Flores-Hernández, D. Arce-Ortega, J. M. (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. México, D.F. Instituto Mexicano del Petróleo.

Hussein, M. Amer, A.A. Sawsan, I.I. (2009). Oil spill sorption using carbonized pith bagasse. Application of carbonized pith bagasse as loose fiber. *Global Nest Journal* 4, 440-448.

INEGI. (2011). Cuéntame Economía. Recuperado el 8 de junio de 2011 de <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/petroleo/pib.aspx?tema=E>

IMO. (2005). Manual sobre la contaminación ocasionada por hidrocarburos. Arkle Print Ltd. Northampton. Recuperado el 20 de mayo de 2011, de <http://books.google.com/books?id=8YIQn3DzQXIC&pg=PA107&dq=sorbentes+%2B+hidrocarburos&hl=es&ei=CzXfTZGvKeHW0QGB6OCpCg&sa=X&oi=bo>

ok_result&ct=result&resnum=1&ved=0CC0Q6AEwAA#v=onepage&q=sorbentes%20%20%20hidrocarburos&f=false.

ITOPF. (2002). Fate of marine oil spills. Technical Information Paper. Londres, Inglaterra.

ITOPF. (2010). Case histories. Recuperado el 21 de marzo de 2012 de <http://www.itopf.com/information-services/data-and-statistics/case-histories/>

ITOPF. (2011). HANDBOOK 2011/12. Londres, Inglaterra.

ITOPF. (2012). Use of sorbent materials in oil spill response. Technical Information Paper. Londres, Inglaterra.

Kar, P. Misra, M. (2004). Use of keratin fiber for separation of heavy metals from water. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 79, 1313-1319.

Kondo, G. (1975). Use of Sorbents for Oil Spills. *Marine Pollution Bulletin* 5, 73-76.

Lim, T.T. Huang, X. (2007). Evaluation of kapok (*Ceiba pentandra* (L.) Gaert.) as a natural hollow hydrophobic-oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup. *Chemosphere* 66, 955-963.

Olguín, E J. Hernández, M. E. Sánchez-Galván, G. (2007). Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 23, 139-154.

Ortiz-González, D.P. Andrade-Fonseca, F. Rodríguez-Niño G. Montenegro-Ruiz, C. (2006). Biomateriales sorbentes para la limpieza de derrames de hidrocarburos en suelos y cuerpos de agua. *Ingeniería e Investigación* 26, 20-27.

Ossa-H, E.A. Cano M, F. Arango M, J. Montoya, C. (2007). Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de fibras de vidrio y queratina. *Scientia Et Technica* 36, 407-412.

- Roig, M.G., Ramírez, F.I. y Manzano, T. (2003). Bioadsorción de metales pesados de aguas ácidas de minas II. Sobre residuos con queratina (pelos de cerdo, pluma de ave) y quitina (caparazones de crustáceos). *INGENIERÍA QUÍMICA* 400, 184-204.
- Salinas-S, Pablo D. (2010). Producción de harina de plumas de pollo y su utilización como un adsorbente de hidrocarburos en agua dulce. Tesis de Licenciatura. Escuela Politécnica del Ejército. Sangolguí, Ecuador.
- Schmidt, W.F. Barone, J.R. (2004). New uses for chicken feathers keratin fiber. *Poultry Waste Management Symposium Proceedings*. 99-101.
- SIAP. (2011). Recuperado el 10 de abril de 2011, de http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=369.
- Silos-Rodríguez, J.M. (2008). Manual de lucha contra la contaminación por hidrocarburos. Universidad de Cádiz. Cádiz, España.
- USEPA. (1999). *Understanding Oil Spills and Oil Spill Response*. Autor. Estados Unidos de América.
- USEPA. (2011). Emergency management. Recuperado el 17 de enero de 2012, de <http://www.epa.gov/osweroe1/content/learning/sorbents.htm>.
- USDA. (2002). Chicken Feathered Industrial Products. *Science Update*, 27.
- Vallen Proveedora Industrial. (2010). Absorbentes de hidrocarburos. Recuperado el 14 de marzo de 2012 de http://www.vallen.com.mx/products.php?category_id=5188.
- Wei, Q.F., Mather, R.R., Fotheringham, A.F., Yang, R.D. (2003). Evaluation of nonwoven polypropylene oil sorbents in marine oil-spill recovery. *Marine Pollution Bulletin* 46, 780-786.

ANEXO I. CÁLCULOS.

5.1. Características de las plumas.

Longitud promedio (cm).

TP	1	2	3	4	5
1	5	7	8	10	14
2	5	7.5	7	11.5	12
3	4.5	8.3	6.5	10	13
4	5.5	7	6.5	9.5	12.5
5	5	6.8	7	10	13
6	4.8	6.9	6.5	8	12
7	5.2	6	8	12	13.5
8	5	7.8	7.5	8	14.5
9	5	6.1	7	10.5	12
10	5.3	6.5	6	10	13
Promedio	5	7	7	10	13

Grosor promedio del raquis (mm).

TP	1	2	3	4	5
1	0.55	0.96	1.15	2.37	2.6
2	0.74	1.05	1.28	2.1	2.62
3	0.62	0.96	1.16	2.43	2.58
4	0.6	0.89	1.32	2.12	2.93
5	0.62	0.97	1.19	2.25	2.64
6	0.6	0.8	1.28	2.45	2.85
7	0.57	0.99	1.24	2.16	2.77
8	0.58	1	1.1	2.07	2.94
9	0.72	0.94	1.14	2.41	2.9
10	0.66	1.05	1.12	2.17	2.89
Promedio	0.63	0.96	1.2	2.25	2.77

Porcentaje de raquis.

TP-1		
Peso pluma (g)	Peso raquis (g)	% raquis
0.0109	0.0014	12.8
0.0134	0.0022	16.4
0.012	0.0017	14.2
0.0075	0.001	13.3
0.0125	0.0022	17.6
0.0125	0.0016	12.8
0.009	0.0011	12.2
0.0095	0.0014	14.7
0.0119	0.0013	10.9
0.0098	0.0015	15.3
Promedio		14

TP-2		
Peso pluma (g)	Peso raquis (g)	% raquis
0.0203	0.0036	17.7
0.0206	0.003	14.6
0.015	0.003	20
0.0141	0.0024	17
0.0173	0.0025	14.5
0.0206	0.004	19.4
0.0227	0.0041	18.1
0.0212	0.0039	18.4
0.0203	0.003	14.8
0.0184	0.0038	20.7
Promedio		17.5

TP-3		
Peso pluma (g)	Peso raquis (g)	% raquis
0.021	0.0069	32.9
0.0162	0.0046	28.4
0.0191	0.0068	35.6
0.0202	0.0085	42.1
0.0187	0.0053	28.3
0.0155	0.0056	36.1
0.0169	0.0052	30.8
0.0183	0.0067	36.6
0.0208	0.0076	36.5
0.0203	0.0076	37.4
Promedio		34.5

TP-4		
Peso pluma (g)	Peso raquis (g)	% raquis
0.0948	0.0555	58.5
0.095	0.0467	49.2
0.0947	0.057	60.2
0.075	0.0366	48.8
0.0886	0.042	47.4
0.079	0.0302	38.2
0.0589	0.0247	41.9
0.0621	0.0258	41.5
0.0545	0.0325	59.6
0.0541	0.0208	38.4
Promedio		48.4

TP-5		
Peso pluma (g)	Peso raquis (g)	% raquis
0.1612	0.1141	70.8
0.1614	0.1041	64.5
0.1697	0.1047	61.7
0.1803	0.1133	62.8
0.1733	0.1208	69.7
0.182	0.1287	70.7
0.1638	0.1128	68.9
0.1567	0.1087	69.4
0.1821	0.1159	63.6
0.1852	0.1348	72.8
Promedio		67.5

5.2. Capacidad de retención de petróleo crudo (g de hidrocarburo/g de sorbente).

Vexilo		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0498	1.937	37.9
0.0498	1.7015	33.2
0.05	1.945	37.9
0.0498	1.78	34.7
0.0502	1.9716	38.3
Promedio		36.4

Raquis		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0498	0.1411	1.8
0.0498	0.1511	2
0.0495	0.1597	2.2
0.0502	0.1757	2.5
0.0499	0.148	2
Promedio		2.1

TP-1		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0504	1.0837	20.5
0.0508	1.0338	19.4
0.0504	1.148	21.8
0.05	1.2345	23.7
0.0505	0.9079	17
Promedio		20.5

TP-2		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0504	1.2025	22.9
0.051	1.2333	23.2
0.0509	0.8946	16.6
0.0502	0.9733	18.4
0.0509	0.987	18.4
Promedio		19.9

TP-3		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.051	0.8247	15.2
0.0515	1.0335	19.1
0.0514	0.7429	13.5
0.0513	0.8877	16.3
0.05	1.0169	19.3
Promedio		16.7

TP-4		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.076	0.6298	7.3
0.0881	0.4928	4.6
0.0848	0.6405	6.6
0.0872	0.5642	5.5
0.0834	0.5366	5.4
Promedio		5.9

TP-5		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.1639	0.7025	3.3
0.1585	0.5145	2.2
0.162	0.6023	2.7
0.1637	0.5507	2.4
0.1583	0.5923	2.7
Promedio		2.7

TP-1 cm		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0502	1.8673	36.2
0.0502	1.6677	32.2
0.0503	1.7743	34.3
0.0505	1.9809	38.2
0.05	1.6506	32
Promedio		34.6

5.3. Capacidad de retención de diesel (g de hidrocarburo/ g de sorbente).

Vexilo		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.05	0.9656	18.3
0.0462	0.7936	16.2
0.0463	0.7556	15.3
0.0465	0.7239	14.6
0.0502	0.9111	17.1
Promedio		16.3

Raquis		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0501	0.1009	1
0.0509	0.0955	0.9
0.0504	0.1128	1.2
0.05	0.0988	1
0.0509	0.1151	1.3
Promedio		1.1

TP-1		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0497	0.5139	9.3
0.0502	0.4802	8.6
0.0492	0.4739	8.6
0.0499	0.5515	10.1
0.051	0.6204	11.2
Promedio		9.6

TP-2		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0506	0.49	8.7
0.0497	0.5207	9.5
0.0513	0.5082	8.9
0.0501	0.5356	9.7
0.0506	0.4843	8.6
Promedio		9.1

TP-3		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0499	0.4466	7.9
0.051	0.4405	7.6
0.0478	0.334	6
0.0498	0.4008	7
0.0501	0.4449	7.9
Promedio		7.3

TP-4		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0573	0.225	2.9
0.0542	0.2102	2.9
0.0503	0.1964	2.9
0.0536	0.1618	2
0.0503	0.175	2.5
Promedio		2.6

TP-5		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.1476	0.3143	1.1
0.1615	0.4307	1.7
0.1646	0.3905	1.4
0.1628	0.394	1.4
0.1765	0.4276	1.4
Promedio		1.4

TP-1 cm		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0502	0.6935	12.8
0.0495	0.6907	13
0.0502	0.7245	13.4
0.0507	0.6523	11.9
0.05	0.6478	12
Promedio		12.6

5.4. Capacidad de retención de gasolina (g de hidrocarburo/g de sorbente) .

Vexilo		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0502	0.6758	12.5
0.0506	0.6948	12.7
0.0507	0.6813	12.4
0.05	0.6357	11.7
0.0504	0.6019	10.9
Promedio		12

Raquis		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0497	0.0771	0.6
0.0499	0.0876	0.8
0.0502	0.076	0.5
0.0497	0.0763	0.5
0.0504	0.0872	0.7
Promedio		0.6

TP-1		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0497	0.3561	6.2
0.0494	0.3919	6.9
0.0506	0.328	5.5
0.0506	0.3944	6.8
0.0494	0.3285	5.6
Promedio		6.2

TP-2		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0496	0.2512	4.1
0.0502	0.356	6.1
0.0496	0.337	5.8
0.0508	0.3232	5.4
0.0515	0.267	4.2
Promedio		5.1

TP-3		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0487	0.285	4.9
0.0504	0.2912	4.8
0.0495	0.3183	5.4
0.0498	0.2565	4.2
0.049	0.3135	5.4
Promedio		4.9

TP-4		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0837	0.2555	2.1
0.0845	0.2598	2.1
0.0835	0.2805	2.4
0.0811	0.2331	1.9
0.0959	0.2709	1.8
Promedio		2.1

TP-5		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.1486	0.303	1
0.1535	0.3423	1.2
0.1475	0.3569	1.4
0.142	0.3136	1.2
0.1409	0.2956	1.1
Promedio		1.2

TP-1 cm		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.0499	0.5707	10.4
0.0508	0.5362	9.6
0.0505	0.609	11.1
0.0497	0.6068	11.2
0.0499	0.5987	11
Promedio		10.7

Porcentajes de capacidad de retención con respecto al vexilo.

Petróleo.

Tipo de pluma	CR (g/g sorbente)	% CR
Vexilo	36.4	100
TP-1	20.5	56
TP-2	19.9	55
TP-3	16.7	46
TP-4	5.9	16
TP-5	2.7	7
Raquis	2.1	6

Diesel.

Tipo de pluma	CR (g/g sorbente)	% CR
Vexilo	16.3	100
TP-1	9.6	59
TP-2	9.1	56
TP-3	7.3	45
TP-4	2.6	16
TP-5	1.4	9
Raquis	1.1	7

Gasolina.

Tipo de pluma	CR (g/g sorbente)	% CR
Vexilo	12	100
TP-1	6.2	52
TP-2	5.1	43
TP-3	4.9	41
TP-4	2.1	18
TP-5	1.2	10
Raquis	0.6	5

5.5. Efecto del tamaño de la pluma.

Tipo de pluma	CR petróleo (g/g sorbente)	CR diesel (g/g sorbente)	CR gasolina (g/g sorbente)	% CR petróleo	% CR diesel	% CR gasolina
TP-1 cm	34.6	12.6	10.7	100	100	100
TP-1	20.5	9.6	6.2	59	76	58
TP-2	19.9	9.1	5.1	58	72	48
TP-3	16.7	7.3	4.9	48	58	46
TP-4	5.9	2.6	2.1	17	21	20
TP-5	2.7	1.4	1.2	8	11	11

5.6. Relación entre porcentaje de raquis y capacidad de retención.

Tipo de pluma	%raquis	CR petróleo (g/g sorbente)	CR diesel (g/g sorbente)	CR gasolina (g/g sorbente)
Vexilo	0	36.4	16.3	12
TP-1	14	20.5	12.6	10.7
TP-2	17.5	19.9	9.6	6.2
TP-3	34.5	16.7	9.1	5.1
TP-4	48.4	5.9	7.3	4.9
TP-5	67.5	2.7	2.6	2.1
Raquis	100	2.1	1.4	1.2

5.7. Tiempo óptimo de retención (TP-1).

Tiempo (min)	CR (g/g sorbente)	% CR óptima
0.5	21.85	84
1	23.27	89.5
2	24.69	95
5	24.55	94.4
10	22.29	85.7
30	22.29	85.7
60	26	100

5.8. Pruebas de desempeño (retención de agua).

TP-1 cm		
<i>Agua desionizada</i>		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.6054	4.8584	7
<i>Solución NaCl 1 M</i>		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.6094	5.1918	7.5

Plumas completas (TP-1 TP-2 y TP-3)		
<i>Agua desionizada</i>		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.6061	2.1735	2.6
<i>Solución NaCl 1 M</i>		
m_0 (g)	m_t (g)	CR (g/g sorbente)
0.605	2.796	3.6