



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS  
DEL NOROESTE, S.C.

---

Programa de Estudios de Posgrado

ANÁLISIS DEL USO-SELECCIÓN DE HABITAT DEL  
BORREGO CIMARRÓN (*Ovis canadensis cremnobates*)  
EN BAJA CALIFORNIA, MEDIANTE TÉCNICAS DE  
TELEDETECCIÓN SATELITAL

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**Doctor en Ciencias**

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales  
(Orientación Ecología de Zonas Áridas )

P r e s e n t a

**JONATHAN GABRIEL ESCOBAR FLORES**

La Paz, Baja California Sur, Junio de 2016

## ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las ~~12~~ 10 horas del día 30 del Mes de ~~enero~~ enero del 2016, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"Análisis del uso-selección de hábitat del borrego cimarrón (*Ovis canadensis cremnobates*) en Baja California, mediante técnicas de teledetección satelital.


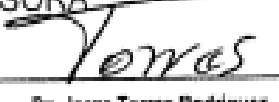




Presentada por el alumno:

Jonathan Gabriel Escobar Flores

Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN Ecología de Zonas Áridas

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

 _____ Dr. Sergio Álvarez Cárdenas Co-Director de Tesis	 _____ Dr. Jorge Torres Rodríguez Co-Director de Tesis
 _____ Dra. Sara Díaz Castro Co-Tutor	 _____ Dr. Anacleto Castellanos Vera Co-Tutor
 _____ Dr. Raúl Valdez Co-Tutor	
 _____ Dra. Norma Yolanda Hernández Saavedra, Directora de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos	

## **Conformación de comités**

### **Comité tutorial**

Dr. Sergio Álvarez Cárdenas	Co-Director	CIBNOR, S. C.
Dr. Jorge Torres Rodríguez	Co-Director	CICESE
Dra. Sara Díaz Castro	Co-Tutor	CIBNOR, S. C.
Dr. Aradit Castellanos Vera	Co-Tutor	CIBNOR, S. C.
Dr. Raúl Valdéz	Co-Tutor	New Mexico State University

### **Comité revisor de tesis**

Dr. Sergio Álvarez Cárdenas  
Dr. Jorge Torres Rodríguez  
Dra. Sara Díaz Castro  
Dr. Aradit Castellanos Vera  
Dr. Raúl Valdéz

### **Jurado de examen de grado**

Dr. Sergio Álvarez Cárdenas  
Dr. Jorge Torres Rodriguez  
Dra. Sara Díaz Castro  
Dr. Aradit Castellanos Vera  
Dr. Raúl Valdez

### **Suplentes**

Dra. Patricia Gallina Tessaro CIBNOR, S. C.  
Dra. Aurora Breceda Solís Cámara CIBNOR, S. C.

## Resumen

La evaluación de hábitat del borrego cimarrón es fundamental para determinar la distribución y el número de individuos que puede soportar un área. En esta investigación se utilizaron técnicas de teledetección satelital para analizar la disponibilidad y el uso-selección, de tres componentes esenciales del hábitat que realiza el borrego cimarrón en Sierra Santa Isabel: agua, terreno de escape y cobertura vegetal. Se identificaron 11 agujajes que son utilizados por los borregos, de los cuales El Zamora ( $n = 120$ ) y El Cordero ( $n = 67$ ) tuvieron los mayores registros. Los sitios con mayor disponibilidad de terreno de escape fueron seleccionados por grupos de hembras y añeros ( $\chi^2 = 9.83$ ,  $P < 0.05$ ), mientras que grupos de adultos de ambos sexos seleccionaron sitios con una menor disponibilidad. En el período seco los borregos seleccionaron los sitios con baja cobertura vegetal ( $\chi^2 = 11.58$ ,  $P < 0.05$ ), y durante el período de lluvias en solo una de las localidades de estudio seleccionaron los sitios con mayor cobertura ( $\chi^2 = 8.72$ ,  $P < 0.05$ ). Para el período de pos-lluvias no se encontró una relación entre la cobertura vegetal y la distribución del borrego cimarrón. La selección del terreno de escape y cobertura vegetal por el borrego cimarrón se relacionó con su estrategia anti depredadora. El mayor registro de hembras ( $n = 140$ ) y añeros ( $n = 62$ ), aunado al hábitat no fragmentado y la disponibilidad de agua permanente, confirman la importancia de Sierra Santa Isabel para la reproducción, crianza y reclutamiento del borrego cimarrón en Baja California. El análisis de imágenes satelitales, facilitan la ubicación y permiten la evaluación de hábitat óptimos, esenciales para el monitoreo y manejo de poblaciones de borrego cimarrón.

Palabras clave: Teledetección, NDVI, Índice de Rugosidad, *Ovis canadensis*, evaluación y selección de hábitat.

Vo.Bo.

Dr Sergio Álvarez Cárda

## Abstract

The assessment bighorn habitat is essential to determine the distribution and the number of individuals who can support an area. In this research satellite remote sensing techniques were used to analyse availability, use and habitat selection carried out by the bighorn sheep in Sierra Santa Isabel. The study used three essential components: water, escape terrain and cover vegetation. Of the 11 water holes that are used by bighorn sheep, Zamora ( $n = 120$ ) and El Cordero ( $n = 67$ ) had the highest records were identified. Sites with greater availability of escape terrain were selected by groups of ewes and yearlings ( $\chi^2 = 9.83$ ,  $P < 0.05$ ), while groups of adults (rams and ewes) selected sites with lower availability. In dry season bighorn sheep selected sites with low vegetation cover ( $\chi^2 = 11.58$ ,  $P < 0.05$ ), and during the rainy season in only one of the study sites selected sites with greater coverage ( $\chi^2 = 8.72$ ,  $P < 0.05$ ). For the period post-rainfall no relationship between vegetation cover and distribution of bighorn sheep was found.

Site selection of escape terrain and vegetation cover by bighorn sheep was correlated with its anti predatory strategy. The greatest record of ewes ( $n = 140$ ) and yearlings ( $n = 62$ ), coupled with the unfragmented habitat and availability of permanent water, confirm the importance of Sierra Santa Isabel for breeding, raising and recruitment of bighorn sheep in Baja California. The analysis of satellite images facilitate location and allow optimal evaluation, essential for monitoring and management of populations of bighorn sheep habitat.

Keywords: Remote sensing, NDVI, Roughness Index, *Ovis canadensis*, assessment and habitat selection.



Vo.Bo.

Dr Sergio Álvarez Cárdenas

## **Dedicatoria**

**A mi madre Lia por sus enseñanzas, amor y dedicación que sembraron en mí una semilla de superación que germinó con perseverancia.**

## Agradecimientos

Mi principal agradecimiento al Dr. Sergio Álvarez Cárdenas, por darme la oportunidad de convertir un sueño de investigación en realidad, además de brindarme su apoyo como amigo y confiar en mí en todo momento.

Quiero agradecer a mi comité de tesis, por sus comentarios acertados y motivación para realizar esta investigación:

Dr. Jorge Torres Rodríguez (Co-Director de tesis) gracias por ser parte de esta investigación integral y por ofrecerme todo su apoyo.

Dra. Sara Díaz Castro (Co-Tutora) gracias por sus apoyo, y por orientarme en todo momento en la estructura y el proceso de la investigación y redacción de la tesis.

Dr. Aradit Castellanos Vera (Co-tutor) gracias por certeras sugerencias, comentarios y buenos consejos, que me ayudaron a mejorar notablemente mi formación académica.

Dr. Raúl Valdéz (Co-tutor) gracias por formar parte de esta investigación, por su amistad, apoyo académico y sus enseñanzas, producto de su invaluable experiencia en la investigación con el borrego cimarrón.

†Dr. Roberto Martínez Gallardo, quien fue parte fundamental en mi formación personal y académica, y el que despertó en mí el amor por la investigación sobre el borrego cimarrón.

A Los Docotres Patricia Gallina, Leonardo Huato y Pedro Garcillán, por sus valiosos comentarios, sugerencias y apoyo incondicional para mejorar mi formación académica y personal.

A los compañeros del CIBNOR que convivieron conmigo, me apoyaron en mi trabajo y formaron parte de mi vida durante este proceso: Sarahi Sandoval,

Jose Sanchez, Florent Gomis, Mariana Delgado, Israel Guerrero, Avelino Cota y Franco Cota.

Un agradecimiento especial a la Dra. Elisa Seviere y la Dra. Norma Hernandez, directoras del Posgrado durante mi programa doctoral, así como a Claudia Olachea, Osvelia Ibarra y Tania Vazquez por su apoyo administrativo y para las estancias de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado mediante la beca 205965. Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, a la Dirección de Estudios de Posgrado, al Departamento de Control Escolar, al Laboratorio de Cómputo, al laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, en especial a Joaquín Rivera por su apoyo constante en el procesamiento de datos.

#### GRACIAS A MI FAMILIA POR SU APOYO Y AMOR INCONDICIONAL.

Un Agradecimiento especial a mis amigos de Sierra Santa Isabel, que me apoyaron y me brindaron el acceso a sus propiedades, en especial, a los señores; Ismael Duarte, Ruben Duarte, Daniel Abrego, Fidel Espinoza, El Yuyis, Rafael Villavicencio, Guillermo Villavicencio, y Candelaria Peralta. También a los guías que con su entusiasmo fue posible la toma de los datos de campo; Eduardo Espinoza, Rosendo Macías, Adan Guerrero, Florent Gomis. A las fundaciones que patrocinaron este proyecto de investigación: Desert Bighorn Council Transactions (California), JiJi Foundation (Seattle), Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).



## CONTENIDO

	No. De pág.
Resumen	ii
Abstract	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Índice de Contenido	vii
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	4
2.1 Conceptos de uso y selección de hábitat.....	4
2.2 Evaluaciones de hábitat.....	6
2.3 Factores biológicos que influyen en la selección de hábitat.....	9
2.4 Factores físicos que influyen en la selección de hábitat .....	12
2.5 Índices de Vegetación.....	13
3. JUSTIFICACIÓN.....	21
4. HIPÓTESIS.....	22
5. OBJETIVOS.....	23
5.1 Objetivo general .....	23
5.2 Objetivos particulares.....	23
6. MATERIALES Y MÉTODOS .....	24
6.1 Área de estudio .....	24
6.2 Localización de borregos cimarrones .....	26
6.3 Uso de agujajes por el borrego cimarrón .....	31
6.4 Terreno de escape .....	33
6.5 Cobertura vegetal.....	34
6.6 Análisis estadístico.....	36
7. RESULTADOS .....	37
7.1 Distribución y estructura poblacional .....	37
7.2 Uso de agujajes .....	38
7.3 Selección de terreno de escape.....	40

7.4	Selección de cobertura vegetal.....	42
8.	DISCUSIÓN.....	53
8.1	Estructura poblacional .....	53
8.2	Uso de agujajes .....	59
8.3	Selección de terreno de escape.....	57
8.4	Selección de cobertura vegetal.....	59
9.	CONCLUSIONES .....	63
9.1	Perspectivas.....	65
10.	LITERATURA CITADA.....	67
11.	ANEXO I. Artículos publicados .....	79
12.	ANEXO II. Archivo fotográfico.....	80

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de distribución del borrego cimarrón ( <i>Ovis canadensis</i> ) en Norteamérica. En color rojo se representa la reducción del área de distribución de esta especie. Tomado de Brewer <i>et al.</i> , 2014.....	2
<b>Figura 2.</b> Registro de datos por el sensor satelital.....	15
<b>Figura 3.</b> Relación de reflexión-absorción en el NDVI para una planta sana (izquierda) y otra en estado de senescencia (derecha). La vegetación sana absorbe la energía en la región del rojo visible (R), y refleja la radiación en la región del infrarrojo (NIR). La vegetación en senescencia presenta mayor reflexión en la de región rojo visible (R). Tomado de Pettorelli, 2013.....	16
<b>Figura 4.</b> Área de estudio en Sierra Santa Isabel, Baja California, México. Los cuadros representan las áreas de monitoreo del borrego cimarrón. Los Hemes (1) y El Zamora (2).....	24
<b>Figura 5.</b> Las barras representan la precipitación mensual y la línea punteada la temperatura mensual en los últimos 30 años. Estación climática 2043 San Agustín, Baja California (SMN, 2013).....	25
<b>Figura 6.</b> Categorías de sexo y edad del borrego cimarrón (Tomado de Monson y Summer, 1980). Los números romanos representan la clase de edad en los machos.....	27
<b>Figura 7.</b> Ejemplos de categorías de edad del borrego cimarrón: hembra juvenil (A), hembra adulta (B), clases de edad en machos: clase I (C), clase II (D) clase III (E), y clase IV (F).....	28
<b>Figura 8.</b> Ubicación de los aguajes donde se realizó el fototrampeo en la Sierra Santa Isabel, Baja California: 1.- Los Hemes, 2.- El Zamora, 3.- El Cordero, 4.- El Volcán.....	31
<b>Figura 9.</b> Fotografías de los aguajes: A) Los Hemes, B) El Volcán, C) El Cordero, D) El Zamora, en la Sierra Santa Isabel, Baja California.....	32
<b>Figura 10.</b> Ángulos de observación del sensor TM con capacidad de apuntamiento al nadir, correspondiente al período 2011-2012. Información adquirida de los metadatos de las imágenes correspondientes a cada mes.....	34
<b>Figura 11.</b> Mapa que muestra el uso de aguajes por los diferentes grupos de borrego cimarrón, Sierra Santa Isabel, Baja California 1. Los Hemes, 2. El Zamora, 3. El Cordero, 4. El Volcán, 5. El Junco. Grupos de hembras = ●. Grupos de machos = ●. Grupos de mixtos de hembras y machos = ●.....	39
<b>Figura 12.</b> Índice de rugosidad del terreno (IRT) en Sierra Santa Isabel, Baja California. Los círculos en azul son las observaciones de machos y los círculos en amarillo son las observaciones de hembras en las localidades Los Hemes (1) y El Zamora (2).....	42
<b>Figura 13.</b> Categorías de NDVI: rojo = bajo, amarillo = medio, verde = alto. Localidades: Los Hemes (1), El Zamora (2). Durante el período seco en La Sierra Santa Isabel, Baja California.....	44

<b>Figura 14.</b> Categorías de NDVI: rojo = bajo, amarillo = medio, verde = alto. Localidad Los Hemes (1), localidad El Zamora (2). Durante el período de lluvias en La Sierra Santa Isabel, Baja California .....	45
<b>Figura 15.</b> Categorías de NDVI: rojo = bajo, amarillo = medio, verde = alto. Localidades: Los Hemes (1), El Zamora (2). Durante el período de postlluvias en La Sierra Santa Isabel, Baja California .....	46
<b>Figura 16.</b> Imagen Landsat TM en monocromático. Fecha: 7 de septiembre de 2011, Sierra Santa Isabel, Baja California. Los círculos en azul son observaciones de machos y los círculos en amarillo son de hembras de borregos en las localidades Los Hemes (1) y El Zamora (2). En color rojo, se representan las categorías de NDVI bajo que seleccionaron los borregos.....	48
<b>Figura 17.</b> Imagen Landsat TM en monocromático. Fecha: 16 de noviembre de 2011, Sierra Santa Isabel, Baja California. Los círculos en azul corresponden a las observaciones de machos y los círculos en amarillo a las hembras de borregos en las localidades Los Hemes (1) y El Zamora (2). En color verde se representa la categoría de NDVI alto que seleccionaron los borregos.....	50
<b>Figura 18.</b> Imagen Landsat TM en monocromático. Fecha: 12 de Febrero del 2012, Sierra Santa Isabel, Baja California. Los círculos en azul son las observaciones de machos y los círculos en amarillo son las observaciones de hembras de borregos en las localidades Los Hemes (1) y El Zamora (2). En color verde se representan las categorías de NDVI alto que utilizaron al azar los borregos.....	52
<b>Figura 19.</b> Distribución de agujajes temporales y permanentes en Sierra Santa Isabel, Baja California. 1. Matomi, 2. Arroyo Grande, 3. El Canelo, 4. Las Blancas, 5. Los Hemes, 6. El Zamora, 7. La Cascada, 8. El Volcán, 9. El Junco, 10. Agua Verde, 11. Miramar, 12. Las Palmitas. ....	80
<b>Figura 20.</b> Localidad de Los Hemes. Período seco. Grupo de cinco borregos (2 machos, 2 hembras y un añero) en una ladera donde los valores del NDVI fueron entre 0.01-0.05, que indican suelo desnudo.....	81
<b>Figura 21.</b> Localidad El Zamora. Período de lluvias. Dentro del cuadro rojo se observan tres borregos, una hembra y dos añeros, en sitios con valores altos de NDVI = 0.40.....	81
<b>Figura 22.</b> Localidad El Zamora. Sitio que los borregos seleccionaron durante el período seco, a pesar de presentar valores bajos de NDVI (0.1-0.14).....	82
<b>Figura 23.</b> Localidad El Zamora. Sitio que los borregos seleccionaron durante el período de lluvias. Incrementa la cobertura vegetal, diversidad de especies vegetales y los valores del NDVI.....	82
<b>Figura 24.</b> Localidad de Los Hemes. Sitio con valores altos de NDVI (0.1-0.15) durante el período seco. Los borregos evitaron su uso.....	83
<b>Figura 25.</b> Localidad de Los Hemes. Sitio con valores altos de NDVI (0.20-0.25) durante el período de lluvias. Los borregos evitaron su uso, por presentar categorías de poco y baja rugosidad.....	83
<b>Figura 26.</b> Localidad El Zamora. Grupo de dos hembras adultas y tres añeros en un sitio con alta rugosidad que fue seleccionado.....	84

<b>Figura 27.</b> Localidad Los Hemes. Grupo de macho clase III con dos hembras en un sitio con categoría de rugosidad media, utilizada en proporción a su disponibilidad.....	84
--	----

## LISTA DE TABLAS

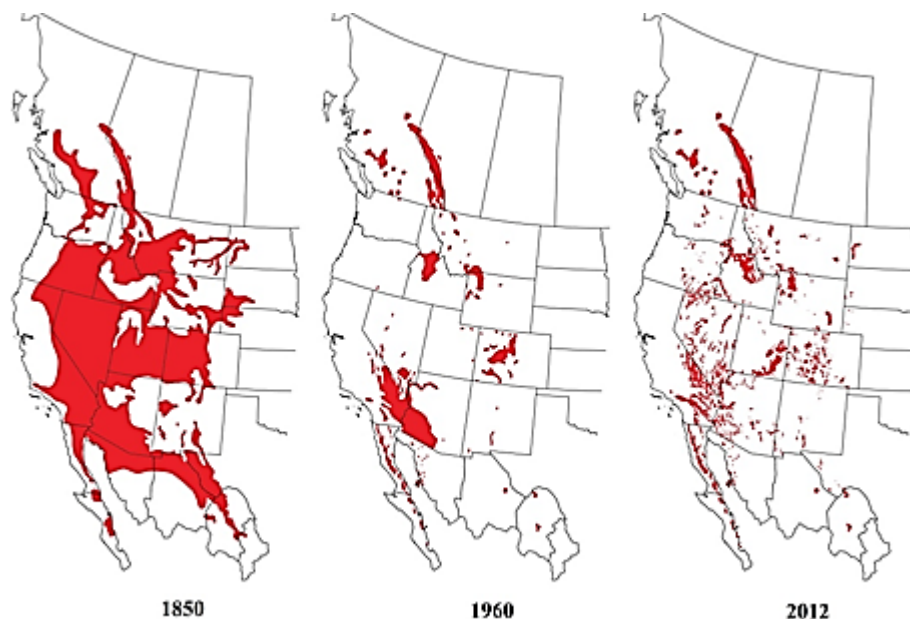
<b>Tabla I.</b> Ejemplos de rangos de NDVI en diferentes ecosistemas.....	17
<b>Tabla II.</b> Resultados de los conteos de borrego cimarrón en Sierra Santa Isabel, Baja California. Cor = corderos, Añr = añero, Jov = Jóvenes, Ad = adultos.....	38
<b>Tabla III.</b> Número de individuos y estructura poblacional de borrego cimarrón registrada en los aguajes de la Sierra Santa Isabel, Baja California.....	40
<b>Tabla IV.</b> Selección espacial del borrego cimarrón de las categorías de rugosidad del terreno, en Sierra Santa Isabel, Baja California. Valores con diferencias significativas ( $P < 0.05$ ). Seleccionan el hábitat (+). Evitan el hábitat (-). Uso de acuerdo con su disponibilidad (=). Uso observado (UO). Proporción de uso esperado (E). Proporción de uso observado (Pi). Intervalos de Bonferroni (IB). Interpretación estadística (IE).....	41
<b>Tabla V.</b> Rangos de NDVI para cada categoría y localidad de estudio en Sierra Santa Isabel, Baja California.....	43
<b>Tabla VI.</b> Selección espacial de las categorías de NDVI por el borrego cimarrón para el período seco en Sierra Santa Isabel, Baja California. * Valores con diferencias significativas ( $P < 0.05$ ). Seleccionan el hábitat (+). Evitan el hábitat (-). Uso de acuerdo con su disponibilidad (=). Uso observado (UO). Proporción de uso esperado (E). Proporción de uso observada (Pi). Intervalo de Bonferroni (IB). Interpretación estadística (IE).....	47
<b>Tabla VII.</b> Selección espacial de las categorías de NDVI por el borrego cimarrón durante el período de lluvias, en Sierra Santa Isabel, Baja California. * Valores con diferencias significativas ( $P < 0.05$ ). Seleccionan el hábitat (+). Evitan el hábitat (-). Uso de acuerdo con su disponibilidad (=). Uso observado (UO). Proporción de uso esperado (E). Proporción de uso observado (Pi). Intervalo de Bonferroni (IB). Interpretación estadística (IE).....	49
<b>Tabla VIII.</b> Selección espacial de las categorías de NDVI por el borrego cimarrón durante el período de postlluvias en Sierra Santa Isabel, Baja California. Seleccionan el hábitat (+). Evitan el hábitat (-). Uso de acuerdo con su disponibilidad (=). Uso observado (UO). Proporción de uso esperado (E). Proporción de uso observado (Pi). Intervalos de Bonferroni (IB). Interpretación estadística (IE).....	51

## 1. INTRODUCCIÓN

Los borregos silvestres de Norteamérica se distribuyen desde Alaska hasta México, reconociéndose dos especies: 1) borrego de Dall y borrego de Stone (*Ovis dalli*), en Alaska y Noroeste de Canadá; 2) borrego de las Montañas Rocallosas y borrego cimarrón del desierto (*Ovis canadensis canadensis*) en el suroeste de Canadá, oeste de Estados Unidos y norte de México (Sandoval *et al.*, 2014). Tres subespecies se distribuyen exclusivamente en México, en forma aislada, *O. c. cremnobates* en Baja California, *O. c. weemsi* en Baja California Sur y *O. c. mexicana* en Sonora, Chihuahua y Coahuila (Valdez y Krausman, 1999) (Figura 1).

En México el borrego cimarrón es reconocido como la especie sombrilla, (especie que al protegerla se protege a muchas otras, debido a que necesita grandes cantidades de terreno para subsistir) en los ecosistemas árido-montañosos de su área de distribución, estando sujeta a Protección Especial de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2001. Es también una de las especies cinegéticas más importantes a nivel nacional e internacional.

La distribución del borrego cimarrón en zonas áridas se ajusta al modelo de metapoblación propuesto por Gilpin y Hanski (1987), distribuyéndose en forma de subpoblaciones en parches de hábitat adecuado, comúnmente aislados en una matriz de hábitat inadecuado, donde la migración típica de por lo menos una subpoblación a otra existe, y cada subpoblación en cada parche tiene probabilidades de extinción (Bleich *et al.*, 1996). Los parches de hábitat utilizados por el borrego cimarrón deben contener los componentes del hábitat esenciales que incluyen alimento, agua y terreno de escape (Douglas y Leslie 1999).



**Figura 1.** Mapa de distribución del borrego cimarrón (*Ovis canadensis*) en Norteamérica. En color rojo se representa la reducción del área de distribución de esta especie. Tomado de Brewer *et al.*, 2014.

El borrego cimarrón es un buen ejemplo para investigar los mecanismos de selección de hábitat, debido a que es una especie oportunista en la búsqueda de su forraje y requiere una diversidad topográfica y paisajes escarpados para detectar y evadir a sus depredadores (Valdez y Krausman 1999). La relación de estos componentes del hábitat con el borrego cimarrón también se ha utilizado para explicar la segregación sexual; algunos estudios encuentran una correlación directa entre la disponibilidad del terreno de escape con el tamaño y estructura poblacional de esta especie (Holl, 1982; Bleich *et al.*, 1997; Divine *et al.*, 2000; Mckinney y Devos, 2003). La evaluación de la selección de hábitat por el borrego cimarrón es fundamental para determinar la distribución y el número de individuos que puede soportar un área (Brewer *et al.*, 2014).

A pesar de la importancia de evaluar la selección de hábitat que realiza esta especie, son pocos los estudios efectuados en México y la mayoría se han



enfocado en monitoreos poblacionales (Sandoval *et al.*, 2014). La carencia de estudios sobre el hábitat del borrego cimarrón en Baja California no permite pronosticar los posibles efectos del cambio climático sobre la especie, *e. g.* la reducción en la disponibilidad de alimento como consecuencia de períodos largos sin lluvias, la cual ha sido una de las causas de extinción local y extirpación de poblaciones de borrego cimarrón en zonas áridas (Epps *et al.*, 2004; Álvarez-Cárdenas *et al.*, 2001).

En Baja California se reconoce a Sierra Santa Isabel como la más grande (2072 km<sup>2</sup>) y con mejores condiciones de hábitat para el borrego cimarrón, de hecho es considerada la principal sierra para la crianza y reclutamiento del borrego cimarrón en el estado (Lee *et al.*, 2012). Sin embargo, no se ha realizado ninguna evaluación del hábitat.

El objetivo de esta investigación fue realizar las primeras evaluaciones del hábitat en sierra Santa Isabel, mediante técnicas de percepción remota, donde a partir de imágenes de satélite se analiza la cobertura vegetal, *e. g.*, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que en estudios recientes ha sido útil para explicar la distribución de ungulados silvestres en zonas áridas, *e. g.* el venado bura (Marshall *et al.*, 2006), el impala (VanBommel *et al.*, 2006) y el borrego cimarrón (Sesnie *et al.*, 2012; Hoglander *et al.*, 2015). Estas técnicas también se utilizan para evaluar la rugosidad del terreno, la cual se correlaciona con la disponibilidad del terreno de escape (Sappington *et al.*, 2007), y para la detección de cuerpos de agua. Con el análisis de estos componentes del hábitat se exploró como el borrego cimarrón realiza la selección de hábitat y se ubicaron sitios estratégicos para la conservación de *O. c. cremnobates* en Sierra Santa Isabel, Baja California.

## 2. Antecedentes

### 2.1 Conceptos de uso y selección de hábitat

El conocimiento del uso y selección del hábitat tiene importantes implicaciones para explicar la distribución de la fauna silvestre y nos permite diferenciar entre la disponibilidad y la calidad de diferentes tipos de hábitat e identificar cuales recursos son seleccionados (Manly *et al.*, 2002). Las diferencias en la selección de los recursos del hábitat por los animales es una de las principales relaciones que permite a las especies coexistir. Se considera que las especies seleccionan los recursos de mayor calidad y que mejor satisfacen sus necesidades de vida, en contraste con los recursos de menor calidad (Rosenzweig, 1981).

El término uso se refiere a la forma en que las especies utilizan los recursos del hábitat, *e. g.* el borrego cimarrón utiliza agujajes, terreno de escape y cobertura vegetal. Mientras que el término selección implica un comportamiento jerárquico en donde la especie usa un recurso en mayor proporción a otro, es decir, que lo selecciona (Krausman, 1999).

La selección de un recurso puede ocurrir a diferentes escalas: el rango geográfico de una especie, el ámbito hogareño, o bien la selección de elementos particulares, por ejemplo, sitios de alimentación y reproducción. La selección de los recursos tiene como fundamento la teoría de Selección de Recurso Funcional (Manly, 1985), la cual es una función de características medibles en unidades de recursos, donde el valor para una unidad es proporcional a la probabilidad de que esta unidad comience a ser usada.

Existen dos hipótesis para probar la selección de los recursos, la primera fue propuesta por Fretwell y Lucas (1970), con el concepto de *Distribución libre ideal*, la cual predice que los animales se establecen en parches de hábitat en proporción a la disponibilidad de recursos, donde: a) los parches con más recursos tendrán más individuos, y por tanto, se supone que todos los individuos tienen habilidades para competir; los parches difieren en calidad y todos los individuos conocen la disponibilidad de recursos en todos los parches y pueden moverse libremente entre ellos.

La segunda hipótesis, propuesta por Van Horne (1983) propone la *Distribución despótica ideal*, la cual establece que los individuos dominantes ocuparán primero los parches de mayor calidad, los cuales obligan a los subordinados a ocupar parches de hábitat de menor calidad. De esta forma, hay una relación negativa entre el tamaño del parche y la abundancia. Estas asociaciones ocurren en especies territoriales o que establecen una jerarquía social como el borrego cimarrón (Blumstein y Fernández-Juricic, 2010).

El análisis de uso-selección de las unidades discretas de hábitat es llevado a cabo mediante observaciones de campo, donde se mide cuanto tiempo están los individuos en cada categoría de hábitat (Spitz y Janeau, 1995), o bien, se realizan conteos de individuos observados en cada categoría (Durbin 1998). Algunos estudios identifican a cada individuo, por ejemplo, Gionfrido y Krausman (1986) colocaron radiocollares a borregos cimarrones (*O. c. mexicana*) para investigar el uso de hábitat. En cambio, otros estudios no identifican organismos, e. g. VanBommel *et al.* (2006) investigaron la selección de cuatro categorías de vegetación por el impala (*Aepyceros melampus*) con base en su frecuencia de uso y selección.

## 2.2 Evaluaciones de hábitat

El hábitat se entiende como la combinación de recursos (alimento, agua, topografía) y condiciones ambientales (temperatura, precipitación) que promueven la ocupación de un área específica por los individuos de una población, lo cual les permite sobrevivir y reproducirse (Morrison *et al.*, 1992). En los estudios de hábitat del borrego cimarrón, se consideran cuatro componentes esenciales: topografía, visibilidad, disponibilidad de agua, cantidad y calidad de alimento (Krausman *et al.*, 1999).

Valdez y Krausman (1999) mencionan que una evaluación de hábitat es confiable si consideran los siguientes aspectos: una metodología replicable en una amplia región geográfica, lo cual facilita la ubicación de zonas con hábitat de uso potencial, donde se consideran al menos tres de los componentes esenciales (terreno de escape, agua y cobertura vegetal) para predecir los movimientos de los borregos.

La primera evaluación del hábitat que consideró los datos poblacionales de borrego cimarrón, fue propuesta por Holl (1982), quien en su modelo predice que el tamaño de la población de hembras y añeros tiene una correlación con el terreno de escape disponible. Concluye que 60 hectáreas de terreno de escape son suficientes para soportar un rebaño de 10 hembras. Sin embargo, en su modelo no considera otros elementos del hábitat, como la disponibilidad de agua, componente limitante en las poblaciones de borregos en zonas áridas.

A partir de esa investigación, se diseñaron métodos que tenían como objetivo una evaluación integral del hábitat. Los métodos consecuentes tienen como fundamento el Sistema de Reconocimiento de Patrones *PATREC* (Cling, 1979; Russe *et al.*, 1980), el cual emplea la teoría de Probabilidad Ballesyana,

que considera los siguientes atributos del hábitat: cobertura vegetal, disponibilidad de agua, distancia de los agujeros al terreno de escape, y datos poblacionales de los borregos de por lo menos 10 años de monitoreo. Para su funcionamiento los modelos PATREC requieren de la siguiente información: estimaciones de alta o baja probabilidad de densidad poblacional; estimaciones de la probabilidad de un área para contener una mayor o menor densidad poblacional (probabilidad a priori); lista de atributos del hábitat asociados a los borregos; y probabilidad de que los atributos del hábitat estén asociados con una mayor o menor densidad poblacional (probabilidad condicional).

A pesar de la robustez de los modelos PATREC, estos han sido replicados en pocas sierras en donde se distribuye el borrego cimarrón en México, esto se debe a que los datos poblacionales no existen o son monitoreos no sistemáticos (Sandoval *et al.*, 2014).

En los años 90's, las evaluaciones del hábitat fueron más eficientes, debido al desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo cual permitió el análisis de información digital a partir de fotografías aéreas, modelos digitales de elevación (MDE), e imágenes de satélite. Los MDE aportan información vital para describir atributos topográficos, *e. g.* gradientes altitudinales, pendientes, orientaciones de las laderas y rugosidad del terreno (Forman, 1995); elementos que integran el terreno de escape, como sitios rocosos y escarpados con pendientes mayores a 30°, donde los borregos pueden escapar de sus depredadores (Wilson, 1968; Valdez y Krausman, 1999; Sandoval *et al.*, 2014).

El primer método que explica la disponibilidad de terreno de escape en el hábitat del borrego cimarrón, utilizando SIG fue propuesto por Riley *et al.* (1999) quienes desarrollaron el Índice Rugosidad del Terreno (IRT). El método consiste en estimar el terreno de escape a partir de un análisis diferencial de

alturas. Este índice fue utilizado en las evaluaciones de hábitat por casi una década, hasta que Sappington *et al.* (2007) observaron que el IRT se correlaciona con la pendiente, y no distingue entre terrenos con fuertes pendientes y terrenos relativamente poco rugosos. Estos autores mencionan que una medida de rugosidad debe incorporar la variabilidad de dos atributos, la pendiente y el aspecto, que es posible medir a partir de un MDE, y por lo tanto, proponen un vector de medida de rugosidad (*VRM*), que en la actualidad es considerado como el que mejor describe del terreno de escape.

Los siguientes modelos de evaluación del hábitat consideraron la teoría del nicho ecológico propuesta por Hutchinson (1957), donde el análisis de factor de nicho ecológico ENFA (Ecological Niche Factor Analysis), y los algoritmos genéticos GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Production), parten de datos de presencia y ausencia de individuos, y los correlacionan con variables de hábitat y climáticas.

Rubin *et al.* (2009), compararon modelos de ENFA y GARP para predecir la distribución del borrego cimarrón en los desiertos de California, reportando que los ENFA son buenos predictores de la distribución de los rebaños de hembras y añeros, esto se debe a que utilizan hábitat concretos, es decir, sitios de parición. Este método no funciona en el caso de los machos, ya que estos utilizan condiciones de hábitat generales, y por lo tanto, los modelos generados por GARP explican mejor la distribución de estos. Una ventaja de tales modelos predictivos cuantitativos, es que pueden ayudar a identificar el hábitat potencial que no es reconocido por los expertos, y pueden identificar sitios que previamente no se conocían. Tanto ENFA como GARP se han utilizado para identificar áreas de reintroducción de borregos en California.

### 2.3 Factores biológicos que influyen en la selección de hábitat

La distribución del terreno de escape (sitios escarpados con pendientes mayores a 30°) regula la medida en que otros componentes del hábitat son utilizados por el borrego cimarrón (Villapique *et al.*, 2015). Bleich *et al.* (1997), proponen la hipótesis de estrategia reproductiva-antidepredador, como el principal mecanismo que regula la selección de hábitat; la hipótesis predice que los grupos de hembras con juveniles usarán los sitios más seguros y con mayor disponibilidad de terreno de escape, donde los borregos tienen mayor posibilidad de escapar de sus depredadores, aunque esto implique la selección de sitios donde el forraje no es abundante, pero si lo es en calidad nutricional. Los grupos de machos seleccionarán las áreas con mayor disponibilidad de alimento, incluso en sitios donde la probabilidad de depredación es mayor. De tal forma, que las diferencias alométricas en proporciones corporales conllevan a la segregación sexual.

La misma hipótesis ha sido puesta a prueba en los estudios de selección de hábitat, donde recientemente se ha incluido el termino *Trade-off*, el cual se refiere a que los animales constantemente actúan para minimizar la exposición a factores limitantes, como la depredación, o para maximizar la ganancia de energía con un mayor consumo de alimento en un tiempo corto (Dussault *et al.*, 2005).

Festa-Bianchet *et al.* (1988), investigaron como las hembras de borrego cimarrón en las montañas rocallosas de Canadá deciden entre calidad y cantidad de forraje para evitar la depredación. Ellos encontraron que la calidad del forraje no influyó en los movimientos estacionales de las hembras, con excepción de las que criaban corderos en primavera, las cuales se movieron a sitios en donde iniciaba el crecimiento de herbáceas. Los grupos de hembras con corderos estuvieron en sitios con mayor índice de rugosidad del terreno.

Por su parte, en grupos de hembras menores a cinco individuos, el forrajeo es deficiente y gastan más tiempo en estar alertas.

Rachlow y Bowyer (1998), investigaron la selección del hábitat que hicieron hembras de borrego cimarrón durante la lactancia y crianza en Alaska, en un año con abundancia de forraje y otro donde fue escaso (por tormentas de nieve en la primavera). Cuando el forraje fue abundante, las hembras seleccionaron los terrenos más escarpados, siendo la distancia al terreno de escape un componente esencial durante los eventos de parición y crianza. En el año de escasez de forraje, las hembras se movieron fuera del terreno de escape en grupos grandes ( $n = 10$ ), en sitios planos donde el forraje fue abundante; el tamaño de grupo fue el factor que influyó para que las hembras corrieran el riesgo. Estos investigadores concluyen que la selección del hábitat está influenciada por el estado reproductivo de los borregos y las condiciones ambientales.

Tarango (2000), observó que los grupos de machos de *O. c. mexicana* en Sonora, seleccionaron áreas con asociaciones vegetales de *Bursera microphylla* y *Salvia mellifera*, con una alta cobertura y evitaron asociaciones vegetales de *Cercidium microphyllum* y *Olneya tesota*, durante la segregación sexual.

Durante gran parte del año los grupos de hembras-juveniles utilizaron los terrenos más escarpados, con asociaciones vegetales de *Fouquieria splendens*, *Dodonaea viscosa* y *Agave sp.*, las cuales proveen visibilidad y alimento. Este comportamiento de segregación sexual de los borregos en Sonora concuerda con la hipótesis de Bleich *et al.* (1997).

Álvarez *et al.* (2009) en su estudio sobre evaluación del hábitat del borrego cimarrón en la Sierra del Mechudo, Baja California Sur, observaron una



mayor concentración de borregos en sitios con valores altos de Índice de Rugosidad del Terreno, el cual es una aproximación de la disponibilidad de terreno de escape disponible. Todos los borregos que se observaron se encontraron a una distancia menor a 200 metros del terreno de escape; la cobertura vegetal fue menor al 20%, y la altura de la vegetación menor a 1.3 metros, lo que facilita a los borregos la detección de depredadores a distancia. En la sierra del Mechudo, la estructura de la vegetación tiene mayor significado biológico para los borregos que las especies vegetales presentes. Hábitats abiertos y con buena visibilidad no son utilizados si no hay terreno de escape disponible.

Hoglander *et al.* (2015), proponen un modelo que predice el uso espacial del hábitat por el borrego cimarrón (*O. c. mexicana*) en Arizona, concluyendo que la disponibilidad del terreno de escape es el principal factor que predice la distribución de esta especie durante todo el año. Por su parte, la mayor disponibilidad de forraje estimada mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), y la disponibilidad de agua, son predictores de la distribución del borrego cimarrón en temporadas fuera del verano. En los períodos de sequía, solo el agua fue un buen predictor, debido a que el forraje es escaso, y la presencia de herbáceas y pastos que crecen por las lluvias de verano están disponibles durante poco tiempo (<20 días) como consecuencia de las altas temperaturas y la sequía. En ese mismo período, tanto machos como hembras prefirieron forrajear en sierras altas con terreno de escape disponible, evitando recursos similares en sierras bajas con pendientes menores a 10°.

Villapique *et al.* (2015), investigaron la selección de terreno de escape y cobertura vegetal que realiza el borrego cimarrón y su relación con la distribución de su principal depredador, el puma (*puma concolor*) en Sierra Nevada, Estados Unidos. Encontraron que durante un período de sequía de

seis años consecutivos, machos y hembras no hicieron *Trade-off*, sino que comenzaron a moverse a sitios fuera de su terreno de escape, aumentando el riesgo de depredación, e incluso sobreponiéndose con la distribución del venado bura. Los grupos de machos evitaron sitios con alta cobertura vegetal, con arbustos y árboles que obstruyeron su visibilidad, y seleccionaron áreas con mayor disponibilidad de biomasa de herbáceas y arbustos, consumiendo en ocasiones una mayor proporción de artemisias y plantas leñosas que las hembras.

#### 2.4 Factores físicos que influyen en la selección de hábitat.

En los últimos 30 años, el cambio climático en las regiones áridas de Norteamérica se ha manifestado en la reducción de alimento y agua disponible. En las sierras áridas de California, se ha documentado que de 1901 a 1987 la temperatura incrementó a una tasa de 0.12 °C por década (Lane *et al.*, 1994) y la precipitación promedio anual disminuyó en un 20% (Ball *et al.*, 1998). Los principales efectos fueron la reducción en la disponibilidad de alimento, como consecuencia de períodos largos sin lluvias, reducción que ha sido una de las causas de extinción local y extirpación de poblaciones de borrego cimarrón en zonas áridas (Epps *et al.*, 2004).

Epps *et al.* (2004), proponen que poblaciones de borrego cimarrón en zonas áridas donde la precipitación es menor a 200 mm anuales, tienen mayores probabilidades de extinción, debido a un incremento en la tasa de mortalidad y menor reclutamiento. La influencia de la temperatura y la precipitación en la selección del hábitat por el borrego cimarrón es aún mayor en las regiones áridas. Se ha documentado que el borrego cimarrón es altamente dependiente de la disponibilidad de agua en los meses de verano, incluso algunos rebaños se mantienen a una distancia menor a un kilómetro (Sandoval *et al.*, 2015).

La precipitación es el principal factor que influye en la presencia de agua disponible en manantiales y tinajas (Turner y Weaver, 1980; Messing, 1990). Por su parte, las diferentes dependencias que manejan fauna silvestre en el área de distribución del borrego cimarrón en Norte América (Fish and Game y SEMARNAT), operan con la premisa de que el agua superficial permanente es esencial para el crecimiento de la población, reclutamiento y supervivencia del borrego cimarrón. Sin embargo, Krausman y Etcherberger (1995) reportan que la cantidad y calidad de forraje influye en la selección del hábitat y tamaño de la población, más que la disponibilidad del agua. Broyles y Cutler (1999), encuentran que no hay una relación entre el tamaño poblacional y el reclutamiento, con la distribución y disponibilidad de agua permanente en Arizona, y confirman que el agua es un factor importante, pero que no limita el tamaño de la población de borrego cimarrón, y por tanto, no es recomendable la construcción de nuevos aguajes.

## 2.5 Índices de Vegetación

Los índices de vegetación tienen como fundamento el comportamiento espectral de la vegetación que se presenta en tres regiones del espectro electromagnético, las regiones del visible (400-750  $\mu\text{m}$ ), el infrarrojo cercano (0.75-1.3  $\mu\text{m}$ ) y el infrarrojo medio (1.3-2.5  $\mu\text{m}$ ). La energía incidente en la región visible es absorbida por los pigmentos de los cloroplastos, los cuales absorben fuertemente la región del rojo y azul del espectro visible. Las propiedades ópticas de la vegetación en el infrarrojo cercano están relacionadas con la estructura de la hoja, en particular con las células del mesófilo esponjoso, las cuales reflejan la mayor parte de la energía incidente, que por lo general proviene del sol. La combinación de la absorción de energía en la región del visible y la reflectancia en el infrarrojo cercano, permite

identificar firmas espectrales de la vegetación, lo que facilita su monitoreo de forma remota (Jensen, 2007).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) utiliza las proporciones de absorción en la región del rojo (R) y la reflectancia de la cobertura vegetal en la región del infrarojo cercano (NIR) (Rouse *et al.*, 1974). El NDVI se considera un índice de “verdor” el cual se refiere al material activo fotosintético disponible en una unidad espacial. La fórmula generalizada para el NDVI es la siguiente:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Dónde:

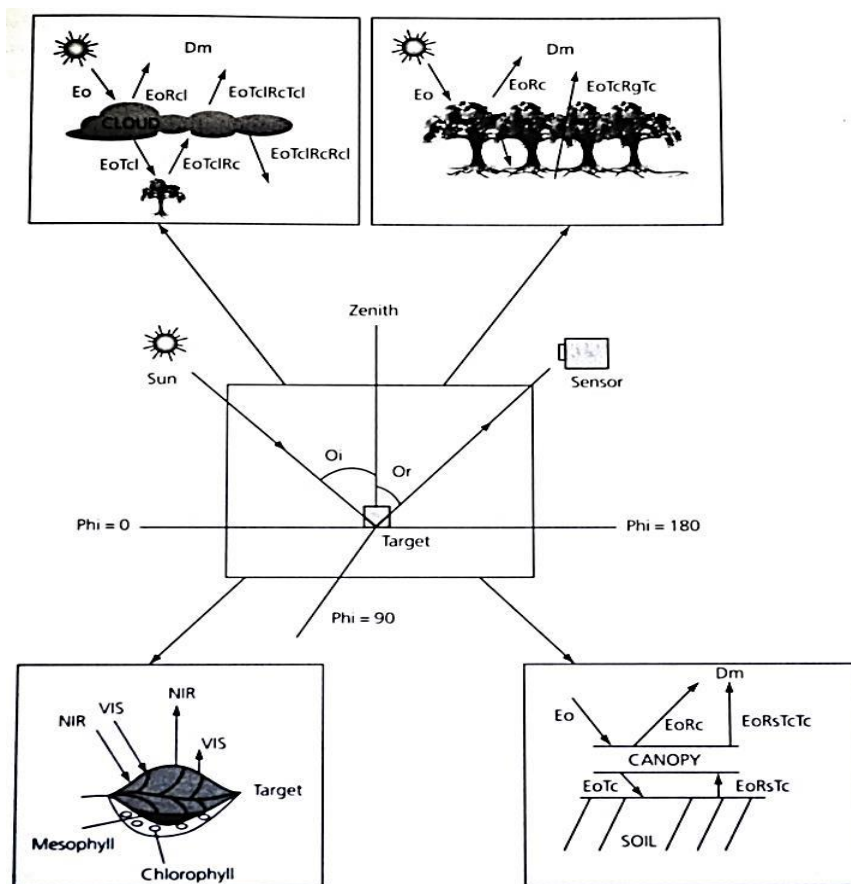
NIR= Valor de la reflectancia en la región del infrarojo cercano

R= Valor de la reflectancia en la región del rojo

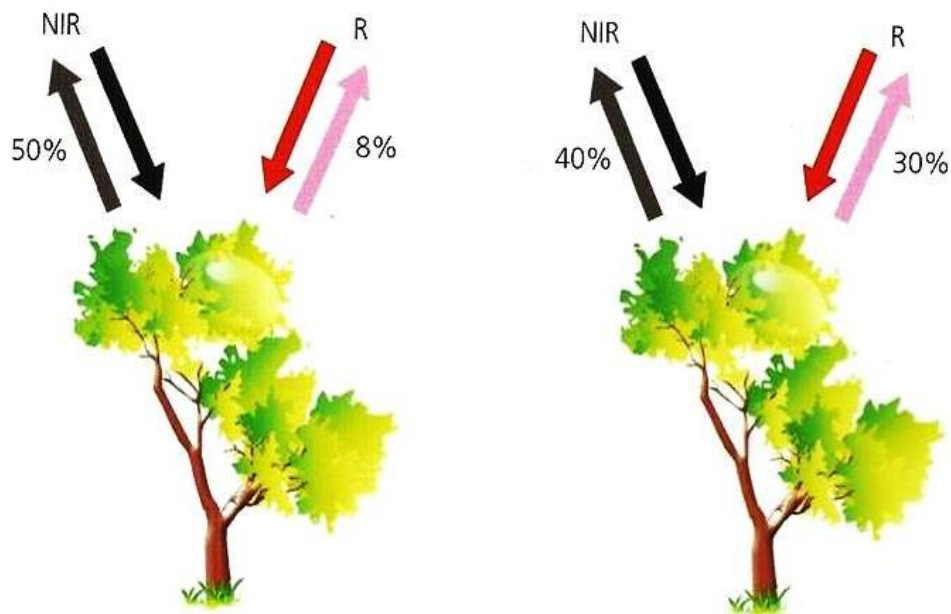
En la Figura 2 se representan los elementos biofísicos que intervienen cuando la imagen es captada por un sensor. El ángulo cenital del sensor, es el ángulo entre el vector de observación y la localización vertical del objeto de interés (Or). El ángulo solar, es el ángulo entre el vector solar y la localización vertical del objeto (Oi). Un ángulo solar mayor a 80° puede causar datos erróneos capturados por el sensor. La clorofila absorbe longitudes de onda en la región visible del rojo. En el infrarrojo, las longitudes de onda son reflejadas por la capa del mesófilo esponjoso de las hojas (cuadro inferior izquierda).

La reflectancia de las nubes disminuye la energía que se trasmite al sensor (cuadro superior izquierdo). Las plantas con dosel denso, disminuyen la respuesta de herbáceas (cuadro superior derecha). La reflectancia del suelo afecta áreas con vegetación escasa (cuadro inferior derecha).

En la Figura 3, se muestra una comparación entre el NDVI para una planta en senescencia foliar y otra sana.



**Figura 2.** Registro de datos por el sensor satelital. Tomado de Pettoreli, 2013;  $E_o$ : Irradiancia. T: Transmitancia. Tc: Transmitancia del dosel. Tcl: Transmitancia de nubes. Rcl: Reflectancia de nubes. Rc: Dosel, Rg: Vegetación del suelo. Rs: Suelo.  $D_m$ : Respuesta medida por el sensor. NIR: Luz infrarroja, VIS= Luz visible región del rojo.



**Figura 3.** Relación de reflexión-absorción en el NDVI para una planta sana (izquierda) y otra en estado de senescencia (derecha). La vegetación sana absorbe la energía en la región del rojo visible (R), y refleja la radiación en la región del infrarrojo (NIR). La vegetación en senescencia presenta mayor reflexión en la región del rojo visible (R). Tomado de Pettoreli, 2013.

Los valores de NDVI oscilan entre -1.0 y 1.0. Los valores negativos corresponden a sitios con ausencia de vegetación (Justice *et al.*, 1985), mientras que los valores muy bajos (<0.1) indican áreas rocosas, dunas o nieve. En caso de vegetación dispersa e. g. matorrales xerófilos, los valores oscilan entre 0.2 y 0.4.

Valores altos de NDVI (0.6-0.9) corresponden a sitios con vegetación densa, como selvas, bosques o cultivos que están en su máximo crecimiento (Neigh *et al.*, 2008). Otros ejemplos son descritos en la tabla I.

**Tabla I.** Ejemplos de rangos típicos de NDVI en diferentes ecosistemas.

<b>Ecosistema</b>	<b>Valores de NDVI</b>	<b>Localidad</b>	<b>Referencia</b>
Bosque Boreal	0.6-0.8	Alaska	Parent y Verbyla, 2010.
Bosque templado	0.3-0.7	Francia	Pettorelli <i>et al.</i> , 2006.
Delta	0.2-0.6	Botswana	VanBommel <i>et al.</i> , 2006.
Pastizales	0.15-0.45	California	Gamon <i>et al.</i> , 1995.
Desierto	0.06-0.12	Egyto	Dall'Olmo y Karnieli, 2002.

El NDVI se utiliza para estimar la productividad primaria de la vegetación a diferentes escalas espacio-temporales y para el análisis del desarrollo de la vegetación. Esta información puede ser correlacionada con la distribución, comportamiento y abundancia de animales (Pettorelli, 2006). Una de las principales ventajas de explorar la relación del NDVI con la fauna silvestre, es la posibilidad de evaluar los efectos del cambio climático y el comportamiento de los animales.

Los modelos de distribución de especies tienen como objetivo describir las características del hábitat que se relacionan con la presencia o ausencia de los organismos (Araujo y Williams, 2000). En este sentido, se ha reportado que la dinámica del NDVI es un buen predictor de la presencia de una especie, y en el caso particular de los ungulados, es uno de los parámetros más eficientes para la evaluación del hábitat, en particular la vegetación, que es la principal variable que influye en la selección del hábitat (Pettorelli, 2013).

VanBommel *et al.* (2006) investigaron la distribución del impala (*Aepycerus melampus*) en el Delta de Botswana, Africa en relación con tres clases de vegetación, y utilizaron como indicador de cobertura vegetal al NDVI.

También reportaron que los sitios con valores altos de NDVI fueron evitados por los impalas debido a dos factores: a) la vegetación es muy densa y obstruye la visibilidad de los animales, b) otros sitios fueron pastizales, vegetación que no es palatable para esta especie. El impala seleccionó tipos de vegetación con valores intermedios de NDVI (0.23-0.29), en cada estación del año. Las especies vegetales que dominan estos sitios son del género *Acacia*, las cuales no son densas y están mezcladas con herbáceas y pastos.

El NDVI también se ha relacionado con aspectos reproductivos de la fauna silvestre, por ejemplo, la temporada de parición del caribú (*Rangifer tarandus*) en Canadá, que sucede al inicio de la estación de primavera, coincidiendo con los valores más altos del índice (0.4 - 0.5), lo que significa una mayor cantidad y calidad de alimento, que es necesario para que las hembras maximicen su producción de leche (Griffith *et al.*, 2002).

Para ungulados que se distribuyen en zonas áridas, e. g. el venado bura, la relación entre los sitios con una mayor disponibilidad de forraje, estimada por NDVI y la presencia de esta especie, es aún mayor; Marshal *et al.* (2006) encuentran que más del 80% de los registros de venados en California, coincidieron con los valores más altos de NDVI para cada estación del año, con excepción del invierno, temporada que se caracterizó por abundancia de forraje en forma homogénea en el área de distribución de esta especie.

La variación espacio-temporal del NDVI, también ha servido para detectar cambios poblacionales inusuales, como el caso de la gacela de Mongolia (*Procapra gutturosa*), que en el año 2008 realizó una migración de miles de individuos de Mongolia a Rusia. El NDVI mostró que el principal factor de esa migración fue que la disponibilidad de forraje disminuyó drásticamente en su lugar de origen durante un período de 10 años (Olson *et al.* 2009).



Estudios de hábitat y modelos de distribución del borrego cimarrón, recientemente incorporan como variable de predicción los valores del NDVI, para explorar hipótesis relacionadas con la teoría del forrajeo óptimo, selección y preferencia de cobertura vegetal. Sesnie *et al.* (2012) recomiendan que previo al cálculo del NDVI, es necesario considerar el efecto de la geometría de observación de sensores satelitales en sierras donde habita el borrego cimarrón. En imágenes adquiridas por el sensor TM de Landsat, la geometría de observación y el bajo ángulo de elevación solar ( $<30^\circ$ ) en invierno, resultan en laderas sombreadas con orientación norte y noroeste, mientras que en otras épocas no lo están. Por lo tanto los valores reales del índice pueden ser subestimados o sobreestimados.

Creech *et al.* (2016), demuestran que el NDVI tiene una correlación con el nitrógeno fecal, el cual midieron en diferentes poblaciones de borrego cimarrón que del desierto de Mojave en California y Nevada. De tal forma, el NDVI es un indicador útil de la calidad de la dieta estacional. En la misma investigación se realizaron análisis genéticos que reportan que las sierras con los valores más altos de NDVI, indicaron mayores valores de riqueza alélica ( $A = 3.0$ ) y heterogocidad ( $H = 0.65$ ), lo que sugiere una mayor variabilidad genética, que incluso se mantiene si las sierras con dicha condición se encuentran a una distancia menor de 20 km, lo cual permite a los borregos realizar migraciones locales. Los autores recomiendan utilizar el NDVI para identificar parches de hábitat con las mejores condiciones de forraje, los cuales son prioridad para acciones de manejo, como reintroducciones, protección de áreas, y construcción de aguajes artificiales.

El uso del NDVI se ha incrementado en las investigaciones relacionadas con la selección del forraje por ungulados silvestres. Este análisis es considerado un buen aproximador de la disponibilidad y calidad de forraje disponible, lo que a su vez se refleja en la condición corporal de los individuos.

La relación del NDVI y la calidad de la dieta es similar entre ambientes y especies, Hamel *et al.* (2009) concluyen que el NDVI predice la variación anual del contenido de nitrógeno fecal en excretas de la cabra de montaña (*Oreamnos americanus*) y el borrego cimarrón (*O. c. canadensis*) en un ambiente alpino de Canadá. Ryan *et al.* (2012) también encuentran que el NDVI es un predictor del contenido de nitrógeno fecal en el búfalo africano (*Syncerus caffer*) en un ecosistema de Sabana. Lendrum *et al.* (2014), observaron una correlación positiva entre valores de NDVI y nitrógeno fecal en el venado bura (*Odocoileus hemionus*), durante su proceso de migración durante la primavera en Colorado.

### 3. JUSTIFICACIÓN

El borrego cimarrón es una de las especies cinegéticas más importantes en México. La mayoría de los esfuerzos de conservación se han enfocado en monitoreos poblacionales, y a pesar de la importancia de evaluar el hábitat del borrego cimarrón, son pocos los estudios realizados en México (Sandoval *et al.*, 2014). La carencia de estudios sobre el hábitat del borrego cimarrón en Baja California no permite pronosticar los posibles efectos del cambio climático, e. g. la reducción en la disponibilidad de alimento como consecuencia de periodos largos sin lluvias, lo cual es una de las causas de extinción local y extirpación de poblaciones de borrego cimarrón en zonas áridas (Epps *et al.*, 2004).

El presente trabajo se desarrolló en la Sierra Santa Isabel, la cual es la más extensa (2072 km<sup>2</sup>) y mejor conservada sierra borreguera de Baja California. En esta sierra se reporta la población más numerosa del estado (300-400 ejemplares, Lee *et al.*, 2012), y donde históricamente se han cazado los borregos cimarrones con los puntajes de cornamenta más altos en las zonas áridas en Norteamérica; aunque en la actualidad y desde hace 26 años, el aprovechamiento cinegético de esta especie se encuentra prohibido en Baja California.

Esta es la primera vez que se hace una evaluación de la disponibilidad y selección del hábitat por el borrego cimarrón en la Sierra Santa Isabel, utilizando métodos de percepción remota, y de teledetección satelital, para caracterizar y evaluar la disponibilidad de forraje en forma espacio-temporal, lo cual facilitará la identificación precisa de sitios estratégicos para la conservación y manejo del hábitat y la población de borrego cimarrón.

#### 4. HIPÓTESIS

La disponibilidad de los componentes del hábitat (terreno de escape, agua y cobertura vegetal) evaluados mediante percepción remota (técnicas de teledetección satelital) permite determinar el uso y selección espacio-temporal del hábitat por el borrego cimarrón.

Predicción 1: El NDVI es un indicador de disponibilidad de forraje espacio-temporal, por lo tanto se espera que los sitios con mayores valores sean los seleccionados por los grupos de borrego cimarrón.

Predicción 2: Los modelos de rugosidad de terreno indicarán la disponibilidad de terreno de escape, que es el elemento esencial para evitar la depredación, principalmente en grupos de hembras y añeros.

Predicción 3: La detección de cuerpos de agua determina la ubicación y disponibilidad espacio-temporal de los aguajes en el hábitat del borrego cimarrón.

Predicción 4: La técnica de fototrampeo indicará el uso espacio-temporal de los aguajes por el borrego cimarrón, en donde se espera que los aguajes más grandes y aislados sean los más utilizados.

## 5. OBJETIVOS

### 5.1.1 Objetivo general

Evaluar la selección y uso del hábitat por el borrego cimarrón en Sierra Santa Isabel, Baja California, mediante técnicas de teledetección satelital.

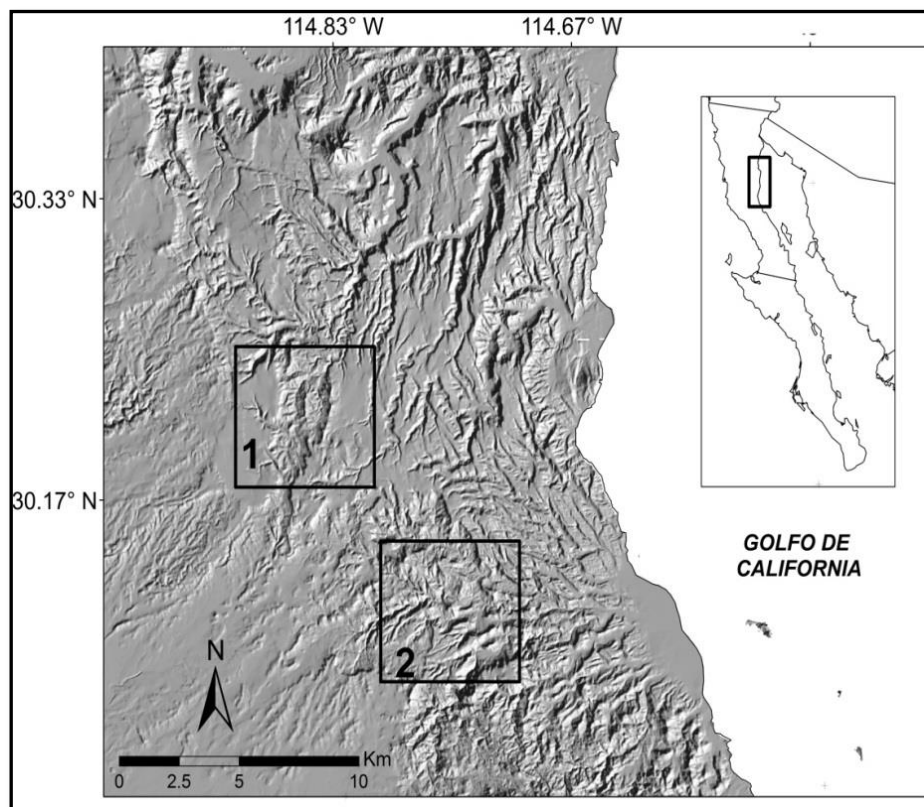
### 5.1.2 Objetivos particulares

1. Identificar áreas de distribución de rebaños y estructura poblacional de borrego cimarrón.
2. Determinar el uso de cuerpos de agua por el borrego cimarrón.
3. Analizar las preferencias de uso y selección del terreno de escape por el borrego cimarrón.
4. Analizar el uso y selección de la cobertura vegetal por el borrego cimarrón.

## 6. MATERIALES Y METODOS

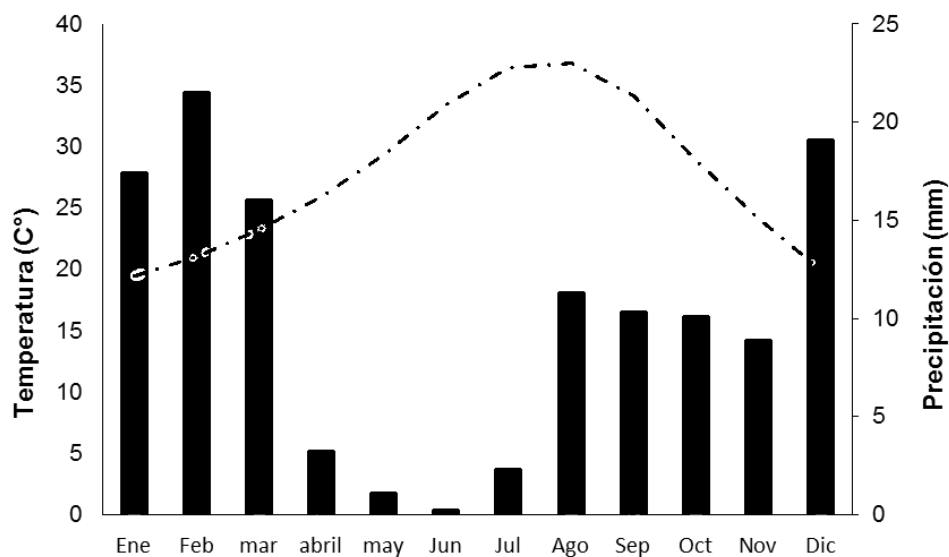
### 6.1 Área de estudio

La investigación se realizó en la Sierra Santa Isabel, localizada en la región central del Estado de Baja California, México ( $30.460^{\circ}$  N  $-115.191^{\circ}$  W y  $29.950^{\circ}$  N  $-114.757^{\circ}$  W (Figura 4). La Sierra se caracteriza por contar con el mayor hábitat continuo para el borrego cimarrón en el estado ( $2,072.45$  km<sup>2</sup>). Asimismo, es la que presenta el mejor grado de conservación. Se ha estimado un tamaño poblacional del borrego cimarrón entre 300 - 400 ejemplares (DeForge *et al.*, 1993; Martínez y Eaton 2008; Martínez 2011; Lee *et al.*, 2012).



**Figura 4.** Área de estudio en Sierra Santa Isabel, Baja California, México. Los cuadros representan las áreas de monitoreo del borrego cimarrón. Los Hemes (1) y El Zamora (2).

En la Sierra, se localizan dos ecorregiones: por un lado, la parte baja del Desierto de Colorado en los valles y lomeríos cercanos al Golfo de California, donde las principales especies vegetales son *Larrea tridentata*, *Fouquieria splendens*, *Agave deserti*, *Psoralea spinosus*, *Olneya tesota* y *Prosopis sp.* Por otro lado, en la ecorregión del Desierto Central, que corresponde a la mayor parte de la Sierra, las principales especies son *Ambrosia dumosa*, *Prosopis microphylla*, *Bursera microphylla*, *Fouquieria columnaris*, *Cercidium microphyllum* y *Pachycereus discolor* (González-Abraham *et al.*, 2010). El clima es semicálido, con 28 °C de temperatura media anual (Figura 5).



**Figura 5.** Las barras representan la precipitación mensual y la línea punteada la temperatura mensual en los últimos 30 años. Estación climática 2043 San Agustín, Baja California (SMN, 2013).

La precipitación media anual en las serranías cercanas al Golfo de California es menor a 50 mm, mientras que en en la parte central y en el norte de la sierra, oscila entre los 100 y 150 mm (SMN, 2013). Los principales depredadores del borrego cimarrón en la Sierra Santa Isabel son el puma

(*Puma concolor*), el gato montés (*Lynx rufus*), el coyote (*Canis latrans*) y el águila real (*Aquila chrysaetos*).

## 6.2 Localización de borregos cimarrones

Se seleccionaron dos localidades para observar a los borregos cimarrones, con un área de 10 x 10 km cada una. La primera, Los Hemes, se localiza en la parte central de Sierra Santa Isabel. Dicha localidad se caracteriza por ser accesible y cuenta con un aguaje principal, que tiene agua la mayor parte del año. La altitud oscila entre 600 y 900 metros, y los rasgos topográficos son cañones y planicies en las partes altas. La segunda localidad, El Zamora, se ubica en el sur de la Sierra, donde se presenta la mayor disponibilidad de agua para la fauna silvestre. Se caracteriza por tener cañones y cumbres a las que solo se puede acceder a pie. Estas localidades fueron seleccionadas debido a que son frecuentadas por los borregos cimarrones, y existe la posibilidad de acceder a ellas en diferentes épocas del año, con autorización de los propietarios de los terrenos.

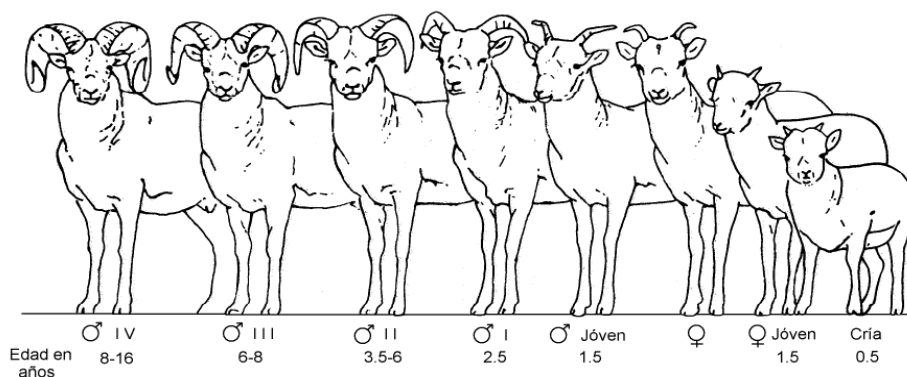
Mediante recorridos terrestres de 10 km de longitud, efectuados en diferentes periodos del año (julio del 2011 a febrero del 2012), se realizaron observaciones directas de borregos en forma individual o en grupos, en tres periodos: seco (julio a septiembre), lluvias (octubre a diciembre) y post-lluvias (diciembre a febrero).

Los tres periodos corresponden aproximadamente a las temporadas de segregación sexual, apareamiento y crianza (Rubin *et al.*, 2000). Durante ocho días de cada periodo, y recorriendo los mismos transectos (cuatro en total), dos equipos de tres personas realizaron por separado búsquedas y observaciones directas de borregos, utilizando binoculares 10 x 40. La colecta de datos se

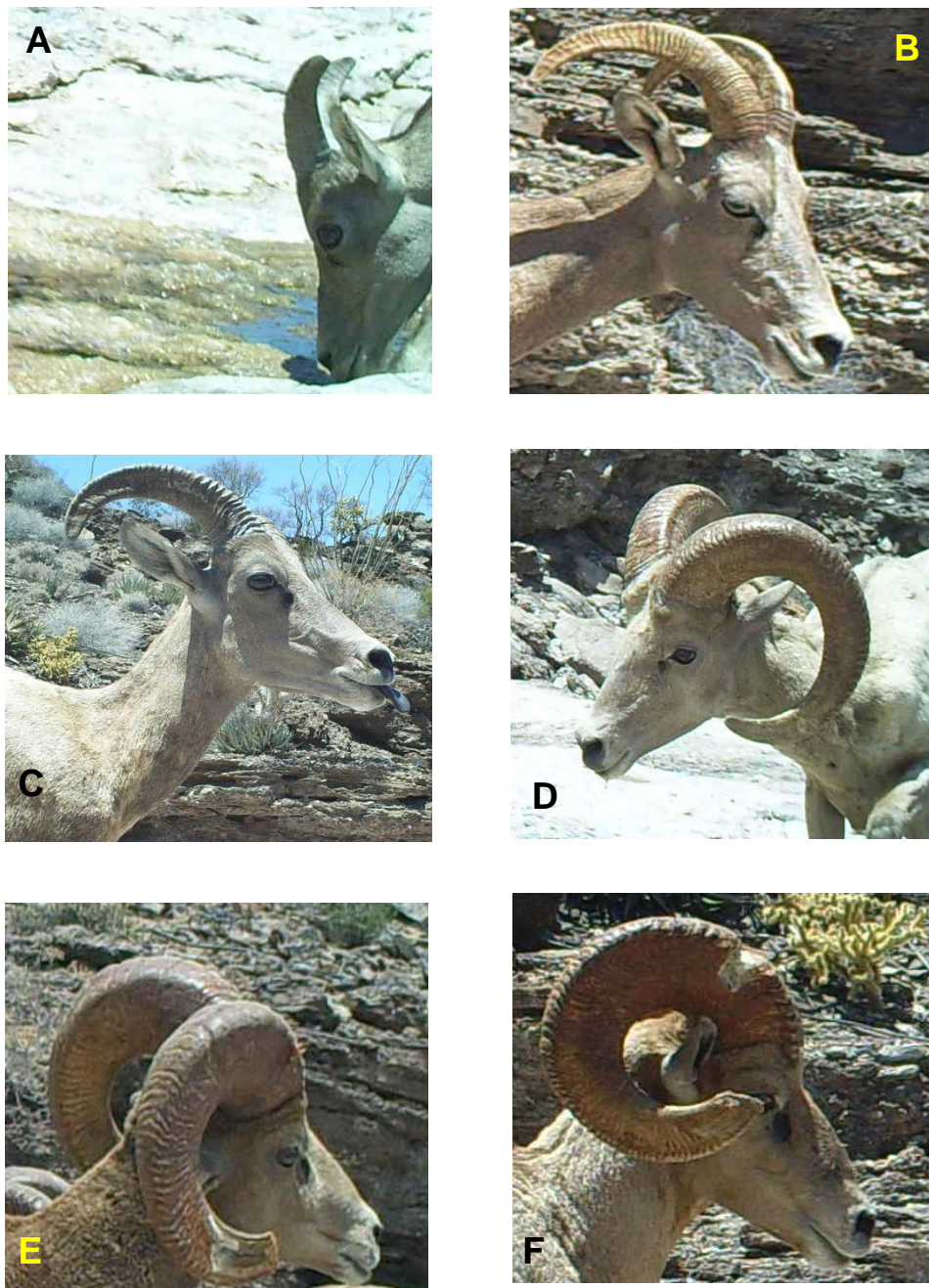


realizó a lo largo de cinco horas en la mañana (7:00 a 12:00) y cuatro en la tarde (14:00 a 18:00).

En cada observación individual o de grupos de borregos, los observadores acudieron al sitio para ubicarlo espacialmente con un GPS. La edad y género de los borregos se estableció con base en la descripción propuesta por Monson y Summer (1980), quienes definen cuatro clases de edad para los machos, considerando el tamaño del cuerpo y el tipo de cornamenta: clase I (cuernos con un cuarto de curvatura), con edades entre 2 y 3 años; clase II (cuernos con un medio curvatura), con edades entre tres y seis años; clase III (cuernos con tres cuartos de curvatura), y clase IV (cuernos con curvatura completa y la punta generalmente desgastada, que puede superar la órbita ocular) en borregos con edades superiores a los seis años. Las hembras se clasificaron en jóvenes (cuernos con inicio de curvatura), con edades entre uno y dos años, y adultas (cuernos largos con curvatura en forma de L), con edades mayores a los dos años. Por último, se nombró añero de ambos sexos a borregos con edades menores a un año. En ellos es visible el inicio del crecimiento del cuerno, pero no resultó claro definir su sexo (Figuras 6 y 7).



**Figura 6.** Categorías de sexo y edad del borrego cimarrón (Tomado de Monson y Summer, 1980). Los números romanos representan la clase de edad en los machos.



**Figura 7.** Ejemplos de categorías de edad del borrego cimarrón: hembra juvenil (A), hembra adulta (B), clases de edad en machos: clase I (C), clase II (D) clase III (E), y clase IV (F).

### 6.3 Detección de aguajes

Con base en información proporcionada por los propietarios y habitantes en Sierra Santa Isabel, se obtuvo una base de datos de los sitios potenciales con agua, en arroyos, tinajas, pozas y manantiales. Se tomó como referencia la ubicación de estos sitios para obtener información sobre la presencia de cuerpos de agua y vegetación, para facilitar su detección.

Se procesaron dos imágenes Landsat-8 OLI, correspondientes a la Columna 38 y Renglón 39 del Sistema Mundial de Referencia (WRS-2) con resolución espacial de 30 metros, descargadas del Servicio Geológico de Estados Unidos ([www.glovis.usgs.gov](http://www.glovis.usgs.gov)), con fechas de adquisición del 12 de agosto y 30 de octubre del 2013. La primera imagen corresponde al final del período seco, durante las temperaturas más altas del año (40°C). La segunda imagen corresponde al período de lluvias con precipitaciones de 50 a 100 mm (SMN, 2013).

Las imágenes fueron co-registradas (sobrepuestas de pixel a pixel) utilizando el sistema de procesamiento de imágenes de satélite ENVI 4.7 (EXELIS 2012). Para cada imagen se seleccionaron las bandas espectrales en donde la vegetación y el agua presentan un comportamiento de reflexión o de absorción. Estas bandas son: el canal rojo (banda 4, 0.64-0.67  $\mu\text{m}$ ), donde la vegetación presenta un comportamiento de absorción; el infrarrojo cercano (banda 5, 0.85-0.88  $\mu\text{m}$ ) donde el agua presenta absorción, y la vegetación presenta una alta reflexión; y el infrarrojo de onda corta (banda 6, 1.57-1.65  $\mu\text{m}$ ) donde el agua presenta comportamiento de absorción. Posteriormente, se realizó un compuesto en falso color (OLI- RGB/654) para resaltar los sitios con posibilidad de contener agua.

Tomando en consideración que los sitios con cuerpos de agua en zonas áridas presentan una mayor cobertura vegetal contrastante con el resto del área, en los sitios identificados se calculó un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en un radio de 1 km, distancia a la cual se ha reportado que los borregos cimarrones se distribuyen alrededor de los cuerpos de agua (Hamlyn y Vaughan, 2010). El índice se calculó mediante la siguiente ecuación:

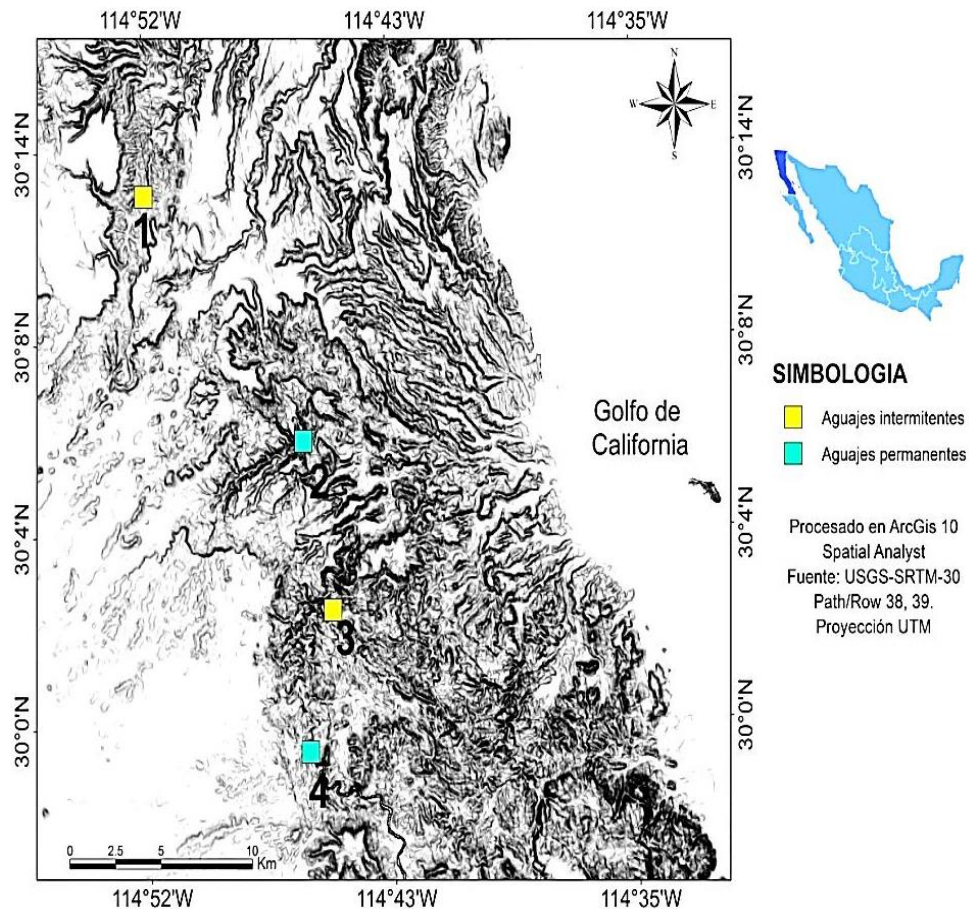
$$NDVI = (Infrarojo\ cercano - Rojo) / (Infrarojo\ cercano + Rojo) \quad (2)$$

En zonas áridas, los valores positivos de NDVI mayores a 0.30 corresponden a sitios con vegetación densa, normalmente mayor al 30%, mientras que los valores negativos usualmente son asociados con suelos desnudos y superficies sin vegetación (Purevdorj *et al.*, 1998; Chuvieco, 2010).

Para determinar si los valores de NDVI son mayores en sitios asociados a los agujeros, con relación al resto del área, se realizó una comparación entre un grupo de píxeles de NDVI (denominado sitio de control) y los valores de NDVI obtenidos en los agujeros. Los agujeros fueron clasificados en permanentes y temporales. Para comparar las diferencias en los valores de NDVI, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, seguido por una prueba de Duncan (Winer *et al.*, 1991). Posteriormente las diferencias de NDVI entre los agujeros y el sitio control se presentan con diagramas de cajas (Salgado-Ugarte, 1992).

#### 6.4 Uso de agujajes por el borrego cimarrón

Una vez identificados los agujajes, se seleccionaron dos permanentes y dos temporales. En cada uno de ellos, se colocaron dos cámaras digitales automáticas, con detector de movimiento y temperatura (Stealth cam y Bushnell) de 6 mega pixeles. Las cámaras se programaron para funcionar de manera continua y realizar 3 fotografías y video grabación de 10 segundos cuando detectaban un objeto en movimiento. Las cámaras funcionaron durante el período seco del año 2013 (julio a noviembre) en los agujajes de Los Hemes y El Zamora, El Volcán y el Cordero (Figuras 8 y 9).



**Figura 8.** Ubicación de los agujajes donde se realizó el fototrampeo en la Sierra Santa Isabel, Baja California: 1. Los Hemes, 2. El Zamora, 3. El Cordero, 4. El Volcán.





**Figura 9.** Fotografía de los aguajes: A) Los Hemes, B) El Volcán, C) El Cordero, D) El Zamora, en la Sierra Santa Isabel, Baja California.

Los registros fotográficos se separaron con una diferencia de una hora para ser considerados como muestras independientes y disminuir así el doble conteo de borregos (Cutler y Swann, 1999; Perry *et al.*, 2010). La frecuencia de registros fotográficos en cada aguaje se analizó mediante pruebas de *Ji-Cuadrada* para determinar si existen diferencias en la frecuencia de utilización de cada aguaje. Con una prueba de *T-Student* se identificó cuál aguaje tuvo una mayor utilización por los borregos cimarrones.

Para determinar la frecuencia de utilización de cada aguaje, se consideraron todas las muestras independientes (registros fotográficos) para calcular el Índice de Abundancia Relativa propuesto por Karanth y Nichols (1998), conocido como Frecuencia de Captura (FC), que se describe con la siguiente ecuación:

$$FC = \frac{\text{Número de individuos en cada muestra}}{\text{Número de días trampa}} \times 100 \quad (3)$$

El índice de FC es adecuado para especies difíciles de identificar, pero cuya presencia o ausencia es fácil de detectar por medio de las cámaras, (Skalski, Ryding y Millspaugh, 2010).

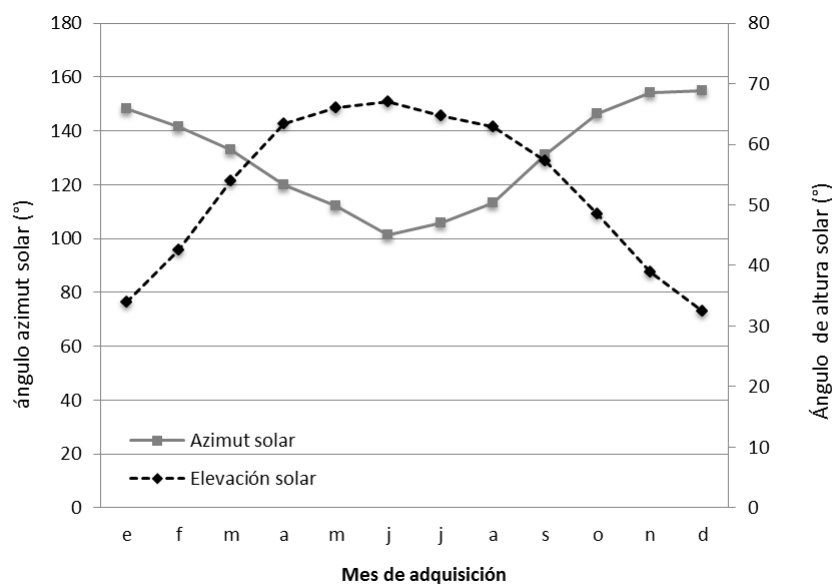
## 6.5 Terreno de escape

Por medio del portal del Servicio Geológico de Estado Unidos (USGS), se obtuvo un Modelo Digital de Elevación (MDE). Estos modelos fueron generados a partir de imágenes de radar de apertura sintética adquiridas durante la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la NASA. El modelo se localiza en la Columna 38 y Renglón 39 (WRS-2) y tiene una resolución espacial de 30 metros para cada píxel. El MDE se procesó utilizando el programa ArcGis 10 (ESRI 2010) y siguiendo la metodología propuesta por Riley *et al.* (1999) se implementó un algoritmo en lenguaje de programación Python para calcular el Índice de Rugosidad del Terreno (IRT). Los valores de IRT son equivalentes a la cantidad de terreno de escape disponible en el área de distribución del borrego cimarrón.

Con base en los valores obtenidos del IRT y en clasificaciones realizadas previamente por Álvarez-Cárdenas *et al.* (2009) y Gilad *et al.* (2013), se definieron cuatro categorías de rugosidad del terreno con los siguientes intervalos: 1) plano con cerros bajos 0 - 15; 2) poco rugoso con sierras bajas 16 - 30; 3) sierras medianas con cañones 31 - 45; 4) sierras altas con cañones, para valores mayores a 45.

## 6.6 Cobertura vegetal

En el portal USGS, se obtuvieron tres imágenes de satélite Landsat-TM (columna 38, renglón 39) libres de nubosidad, y con ángulos de altura solar mayores a 30°, con el objeto de disminuir el efecto de sombreado (Figura 10). Las fechas de adquisición de estas imágenes fueron: 7 de septiembre de 2011 (periodo de seco), 16 de noviembre de 2011 (periodo de lluvias) y 12 de febrero de 2012 (periodo de postlluvias). Las imágenes fueron procesadas y co-registradas utilizando el sistema ENVI 4.7 (EXELIS 2012).



**Figura 10.** Ángulos de observación del sensor TM con capacidad de apuntamiento al nadir, correspondiente al período 2011-2012. Información adquirida de los metadatos de las imágenes correspondientes a cada mes (Pat = 38 Row = 39).

Para cada localidad se calculó un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual es considerado como uno de los mejores estimadores de cobertura vegetal mediante sensores remotos (Purevdorj *et al.*, 1998; Pettoreli 2013). A los valores de NDVI se les aplicó la corrección



radiométrica propuesta por Guyot y Gu (1994), la cual es recomendable para imágenes del sensor TM en ecosistemas áridos. Esta corrección se aplica a los valores radiométricos de las bandas, y se describe mediante la siguiente ecuación:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IRC} - 0.801 \times \text{R}}{\text{IRC} + 0.801 \times \text{R}} \quad (4)$$

IRC y R indican la reflectividad del píxel en la banda del infrarrojo cercano y del rojo para el sensor TM. Los valores positivos cercanos a 1 indican una mayor cobertura vegetal, mientras que los valores de 0 y negativos se relacionan con una baja cobertura y con suelo desnudo.

Utilizando el módulo *statistics* en ENVI 4.7 (EXELIS 2012), a partir del valor de NDVI de cada píxel calculado, se establecieron tres categorías de cobertura vegetal para cada imagen. El tercio inferior corresponde a la categoría baja; el tercio intermedio, a la categoría media, y el tercio superior, a la categoría alta (VanBommel *et al.*, 2006).

Las categorías de cobertura vegetal para cada imagen se importaron al programa ArcGis 10 (ESRI 2010), y con la herramienta de Estadística Focal (*Focal Statistics*), se obtuvo la categoría de cobertura vegetal en aproximadamente una hectárea, esto es, una matriz de 90 m x 90 m. Esta dimensión espacial representa el área mínima que utiliza el borrego cimarrón para alimentarse (Valdez y Krausman, 1999; Sandoval *et al.*, 2014).

## 6.7 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de uso-disponibilidad de hábitat, cuyo objetivo fue relacionar los registros de uso de las variables del hábitat por el borrego cimarrón, con su disponibilidad en un área específica. Con las herramientas de Análisis Espacial (*Spatial Analysis*) en ArcGis 10, se determinó la proporción disponible de las categorías rugosidad y cobertura vegetal. Posteriormente, se exportó la información de registros de observación de borregos de cada periodo, se exportó como un vector de puntos al programa ArcGis 10. Con los módulos de tabulación de área y un análisis aleatorio en el mismo programa, se obtuvo la frecuencia de registros observados y esperados de acuerdo con la disponibilidad de cada categoría del hábitat.

Con la información de uso (frecuencia de observación) y disponibilidad (categorías de rugosidad y NDVI), se exploró la hipótesis de selección de hábitat, la cual establece que cuando el recurso tiene una frecuencia de utilización proporcional a su disponibilidad, este se utiliza al azar y se define como uso. En cambio, la selección se refiere a la preferencia de un recurso; es decir, que su frecuencia de utilización es mayor que su disponibilidad.

Para probar la hipótesis, se realizó una prueba Chi Cuadrada entre los valores de las frecuencias de uso observadas y esperadas, de acuerdo con la proporción disponible de las categorías de hábitat. Si no se encuentran diferencias significativas entre estos dos valores, se acepta la hipótesis estadística de utilización al azar. En contraste, si se obtienen diferencias significativas, se rechaza la hipótesis de utilización al azar y se continúa con la construcción de intervalos de confianza de Bonferroni al 95 % para determinar el patrón de utilización del recurso en términos de uso, rechazo o selección (Neu *et al.*, 1974; Marcum y Loftsgaarden, 1980).

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Estructura poblacional

En total, se registraron 271 observaciones de borregos cimarrones, 40.2% durante el periodo seco, 36.5% durante el periodo de lluvias, y en postlluvias, se obtuvo el menor registro, 23.2 % (Tabla II).

En la localidad El Zamora, la observación de hembras y añeros representó el 79.6 % del total de las 162 observaciones; los machos representaron el 15.4 %, los corderos, el 5.0 %. La mayor proporción añero/hembra fue de 70.5 %, observada durante el período de postlluvias, lo que indica que por cada 10 hembras, siete tenían añeros.

La mayor proporción macho/hembra se registró durante el periodo de lluvias, con 35.2 %, es decir, por cada macho se observaron tres hembras. La observación de corderos fue baja, con ocho registros durante el periodo de postlluvias (Tabla II).

En Los Hemes, se observaron menos borregos que en El Zamora, con un total de 109 registros. En el periodo de seco, se obtuvo 43.11 % de los registros, seguido de las lluvias, con 38.54 %, y postlluvias, con 18.35 %. La mayoría de los registros fueron hembras (49.5 %), machos (31.1 %) y añeros (17.4 %) y sólo se observaron dos corderos. Esta localidad se caracterizó por un mayor registro de machos clase III y IV, en comparación con la localidad El Zamora.

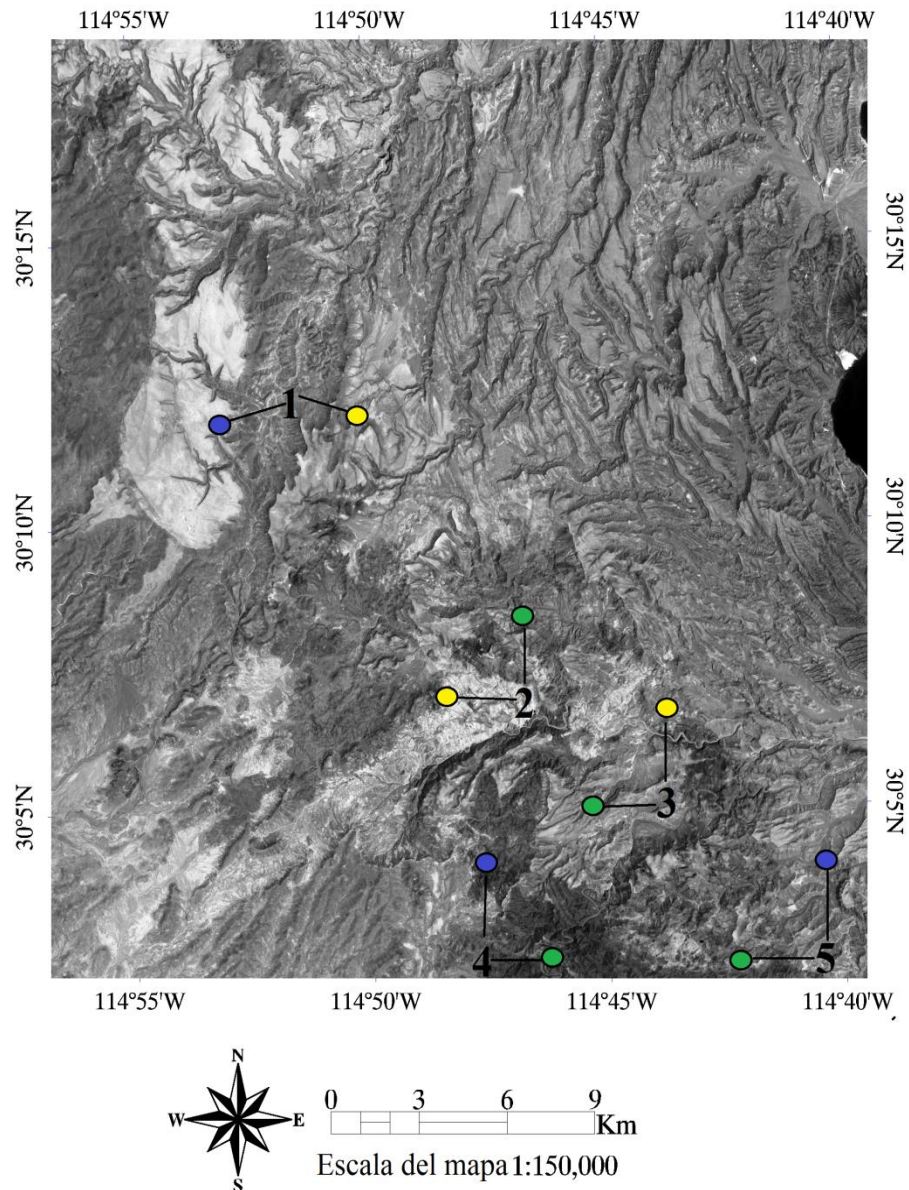
**Tabla II.** Resultados de los conteos de borrego cimarrón en Sierra Santa Isabel, Baja California. Cor = corderos, Añr = añero, Jov= Jóvenes, Ad=adultos

Localidad	Periodo	Cor	Añr	Hembras		Machos				Total
				Jov	Ad	C1	C2	C3	C4	
<b>Zamora</b>	Seco	0	15	14	25	0	2	4	2	62
	Lluvias	0	16	8	22	10	1	0	0	57
	Postlluvias	8	12	7	10	4	2	0	0	43
	Subtotal	8	43	29	57	14	5	4	2	162
<b>Hemes</b>	Seco	0	7	3	21	2	2	7	5	47
	Lluvias	0	8	7	12	3	7	3	2	42
	Postlluvias	2	4	4	7	0	0	2	1	20
	Subtotal	2	19	14	40	5	9	12	8	109

## 7.2 Uso de aguajes

El tiempo de operación continua de las cámaras fue de 150 días, periodo en el cual se obtuvieron 260 registros fotográficos de borrego cimarrón en los cuatro aguajes. En general, las hembras, añeros y corderos representaron el 73% ( $n = 192$ ) de los registros, los machos clase II y III fueron los de mayor frecuencia ( $n = 44$ ). Considerando todos los registros, la proporción de sexos fue: macho:hembra 53:100, y añero:hembra 40:100. En El Zamora se destacaron los registros de añeros y hembras (Figura 11), los cuales en conjunto representaron el 85.8 % ( $n = 103$ ). En la Figura 11 se observa una clara segregación de sexos en cuanto al uso de los aguajes. Los aguajes localizados en sitios con menor disponibilidad de terreno de escape fueron

visitados por grupos de machos y grupos mixtos de borregos adultos. Por su parte los agujajes ubicados en los sitios con mayor disponibilidad de terreno de escape, aislados y a los cuales sólo se puede acceder a pié, son utilizados por grupos de hembras con añeros.



**Figura 11.** Mapa que muestra el uso de agujajes por los diferentes grupos de borrego cimarrón en Sierra Santa Isabel, Baja California. 1. Los Hemes; 2. El Zamora; 3. El Cordero; 4. El Volcàn; 5. El Junco. Grupos de hembras = ● Grupos de machos = ●. Grupos de mixtos de hembras y machos=●.

La frecuencia de registros fotográficos varió significativamente entre los aguajes ( $X^2 = 33.21$ ,  $P < 0.05$ ), y los que presentaron mayor frecuencia de utilización fueron, El Zamora con el 46.1% ( $n = 120$ ) y El Cordero con el 25.76% ( $n = 67$ ). Se encontraron diferencias significativas entre las frecuencias de visita entre El Zamora y Los Hemes (T-Student = 0.038,  $P < 0.05$ ), y también entre El Cordero y Los Hemes (T-Student = 0.008,  $P < 0.05$ ). La FC confirmó que El Zamora fue el aguaje con mayor utilización (FC = 80), seguido por El Cordero (FC = 44) y el de menor utilización fue Los Hemes (FC = 19) (Tabla III).

**Tabla III.** Número de individuos y estructura poblacional de borrego cimarrón registrada en los aguajes de la Sierra Santa Isabel, Baja California.

Aguajes	Hembras				Machos				Total	FC
	Corderos	Añeros	HJ	HA	I	II	III	IV		
Los Hemes	0	3	2	11	0	4	7	2	29	19
El Zamora	0	34	21	48	5	4	4	4	120	80
El Volcán	4	9	4	11	6	5	2	3	44	29
El Cordero	5	6	7	26	2	8	10	3	67	44
*El Junco	0	2	5	22	3	1	5	4	42	28
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>54</b>	<b>39</b>	<b>118</b>	<b>16</b>	<b>22</b>	<b>28</b>	<b>16</b>	<b>302</b>	

### 7.3 Selección de terreno de escape

La selección de las categorías de rugosidad por los borregos, resultó significativamente diferente ( $\chi^2 = 9.83$ ,  $P < 0.05$ ). Los terrenos planos fueron los más disponibles para las dos localidades: Los Hemes, con 45.5% (4,752 ha), y El Zamora, con 30.4% (3,045 ha). Sin embargo, esta categoría fue

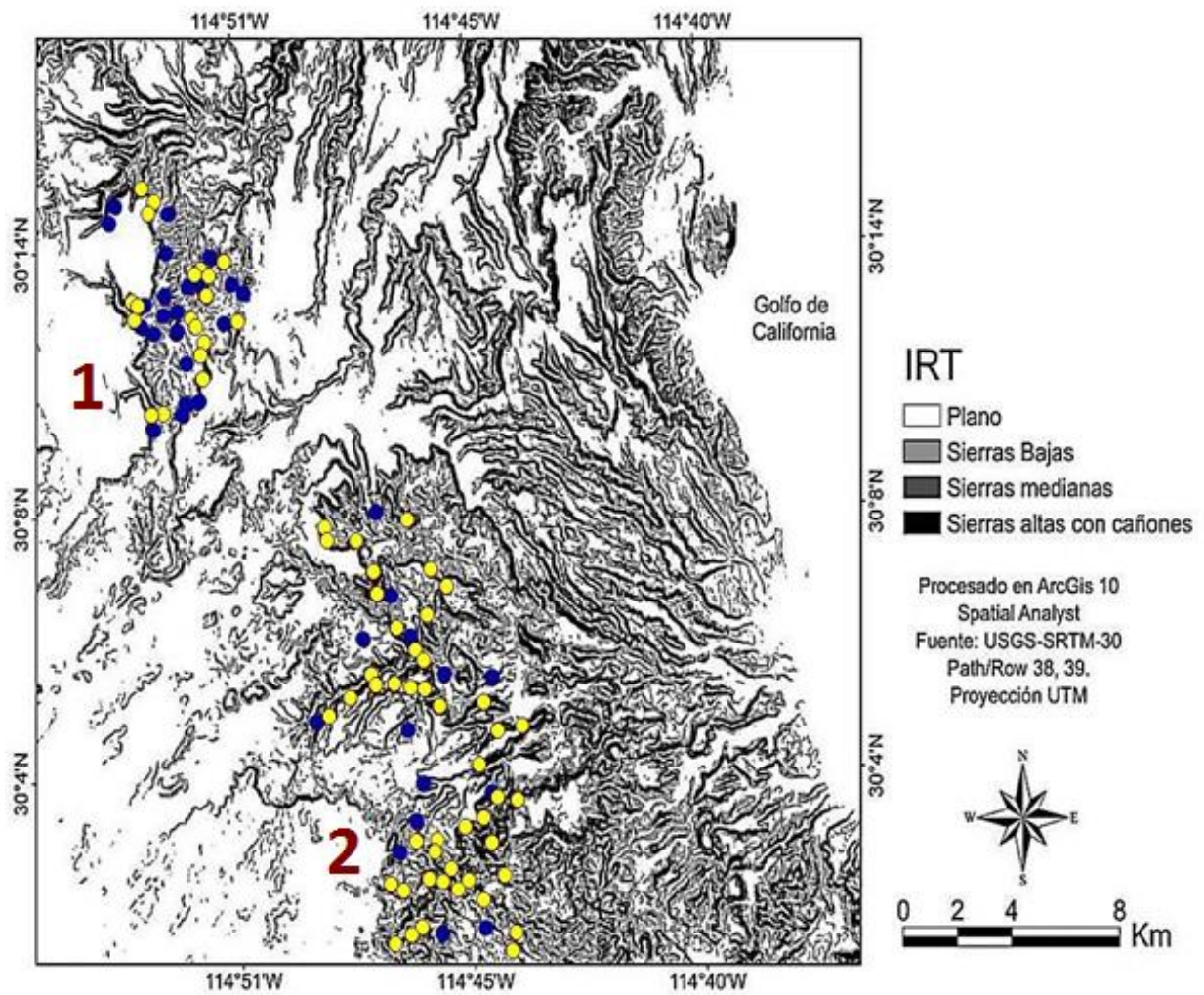
evitada por los borregos en las dos localidades de estudio. En El Zamora, los rebaños de hembras ( $n = 86$ ) y añeros ( $n = 43$ ) seleccionaron las categorías de media y alta rugosidad, que tuvieron una disponibilidad de 40.8 % (4,088 ha).

En Los Hemes, los machos jóvenes y adultos ( $n = 59$ ) seleccionaron las categorías poco y medianamente rugosas, disponibles en 43.4 % (4,348 ha). La categoría de alta rugosidad fue la de menor disponibilidad, con 9.0 % (900 ha), no se observó a ningún borrego cimarrón en esta categoría (Tabla IV, Figura 12).

**Tabla IV.** Selección espacial del borrego cimarrón de las categorías de rugosidad del terreno, en Sierra Santa Isabel, Baja California.

Localidad	Rugosidad	UO	E	Pi	IB	IE		
Zamora	Plano	2	0.37	0.01	0.27	0.47	Pi < E *	-
	Poco-rugoso	21	0.28	0.12	0.06	0.23	Pi < E *	-
	Media-rugoso	85	0.26	0.52	-0.28	-0.23	Pi > E *	+
	Altamente rugoso	54	0.09	0.33	-0.32	-0.16	Pi > E *	+
Hemes	Plano	13	0.35	0.11	0.13	0.32	Pi < E *	-
	Poco-rugoso	35	0.2	0.32	-0.22	-0.02	Pi > E *	+
	Media-rugoso	61	0.1	0.55	-0.55	-0.36	Pi > E *	+
	Altamente rugoso	0	0.02	0.001	-0.03	0.04	Pi < E	=

\* Valores con diferencias significativas ( $P < 0.05$ ). Seleccionan el hábitat (+). Evitan el hábitat (-). Uso de acuerdo con su disponibilidad (=). Uso observado (UO). Proporción de uso esperado (E). Proporción de uso observado (Pi). Intervalos de Bonferroni (IB). Interpretación estadística (IE).



**Figura 12.** Índice de rugosidad del terreno (IRT) en Sierra Santa Isabel, Baja California. Los círculos en azul son las observaciones de machos y los círculos en amarillo son las observaciones de hembras en las localidades Los Hemes (1) y El Zamora (2).

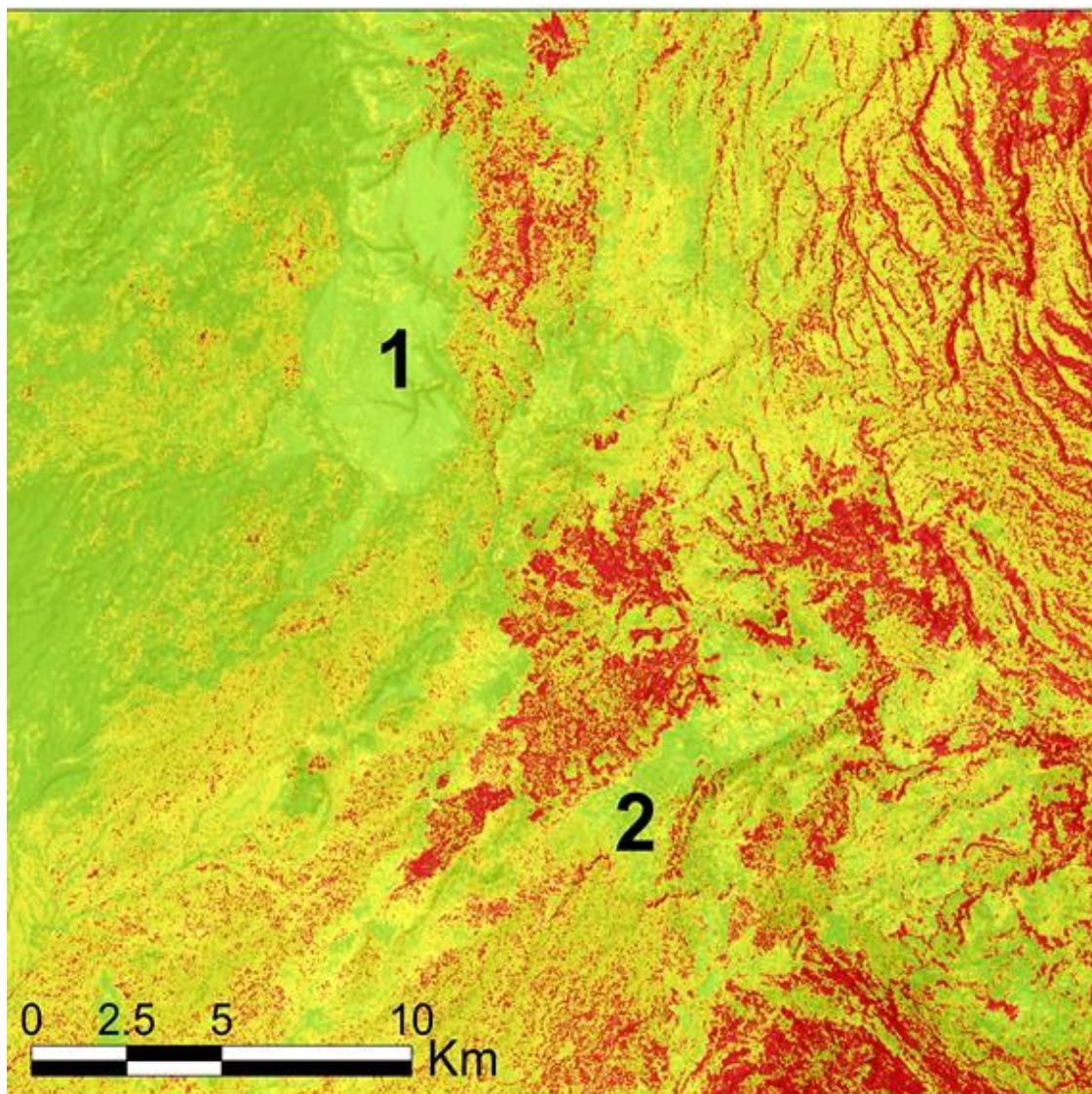


#### 7.4 Selección de cobertura vegetal

Los valores de NDVI obtenidos en la localidad de El Zamora fueron más altos durante los periodos de lluvias (0.20 a 0.40) y postlluvias (0.16 a 0.35); mientras que los valores más bajos, menores a 0.10 se presentaron en el periodo de seco. En Los Hemes, los valores de NDVI más altos se presentaron en postlluvias (0.12 a 0.24) y lluvias (0.11 a 0.24); con los valores más bajos en el periodo de seco (0.01 a 0.12) (Tabla V, Figuras 13, 14, 15).

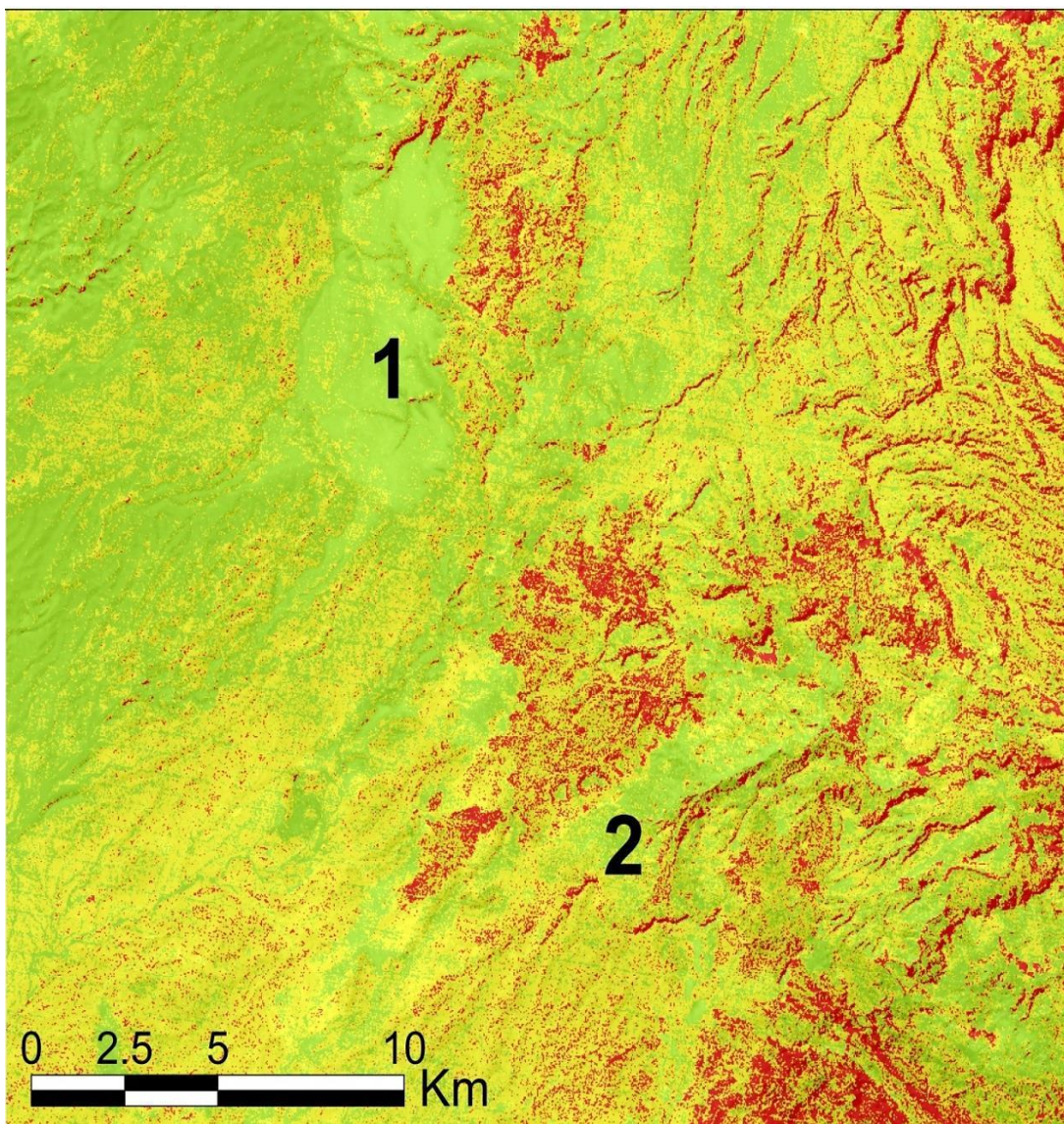
**Tabla V.** Rangos de NDVI para cada categoría y localidad de estudio en Sierra Santa Isabel, Baja California.

		CATEGORÍA DE NDVI		
Localidad	Periodo de monitoreo	Bajo	Medio	Alto
El Zamora	Seco	-0.07-0.06	0.07-0.19	0.20-0.33
	Lluvias	-0.20-0.00	0.01-0.19	0.20-0.40
	Postlluvias	-0.23-0.00	0.01-0.15	0.16-0.35
Los Hemes	Seco	0.01-0.05	0.05-0.09	0.10-0.14
	Lluvias	-0.11-0.00	0.01-0.08	0.09-0.18
	Postlluvias	-0.17-0.00	0.01-0.12	0.12-0.24



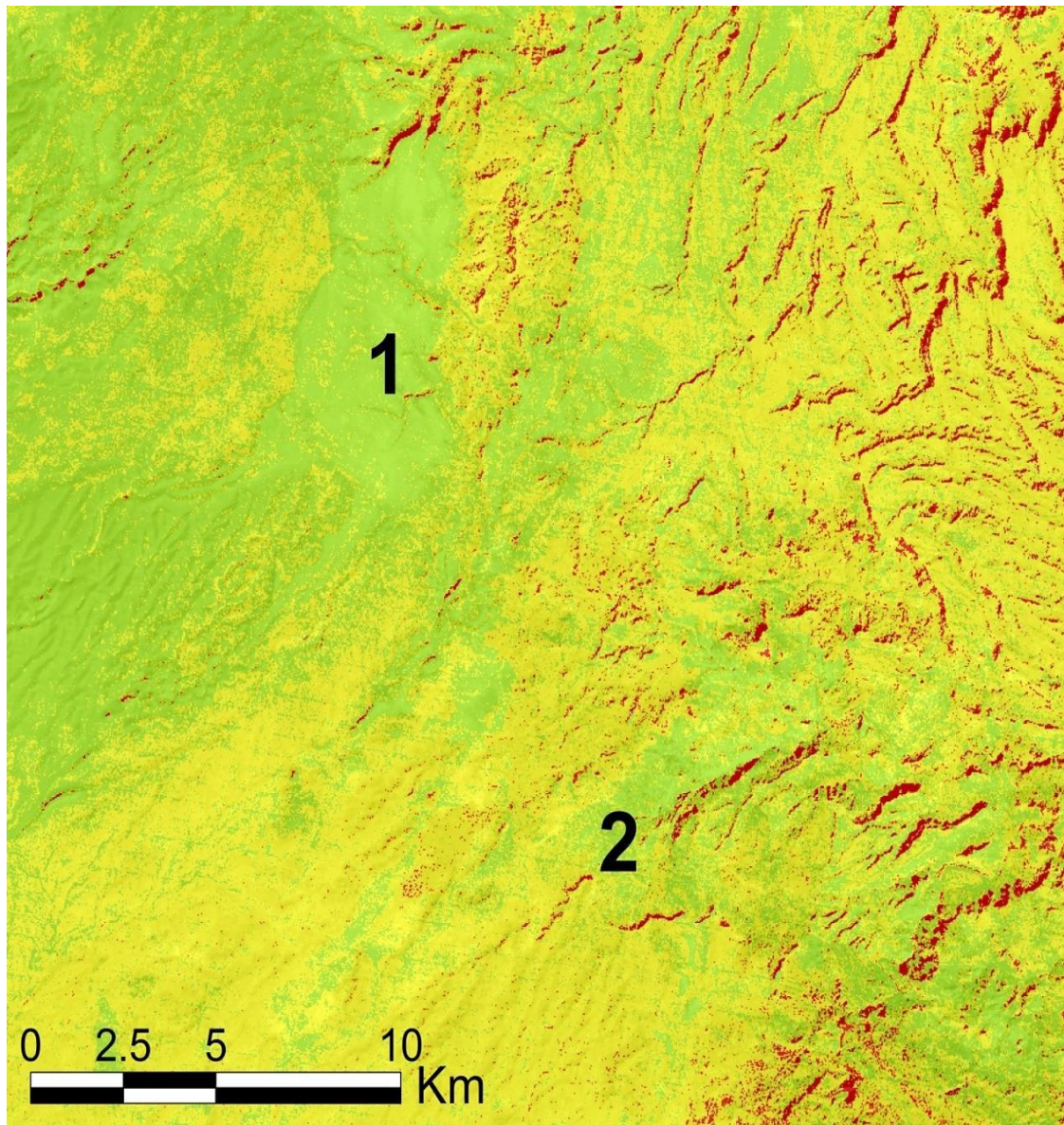
**Figura 13.** Categorías de NDVI: rojo = bajo, amarillo = medio, verde = alto. Localidades: Los Hemes (1), El Zamora (2). Durante el período de seco en La Sierra Santa Isabel, Baja California.





**Figura 14.** Categorías de NDVI: rojo = bajo, amarillo = medio, verde = alto. Localidad Los Hemes (1), localidad El Zamora (2). Durante el período de lluvias en La Sierra Santa Isabel, Baja California.





**Figura 15.** Categorías de NDVI: rojo = bajo, amarillo = medio, verde = alto. Localidades: Los Hemes (1), El Zamora (2). Durante el período de postlluvias en La Sierra Santa Isabel, Baja California.

En la localidad El Zamora, durante el periodo seco, la selección de las categorías de NDVI por los borregos presentó diferencias significativas ( $\chi^2 = 11.58$ ,  $P < 0.05$ ) (Tabla VI, Figura 15). La categoría de NDVI bajo estuvo

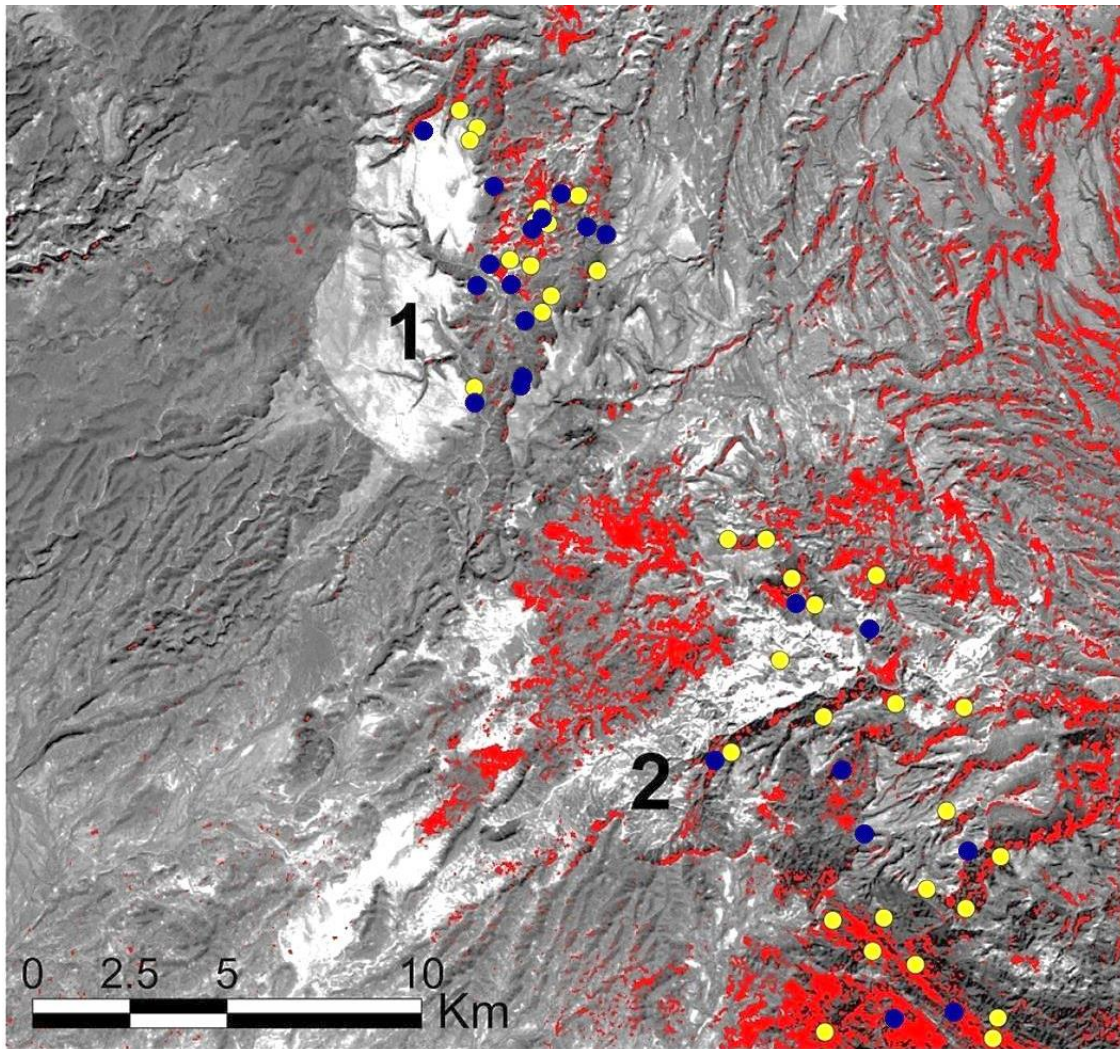
disponible en 12.7 % (1,277 ha) y fue seleccionada por los borregos. La categoría de NDVI medio fue seleccionada en proporción a su disponibilidad, y la categoría de NDVI alto fue evitada. Estas categorías, en conjunto representaron el 87.2 % (8,723 ha). En Los Hemes, durante el periodo de seco también se encontraron diferencias significativas en la selección de las categorías de cobertura vegetal ( $\chi^2 = 13.88$ ,  $P < 0.05$ ). La categoría de NDVI bajo estuvo disponible en 15.4 % (1,540 ha) y fue seleccionada por los borregos. Las categorías evitadas fueron: NDVI medio, con 45.6 % (4,560 ha), y NDVI alto, con 39.0 % (3,900 ha) (Figura 16).

**Tabla VI.** Selección espacial de las categorías de NDVI por el borrego cimarrón para el período seco en Sierra Santa Isabel, Baja California

Localidad	NDVI	UO	E	Pi	IB	IE		
Zamora	Bajo	37	0.4	0.62	-0.38	-0.04	Pi > E *	+
	Medio	23	0.42	0.37	-0.12	0.21	Pi < E	=
	Alto	2	0.17	0.03	0.04	0.23	Pi < E *	-
Hemes	Bajo	25	0.18	0.54	-0.54	-0.15	Pi > E *	+
	Medio	12	0.54	0.25	0.07	0.49	Pi < E *	-
	Alto	10	0.28	0.21	-0.12	0.25	Pi < E	=

\* Valores con diferencias significativas ( $P < 0.05$ ). Seleccionan el hábitat (+). Evitan el hábitat (-). Uso de acuerdo con su disponibilidad (=). Uso observado (UO). Proporción de uso esperado (E). Proporción de uso observada (Pi). Intervalo de Bonferroni (IB). Interpretación estadística (IE).





**Figura 16.** Imagen Landsat TM en monocromático, 7 de septiembre de 2011, Sierra Santa Isabel, Baja California. Los círculos en azul son observaciones de machos y los círculos en amarillo son de hembras de borregos en las localidades Los Hemes (1) y El Zamora (2). En color rojo, se representan las categorías de NDVI bajo que seleccionaron los borregos.

En el periodo de lluvias, también se encontraron diferencias significativas en la selección de las categorías de cobertura vegetal ( $\chi^2 = 8.72$ ,  $P < 0.05$ ). La categoría NDVI alto fue seleccionada y tuvo una disponibilidad de 40.8 % (4,083.66 ha). La categoría NDVI medio tuvo la mayor disponibilidad, con 47.1 % (4,717 ha) pero fue evitada. La categoría NDVI bajo representó 11.8 %

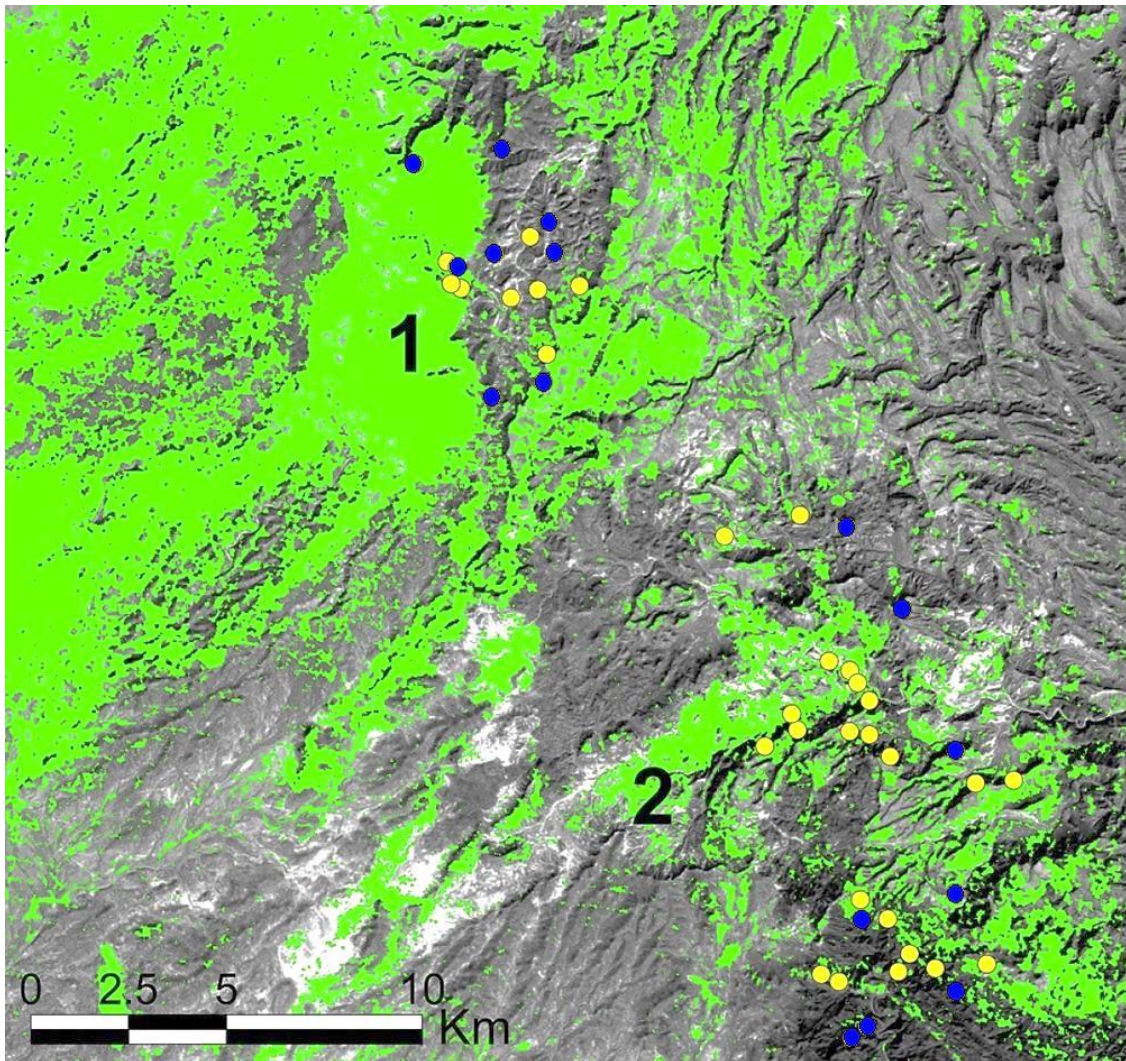
(1,189 ha) y fue seleccionada en proporción a su disponibilidad (Tabla VII, Figura 17).

**Tabla VII.** Selección espacial de las categorías de NDVI por el borrego cimarrón durante el período de lluvias, en Sierra Santa Isabel, Baja California.

Período	NDVI	UO	E	Pi	IB	IE	
Zamora	Bajo	1	0.08	0.017	-0.007	0.13	Pi < E =
	Medio	12	0.38	0.21	0.011	0.32	Pi < E *
	Alto	44	0.54	0.77	-0.39	-0.06	Pi > E *
Hemes	Bajo	17	0.1	0.40	-0.49	-0.11	Pi > E *
	Medio	18	0.34	0.42	-0.30	0.13	Pi > E =
	Alto	7	0.56	0.16	0.19	0.59	Pi < E *

\* Valores con diferencias significativas ( $P < 0.05$ ). Seleccionan el hábitat (+). Evitan el hábitat (-). Uso de acuerdo con su disponibilidad (=). Uso observado (UO). Proporción de uso esperado (E). Proporción de uso observado (Pi). Intervalo de Bonferroni (IB). Interpretación estadística (IE).





**Figura 17.** Imagen Landsat TM en monocromático, 16 de noviembre de 2011, Sierra Santa Isabel, Baja California. Los círculos en azul corresponden a las observaciones de machos y los círculos en amarillo a las hembras de borregos en las localidades Los Hemes (1) y El Zamora (2). En color verde se representa la categoría de NDVI alto que seleccionaron los borregos.

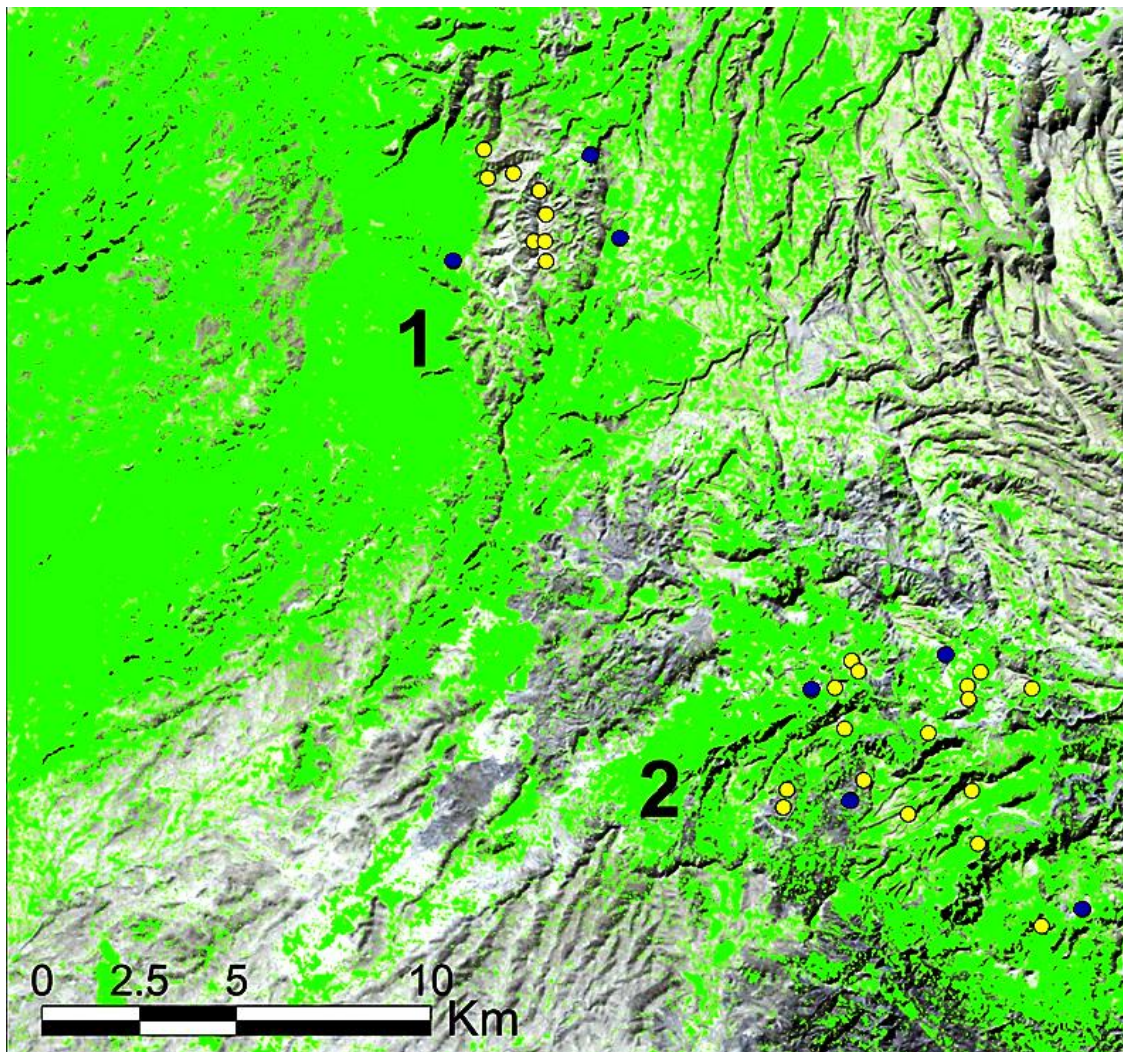


En el periodo de postlluvias no se encontraron diferencias significativas en la selección que hicieron los borregos de las categorías de cobertura vegetal ( $\chi^2 = 1.96$ ,  $P > 0.05$ ; Tabla VIII, Figura 18).

**Tabla VIII.** Selección espacial de las categorías de NDVI por el borrego cimarrón durante el período de postlluvias en Sierra Santa Isabel, Baja California.

Localidad	NDVI	UO	E	Pi	IB	IE	
Zamora	Bajo	0	0.04	0.0	-0.02	0.10	Pi < E =
	Medio	20	0.34	0.46	-0.34	0.09	Pi > E =
	Alto	23	0.62	0.53	-0.13	0.30	Pi < E =
Hemes	Bajo	0	0.08	0	-0.03	0.19	Pi < E =
	Medio	9	0.48	0.45	-0.29	0.35	Pi < E =
	Alto	11	0.44	0.55	-0.43	0.21	Pi > E =

Uso de acuerdo con su disponibilidad (=). Uso observado (UO). Proporción de uso esperado (E). Proporción de uso observado (Pi). Intervalos de Bonferroni (IB). Interpretación estadística (IE).



**Figura 18.** Imagen Landsat TM en monocromático, 12 de Febrero del 2012, Sierra Santa Isabel, Baja California. Los círculos en azul son las observaciones de machos y los círculos en amarillo son las observaciones de hembras de borregos en las localidades Los Hemes (1) y El Zamora (2). En color verde se representan las categorías de NDVI alto que utilizaron al azar los borregos.

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1 Estructura poblacional

Esta investigación es la primera donde se realizan monitoreos terrestres sistemáticos de borrego cimarrón en Baja California, para evaluar su hábitat en diferentes períodos del año; anteriormente solamente se hicieron durante una estación del año (Villa, 1959; Álvarez, 1976; Deforge *et al.*, 1993; Alanis y Lee 2001; Martínez, 2011 y Lee *et al.*, 2012).

Para la Sierra Santa Isabel, los resultados obtenidos del monitoreo aéreo del año 2010 (Martínez, 2011), indicaron que la población había disminuido drásticamente, registrando solamente 20 borregos, donde anteriormente, en promedio se observaban más de 100 ejemplares, con una población estimada entre 300-400 borregos (Lee *et al.*, 2012). Sin embargo, los monitoreos terrestres realizados en el año 2011 (Martínez, 2011), en localidades donde no sobrevoló el helicóptero, los resultados fueron contrastantes, registrando 181 ejemplares, con una alta observación de hembras ( $n = 61$ ), de hecho esta fue la sierra donde se observaron más borregos y donde se reportó la mayor disponibilidad de agua en tinajas y manantiales en el estado.

En todos los monitoreos se detectaron añeros, información útil para identificar la importancia de cada localidad para el reclutamiento. En Los Hemes, por primera vez se reportan nacimientos, lo cual es inusual, ya que de acuerdo a diversas investigaciones (Bangs *et al.*, 2005; Sandoval *et al.*, 2014) los sitios de parición se caracterizan por ser escarpados y de difícil acceso, características no tan evidentes en este sitio.

La estructura poblacional del borrego cimarrón en este estudio es similar a lo reportado en monitoreos previos, donde los grupos de hembras fueron observados en mayor proporción a los grupos de machos. En cuanto a la proporción de sexos expresada como el número de machos observados por cada 100 hembras (Bolen y Robinson, 1995), se observó en el período de seco una proporción macho: hembra de 38:100, la cual es la más baja que se ha reportado. Una explicación es que en dicho período los rebaños de borrego cimarrón se encuentran segregados, y los grupos de machos y hembras raramente se observan juntos (Rubin *et al.*, 2000).

Durante el período de lluvias, la proporción fue de 53:100, lo que indica el inicio de la temporada reproductiva (que incluso se documentó mediante video-grabación), observándose en los machos comportamientos de *banderilleo* (movimiento de la cola) y *reflejo de flehmen* (retracción de los labios para detectar, mediante el órgano vomeronasal, a hembras receptivas). Por otro lado, las hembras mostraron movimientos de curvatura del cuello hacia abajo y movimientos vigorosos de la cola, comportamientos que confirmaron el celo en los borregos (Soto, 2006).

Estos resultados contrastan con lo registrado por Román (2012) en Isla del Carmen, Baja California Sur, donde encontró una proporción macho:hembra 117:100; en esta isla, los borregos son aprovechados cinegéticamente y no tienen depredadores naturales. Esta proporción no es normal, ya que una mayor población de machos incrementa la competencia por el alimento y el apareamiento, lo cual puede tener consecuencias, como la reducción en la productividad de la población. Skalski (2005) recomienda que una proporción saludable que se aproveche cinegéticamente debe ser mayor a 25:100. En esta investigación las proporciones fueron mayores a lo recomendado, pero manteniéndose en una relación de un macho por cada dos hembras.

La proporción añero:hembra en verano fue la más baja con 35:100, esto es, porque de cada tres hembras observadas, se registraba un añero, y en invierno se obtuvo la proporción más alta 57:100, que coincidió con la estación del año donde se conforman grupos familiares de hembras, corderos y añeros. El registro de añeros es vital en los estudios de borrego cimarrón, ya que es el primer indicador de que las poblaciones se mantienen o están en crecimiento. En poblaciones de borrego cimarrón, donde el registro de añeros es nulo o bajo, se ha documentado que no permanecen y tienden a extinguirse (Wiedmann y Sargeant, 2014).

La proporción añero:hembra en la localidad El Zamora, se incrementó conforme las condiciones ambientales mejoraron, con mayor disponibilidad de agua y alimento. En el período de lluvias fue de 53:100 y postlluvias 70:100, lo que sugiere un mayor reclutamiento y un posible aumento en el tamaño de la población. Resultados similares reporta Lee (2003) para poblaciones que se encuentran en crecimiento en la Sierra de Las Vírgenes en B.C.S.

En Los Hemes, la proporción añero:hembra fue menor en el período de seco, donde se observó un añero por cada tres hembras. Lo anterior sugiere que en esta localidad no existen las condiciones de hábitat, disponibilidad de agua y alimento, que ofrezcan las condiciones para el reclutamiento de borregos cimarrones. Otra explicación, es que Los Hemes es un sitio de tránsito temporal para los borregos, ya que se observaron más individuos adultos de ambos sexos, los cuales tienden a presentar comportamientos exploratorios (Tarango *et al.*, 2002).

## 8.2 Uso de aguajes

La estructura poblacional de los rebaños observados en los aguajes es congruente con lo reportado en otros estudios poblacionales de borrego cimarrón en zonas áridas (Jaeger *et al.*, 1991; Sandoval *et al.*, 2014). Se obtuvo un mayor registro fotográfico de hembras y añeros, y un menor registro de machos, con una proporción macho:hembra de 53:100 lo cual es similar a lo reportado en otras sierras de la Península de Baja California (Lee, 2003; Martínez, 2011), y se confirma que los borregos visitan con mayor frecuencia los aguajes en el período seco.

Los machos clase III y IV posiblemente fueron contados más de una vez, debido a que son capaces de desplazarse a distancias mayores de 30 km (Valdez y Krausman, 1999). En este estudio, la distancia entre los aguajes más distantes, Los Hemes y El Volcán, es de 27 km, por lo tanto, es factible que los machos adultos visiten cualquiera de los cuatro aguajes. El escaso registro de corderos (n= 9) se debe a que en el periodo de seco no son comunes los nacimientos (Rubin *et al.*, 2000).

El tamaño de grupo con mayor frecuencia de observación en los aguajes, fue de un borrego, similar a lo reportado por Tarango (2000) en su investigación del uso del hábitat por esta especie en Sonora, donde menciona que durante el periodo seco los borregos se encuentran segregados, formando grupos pequeños (de uno a tres individuos), como consecuencia de las altas temperaturas y la baja disponibilidad de alimento (Krausman *et al.*, 1999).

Con base en la frecuencia de captura de registros fotográficos, se encontró un mayor número de hembras y añeros en los aguajes El Cordero y El Zamora, lo cual indica que estos sitios son utilizados para la crianza y el reclutamiento, contrastando con lo reportado por Broyles y Cutler (1999),

quienes no encontraron una relación entre el mayor registro de hembras y añeros en los aguajes naturales y artificiales en Arizona. La principal diferencia con los aguajes en Sierra Santa Isabel es que éstos son naturales, y se mantienen intactos, lo cual posiblemente influye en el “comportamiento de fidelidad” por parte de los borregos a los aguajes que conocen por generaciones (Sandoval *et al.*, 2014).

Con base en el total de registros fotográficos, fue evidente la segregación sexual. Los aguajes El Zamora y El Cordero son utilizados en mayor proporción por los grupos de hembras con sus añeros, incluso se registraron grupos de 10 a 15 individuos bebiendo agua. Esta concentración de individuos puede ser un riesgo para la salud de los borregos, ya que en otras localidades con condiciones similares se ha reportado la transmisión de parásitos nematodos que ocasionan enfermedades respiratorias, lo cual puede ser causa de mortandad en los borregos cimarrones (Rogerson *et al.*, 2008). Los aguajes Los Hemes, El Junco y El Volcán, son frecuentados por los machos (n = 42); estos aguajes son importantes porque se localizan en puntos intermedios entre El Zamora y El Cordero, y es posible que sea la ruta de movimiento para que estos busquen a las hembras en la temporada reproductiva.

### 8.3 Selección de terreno de escape

En Sierra Santa Isabel, los borregos seleccionaron las categorías del Índice de Rugosidad del Terreno (IRT), correspondientes a sierras medianas y altas con cañones. En cambio, las categorías de rugosidad baja fueron evitadas en las dos localidades de estudio. Estas diferencias en la selección de la rugosidad del terreno confirman que la distribución del borrego cimarrón se relaciona con la disponibilidad del terreno de escape. Los sitios con mayor rugosidad son más seguros para las hembras y añeros, mientras que los sitios planos, con menor rugosidad, son evitados.

Estos resultados son consistentes con los registrados en la Sierra del Viejo, en Sonora (Tarango, 2000), y en la Sierra del Mechudo, en Baja California Sur (Álvarez-Cárdenas *et al.*, 2001). En los sitios con mayor rugosidad se observó un mayor número de hembras y añeros en comparación con sitios planos o con baja rugosidad. Dichas sierras son similares en topografía y elevación a la Sierra Santa Isabel. En diversos estudios se ha reportado que la disponibilidad de terreno de escape es el principal factor que determina la distribución del borrego cimarrón (Bleich *et al.*, 1997; Bangs *et al.*, 2005; Sappington *et al.*, 2007; Schroeder *et al.*, 2010; Sandoval *et al.*, 2014; Hoglander *et al.*, 2015).

Aunque en este estudio no se realizaron estimaciones poblacionales, la mayoría de las observaciones de borregos cimarrones se presentó en las categorías de mayor rugosidad. Wilson (1968) menciona que a medida en que se incrementa la cobertura rocosa, resulta mayor la probabilidad de avistamiento de borregos. Divine *et al.* (2000) y McKineey y Devos (2003) concluyen que existe una correlación directa entre el tamaño de la población y el terreno de escape disponible. Holl (1982), menciona que existe una correlación lineal entre el terreno de escape disponible y el número de hembras e individuos jóvenes, y propone una fórmula para su cálculo:

$$Y = 161.9 (\log x) - 376.1 \quad (5)$$

Dónde:

$Y$  = Estimación poblacional,  $\log x$  = hectáreas con terreno de escape

Con base en la formula anterior, la población estimada de borrego cimarrón para la localidad El Zamora fue de 158 individuos, con un registro de 162 borregos, estos resultados son similares, aunque cada método tiene sus limitaciones. En Los Hemes no es posible replicar el modelo que propone Holl



(1982), ya que los borregos evitaron los terrenos con mayor rugosidad. En consecuencia, no puede generalizarse que en todos los sitios se encontrará una correlación entre terreno de escape y el tamaño de la población.

#### 8.4 Selección de cobertura vegetal

La selección de los sitios de actividad por el borrego cimarrón varió estacionalmente en relación con la cobertura vegetal. En general, la relación de la cobertura vegetal con la distribución del borrego cimarrón, determinada por el NDVI, se ajusta a la hipótesis de *distribución despótica ideal* (Van Horne, 1983). Los sitios con la mayor disponibilidad de forraje son evitados, y por lo tanto no hay una correlación entre densidad poblacional y abundancia de forraje estimada por medio de NDVI. Otros factores como el terreno de escape y disponibilidad de agua explican la distribución de los rebaños de borregos en esta sierra.

Durante el periodo seco, estos animales seleccionaron los sitios que aparentemente poseen menor disponibilidad de alimento (menor cobertura vegetal de acuerdo con los valores del NDVI), pero con alta rugosidad del terreno, los cuales son más seguros para los borregos (Hansen, 1980; Krausman *et al.*, 1999). Lo anterior sugiere que para el borrego cimarrón, en el periodo seco, es más importante seleccionar sitios que ofrezcan mayor posibilidad para escapar y con buena visibilidad para detectar a los depredadores a distancia, aunque se tenga menor disponibilidad de alimento.

En estudios con otros ungulados, como la zebra (*Equus quagga*) también se reporta un patrón similar, esta especie evita los sitios donde los leones pueden cazarlas fácilmente. Estos resultados son similares a los encontrados en otros estudios de selección del hábitat, donde se reporta que durante el

periodo seco, en los terrenos rugosos y escarpados hay una reducción del forraje disponible (Festa-Bianchet, 1988; Andrew *et al.*, 1999; Hoglander *et al.*, 2015). La presencia de depredadores, como el puma, parece influir en los patrones de selección de cobertura vegetal del borrego cimarrón, de hecho en Sierra Santa Isabel es donde más registros de este depredador se han obtenido en Baja California.

Los resultados que se obtuvieron en esta investigación son consistentes con lo encontrado en otras especies de ungulados silvestres, como el venado bura *Odocoileus hemionus* (Marshall *et al.*, 2006), el tsessebe común, *Damaliscus lunatus* (Bro-Jørgensen *et al.*, 2008), la gacela de Mongolia, *Procapra gutturosa* (Mueller *et al.*, 2008) y el impala *Aepyceros melampus* (VanBommel *et al.*, 2009). Estas especies también dependen de la visibilidad para la detección de sus depredadores y seleccionan hábitats con valores similares de NDVI a los obtenidos en este estudio. No obstante, algunos estudios sobre hábitos alimentarios y preferencias del borrego cimarrón por asociaciones vegetales en zonas áridas, reportan que lluvias ocasionales durante el periodo seco promueven el crecimiento de herbáceas, como *Lupinus excubitus*, *Lotus scoparius*, *Cyperus squarrosus*, *Dalea bicolor* y *Drymaria holosteoides*, preferidas por el borrego cimarrón (Fish y Wildlife Service, 2000; Martínez y Galindo, 2001). No obstante, se ha registrado que durante el periodo seco los borregos prefieren el consumo de suculentas (Warrick y Kraumsan, 1989; Tarango *et al.*, 2002).

Debido a su tamaño y distribución dispersa, las especies de herbáceas y cactáceas no son detectadas por el sensor TM del satélite Landsat, esto fue una limitante del método para investigar aspectos de ecología del forrajeo, e. g. la identificación de especies palatables para el borrego cimarrón.

En la localidad de El Zamora, durante el periodo de lluvias, los rebaños de añeros y hembras seleccionaron la categoría de NDVI alto, lo cual indica una mayor disponibilidad de forraje. Se ha considerado que la disponibilidad de forraje (estimada por NDVI) es el factor que más influye en la distribución espacial del borrego cimarrón durante el periodo de lluvias (Hoglander *et al.*, 2015).

En Los Hemes sucedió lo contrario, los borregos seleccionaron las categorías de baja cobertura y evitaron los sitios con alta cobertura vegetal localizados en sitios planos. Lo anterior contrasta con lo reportado en poblaciones de borrego cimarrón de Sonora, donde los machos durante el periodo de lluvias, seleccionan los sitios con mayor cobertura vegetal en lomeríos y zonas poco escarpadas (Tarango, 2000), lo que aparentemente los expone a sus depredadores. La distribución de los grupos de borrego cimarrón en Los Hemes, se ajusta a la hipótesis de Distribución Despótica Ideal propuesta por Van Horne (1983), donde los borregos no seleccionan los sitios que aparentemente tienen mayor disponibilidad de alimento disponible.

Durante el periodo de postlluvias no se encontró una relación entre la distribución del borrego cimarrón y la cobertura vegetal estimada por NDVI. Esto puede deberse a que el forraje se halla disponible en forma homogénea, y por consiguiente, no hay una selección por alguna de las categorías de NDVI; por ejemplo, la distribución del venado bura en los desiertos de California tras el periodo de lluvias no se correlaciona con una mayor disponibilidad de forraje estimada por el NDVI (Marshal *et al.*, 2006).

La selección que realiza el borrego cimarrón de la cobertura vegetal en Sierra Santa Isabel, no se relacionó con sitios de alta cobertura vegetal, que indican una mayor disponibilidad de alimento. Lo anterior tiene sentido, ya que se ha encontrado que los borregos tienden a evitar sitios con una alta

cobertura, pues obstruye su visibilidad y no permite detectar a sus depredadores en la distancia (Valdez y Krausman, 1999; Tarango *et al.*, 2002).

El NDVI, a diferencia de otros índices, tiene la ventaja de ser compatible con diferentes sensores satelitales, lo que facilita llevar a cabo este tipo de estudios a diferentes escalas (Pettorelli, 2013). Por ejemplo, el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), con píxeles de resolución espacial de 1 km<sup>2</sup>, permite aplicar estas técnicas a escalas geográficas a nivel global. Con otros sensores, como MODIS (resolución de 250 m) o Landsat (resolución de 30m), es posible analizar la selección del hábitat de una especie en un ámbito regional (*e. g.* la sierra de este estudio). Utilizando sensores con mayor resolución espacial, como es QuickBird o GeoEye (resolución 60 cm) sería posible desarrollar este tipo de estudios a escala local.

Esta metodología de evaluación de la preferencia de hábitat por el borrego cimarrón puede replicarse en las diferentes áreas de distribución natural de la especie, debido a la disponibilidad de modelos digitales de elevación provenientes de la misión del transbordador espacial SRTM para Norteamérica (USGS, 2010). La resolución espacial de estos modelos (píxeles de 20 y 30 m) ha sido útil para estudiar el uso-selección del hábitat que realiza el borrego cimarrón en diferentes investigaciones (Bangs *et al.*, 2005; Sappington *et al.*, 2007; Gilad *et al.*, 2013; Villepique *et al.*, 2015). Asimismo, estos modelos y las imágenes de satélite de diferentes sensores se hallan disponibles de forma gratuita ([www.glovis.usgs.gov](http://www.glovis.usgs.gov)) y es posible obtener imágenes históricas de los últimos 25 años, o bien actuales, como las provenientes del sensor OLI (Operational Land Image) a bordo del satélite Landsat 8.

## 9. CONCLUSIONES

La estructura poblacional que se obtuvo por observaciones directas de rebaños de borregos y registros de fototrampeo, confirman que la población de borrego cimarrón en Sierra Santa Isabel se mantiene estable, con una mayor proporción de hembras y añeros.

A pesar de la cercanía entre las dos localidades de estudio, Los Hemes y El Zamora (<10km), el uso de los componentes del hábitat por los borregos fue diferente. En Los Hemes, fue frecuente la observación de adultos, mientras que en el Zamora fue común la observación de añeros y hembras. Por lo tanto, las estrategias de conservación y aprovechamiento, no deben ser generalizadas, sino, que se deben considerar las diferencias espaciales en el uso de los atributos del hábitat en cada localidad.

El aguaje principalmente utilizado en Sierra Santa Isabel es El Zamora, donde se registraron rebaños de hasta 20 individuos. Esto puede hacer vulnerable a la población, debido al riesgo de transmisión de enfermedades, lo cual previamente ha sido reportado en otros aguajes con condiciones similares (Rogerson *et al.*, 2008).

En los aguajes de la Sierra Santa Isabel, el agua tiene condiciones óptimas para ser bebida por el borrego cimarrón y no es recomendable la construcción de nuevos aguajes cercanos a El Zamora y El Cordero, ya que estos son frecuentados por grupos de hembras y añeros, que pueden ser susceptibles a enfermedades transmitidas por otros ungulados nativos y exóticos, que se pueden ver atraídos por un incremento en la disponibilidad de agua (Krausman y Lepold, 1986). También se ha registrado que la competencia intra e interespecífica por el agua, incrementa la población del principal depredador, el puma (Rominger *et al.*, 2004).

Los modelos digitales de elevación (MDE), las técnicas de detección de aguajes, y los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), obtenidos a partir del procesamiento de imágenes de satélite, resultaron ser prácticos y eficientes para determinar los tres componentes vitales del hábitat del borrego cimarrón: terreno de escape, disponibilidad de alimento y agua, a una escala geográfica suficiente para cubrir sierras completas. Estos son los principales factores que se relacionaron con la distribución de los rebaños de borrego cimarrón en Sierra Santa Isabel.

La cobertura vegetal estimada mediante el NDVI explica la distribución de los rebaños de los borregos en la localidad El Zamora. Por su parte, en Los Hemes, se identificó que los sitios con mayor cobertura tienen una mayor disponibilidad de forraje, pero son evitados en todas las temporadas del año, debido a dos factores: 1. se encuentran en lugares planos a una distancia mayor de 500 metros del terreno de escape, y 2. la diversidad de especies vegetales es baja, dominada por las especies de *Fouquieria splendens* (ocotillo), *Agave deserti* (agave), y *Larrea tridentata* (gobernadora), que no son palatables para el borrego cimarrón a lo largo del año.

La detección de cuerpos de agua en el hábitat del borrego cimarrón mediante métodos de percepción remota resultó ser viable, donde los valores altos del NDVI fueron claves para la detección de aguajes.

Los valores altos de NDVI se debieron principalmente a la abundante presencia de plantas que requieren agua de manera permanente, especies como *Brahea armata* (palma azul), *Juncus acutus* (junco), *Typha domingensis* (tule petatero) *Cloracantha spinosa* (mala mujer), *Psorathamnus spinosus* (palo cenizo), *Urtica dioica* (ortiguilla) y *Tamarix ramosissima* (pino salado). En particular, el pino salado y el junco fueron más abundantes en los aguajes de la

región Sur de la Sierra Santa Isabel, que tienen la característica de ser muy alcalinos, pH entre 11-14 (Escobar *et al.*, 2016).

Los aguajes que se ubican en la región norte de la sierra tuvieron los valores más altos de NDVI, lo que se correlaciona con un mayor periodo de lluvias y captación de agua, debido a que colinda con la Sierra San Pedro Mártir, donde la precipitación promedio supera los 200 mm (SMN, 2013). En la región sur de la sierra, se detectaron más aguajes, pero los valores de NDVI y tamaño es menor, lo cual, está relacionado con una escasa precipitación (<100 mm anuales), y a su ubicación dentro del Desierto del Bajo Colorado, que se caracteriza por largos periodos de sequía.

## 9.1 Perspectivas

- En futuros monitoreos aéreos es recomendable incluir en el plan de vuelo las localidades del Zamora y Los Hemes, ya que estas localidades previamente no eran consideradas.
- Para el manejo y conservación del borrego cimarrón en Sierra Santa Isabel es necesario considerar la segregación sexual, *e. g.* en localidades como El Zamora y El Cordero en donde se identificaron sitios de parición y crianza, las medidas de manejo deberán ser enfocadas en mantener o mejorar el reclutamiento, investigar a detalle aspectos de la calidad nutricional y evitar actividades antrópicas como: construcción de cabañas, introducción de ganado y cacería. En otras localidades como los Hemes, las medidas de manejo deberán enfocarse en mantener el corredor natural, evitando la fragmentación por la construcción de caminos.

- Se recomienda continuar con el programa de fototrampeo en los 11 agujajes que utiliza el borrego cimarrón, esta información es vital debido a que también se registran especies simpátricas, como el venado bura, y también es posible determinar la abundancia relativa de los depredadores.
- En los sitios identificados de crianza y reclutamiento, determinar las especies palatables para el borrego cimarrón y la distribución y abundancia de estas plantas mediante índices de vegetación derivados de imágenes obtenidas por vehículos aéreos no tripulados (drones); y posteriormente continuar con la búsqueda de otros sitios potenciales para los eventos reproductivos de los borregos.
- A partir del método de detección de agujajes, se recomienda determinar la distribución de las fuentes de agua disponibles en las sierras colindantes con la sierra Santa Isabel (San Pedro Martir, Santa Rosa, Calamajue, La Asamblea).
- El financiamiento para la rehabilitación y construcción de agujajes, se recomienda que se fundamente en los resultados obtenidos de la detección e identificación de estos, y la fauna que los utiliza.



## 10. LITERATURA CITADA

- Alaniz J., R. Lee. 2001. Bighorn sheep population sampling in Baja California, Mexico. *Desert Bighorn Council Transactions* 45: 138-143.
- Álvarez, T. 1976. Status of desert bighorns in Baja California. *Desert Bighorn Council Transactions* 1:18-21.
- Álvarez-Cárdenas, S., I. Guerrero-Cárdenas, P. Galina-Tessaro, y S. Gallina. 2001. The variables of physical habitat selection by the desert bighorn sheep (*Ovis canadensis weemsii*) in the sierra del Mechudo, Baja California sur, Mexico. *J Arid Environ* 49: 357-374.
- Álvarez-Cárdenas, S., P. Galina-Tessaro, S. Díaz-Castro, I. Guerrero-Cárdenas, A. Castellanos-Vera, y E. Mesa-Zavala. 2009. Evaluación de elementos estructurales del hábitat del borrego cimarrón en la Sierra del Mechudo, Baja California Sur, México. *Trop Conserv Sci* 2:189-203.
- Andrew, N. G., V. C. Bleich, y P. V. August. 1999. Habitat selection by mountain sheep in the Sonoran desert: implications in the United States and Mexico. *California Wildlife Soc Bull* 12:1–17.
- Araujo, M.B., y P. H. Williams. 2000. Selecting areas for species persistence using occurrence data. *Biol Conserv* 96:331-345.
- Bangs, P. D., P. Krausman, K. E. Kundel, y Z. D. Parson. 2005. Habitat use by desert bighorn sheep during lambing. *Eur Jor of Wild Res* 51:178-184.

- Bailey, J. A. 1992. Managing bighorn habitat from a landscape perspective. Biennial symposium of the North American Wild Sheep and Goat Council 8:49-57.
- Bates, W. J., y G. W. Workman. 1983. Desert bighorn habitat utilization in Canyonlands national park. Desert Bighorn Council Transactions 27:25-28.
- Bleich, V. C., R. Ramey, II., y J., Rechel. 1996. Metapopulation Theory and mountain sheep: Implications for conservation. En: D. McCullough (ed.). Metapopulation and wildlife conservation. Island Press. Washington. D. C. EUA. 353-373 p.
- Bleich, V., R. T. Bowyer, y J. D. Wehausen. 1997. Sexual segregation in mountain sheep: resources or predation?. Wild Mon 134:1-50.
- Blumstein, D. T., y E. Fernández-Juricic. 2010. A primer of conservation behavior. Sinauer Associates. Sunderland, Massachusetts. EUA.
- Brewer C. E., V. C. Bleich, J. A. Foster, T. Hosch-Hebdon, D. E. Mcwhirter, E. M. Rominger, M. W. Wagner, y B. P. Wiedmann. 2014. Bighorn sheep: conservation challenges and management strategies for the 21<sup>st</sup> century. Wild sheep working group, western association of fish and wildlife agencies. Cheyenne, Wyoming. EUA.
- Broyles, B., y Cutler, T. L. 1999. Effect of surface water on desert bighorn sheep in the Cabeza Prieta National Wildlife Refuge, southwestern Arizona. Wild Soc Bull 1082-1088.

- Bro-jørgensen, J., M. E. Brown, y N. Pettorelli. 2008. Using the satellite-derived normalized difference vegetation index (NDVI) to explain ranging patterns in a lek-breeding antelope: the importance of scale. *Oecologia* 158:177-182.
- Creech, T. G., C. W., Epps, R. J. Monello, y J. D. Wehausen. 2016. Predicting diet quality and genetic diversity of a desert-adapted ungulate with NDVI. *J Arid Environ* 127: 160-170.
- Dall'Olmo, G., y A. Karnieli. 2002. Monitoring phenological cycles of desert ecosystems using NDVI and LST data derived from NOAA-AVHRR imagery. *Int J Remote Sens* 23:4055-4074.
- Deforge, J. R., S. D. Osterman, D. Toweill, P. Cyrog, y E. M. Barrett. 1993. Helicopter surveys of peninsular bighorn sheep in northern Baja California. *Desert Bighorn Council Transactions* 37:24-28.
- Divine, D. D., D. W. Ebert, y C. L. Douglas. 2000. Examining desert bighorn habitat using 30-m and 100-in elevation data. *Wild Soc Bull* 28:986-992.
- Douglas, C. L., y D. M. Jr. Leslie. 1999. Management of bighorn sheep. En: R. Valdez y P. R. Krausman (eds.). *Mountain sheep of North America*. University of Arizona Press, Tucson. EUA. 238-262 p.
- Dussault, C., J. P., Ouellet, R. Courtois, R., J. Huot, L. Breton, y H. Jolicoeur. 2005. Linking moose habitat selection to limiting factors. *Ecography* 28(5), 619-628.
- Epps, C. W., D. R., Mccullough, J. D., Wehausen, V.C. Bleich, y J. L. Rechel. 2004. Effects of climate change on population persistence of desert-dwelling mountain sheep in California. *Conserv Biol* 18:102-113.

- Festa-Bianchet, M. 1988. Seasonal range selection in bighorn sheep conflicts between forage quality, forage quantity, and predator avoidance. *Oecologia* 75:580-586.
- Forman, R. 1985. *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 632 p.
- Fretwell, S. D., y Jr. H. J. Lucas. 1970. On territorial behaviour and other factors influencing hábitat distribution in birds. *Acta Biotheor.* 19:16-36.
- Gamon, J. A., C. B., Field, M. L. Goulden, K. L., Griffin, A. E. Hartley, J. Geeske, J. Peñuelas, y R. Valentini. 1995. Relationship between NDVI, canopy structure and photosynthesis in three californian vegetation types. *Ecol Appl.* 5:28-41.
- Gilad, O., X. Ben Wu, y F. Armstrong. 2013. Assessing the feasibility for reintroducing desert bighorn sheep to Guadalupe mountains national park: habitat, migration corridors and challenges. *Appl Geo.* 41: 96-104.
- Gilpin, M. E., y D. I. Hanski. 1991. Metapopulation dynamics: Empirical and theoretical investigations. *Biological Journal of the Linnean Society* 42:1-336.
- Gionfriddo, J. P., y P. R., Krausman. 1986. Summer habitat use by mountain sheep. *J Wildl Manag* 331-336.
- González-Abraham, C. P. P. Garcillán, y E. Ezcurra. 2010. Ecorregiones de la Península de Baja California: una síntesis. *Boletín de la sociedad botánica de México* 87:69-82.

- Griffith, B., D. Douglas, N. E., Walsh, D. D., Young, T. R., McCabe, D. E., Rusell, R. G. White, R. D. Cameron, y K. R. Whitten. 2002. The porcupine caribou herd. In: Douglas, D. C. (Eds.). Arctic Refuge Coastal Plain Terrarial Wildlife Summaries. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division, Biological Science Report USGS/BRD/BSR-2002-2001. 8-37 p.
- Guyot, G., y X. F. Gu. 1994. Effect of radiometric corrections on NDVI determined from spot-hvr and landsat TM data. *Remote Sens Environ* 49:169-180.
- Hamel, S., M. Garel, M. Festa-Bianchet, J. M., Gaillard, y S. D. Côté. 2009. Spring Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) predicts annual variation in timing of peak faecal crude protein in mountain ungulates. *J Appl Ecol* 46(3), 582-589.
- Hansen, C. G. 1980. Physical characteristics. En: G. Monson y L. Summer (eds.). *The desert bighorn: its life history, ecology and management*. University of Arizona press. Tucson. EUA. 64-79 p.
- Hoglander, C., B. G. Dickon, S. S. Rosenstock, y J. J. Anderson. 2015. Landscape models of space use by desert bighorn sheep in the Sonoran desert of southwestern Arizona. *J Wildl Manag* 79: 77-91.
- Holl, S. A. 1982. Evaluation of bighorn sheep habitat. *Desert Bighorn Council Transactions* 26:47-49.
- Hutchinson, G. E. 1957. Concluding remarks. *Cold spring Harb. Symp. Quant. Biol* 22: 415-427.

- Jaeger, J. R., J. D. Wehausen, y V. C. Bleich. 1991. Evaluation of time-lapse photography to estimate population parameters. Desert Bighorn Council Transactions 35:5-8
- Jensen, J. R. 2007. Remote sensing of the environment: An Earth Resource Perspective. Segunda edición. Prentice-Hall, Upper Sadle River, New Jersey. EUA. 592 p.
- Justice, C. O., J. R. G. Townshend, B. N. Holben, y E. C. Tucker. 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. Int J Remote Sens 6(8): 1271-1318.
- Kerr, J. T., y M. Ostrovsky. 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. Trends Ecol Evol 18:299-305.
- Krausman, P. R. 1999. Some basic principles of habitat use. Grazing behavior of livestock and wildlife, 85-90.
- Krausman, P. R., A. V. Sandoval, y R. C. Etchberger. 1999. Natural history of desert bighorn sheep. En: Valdez, R., y P. R. Krausman (eds.). Mountain sheep of North America. University of Arizona press. Tucson. EUA. 139-191 p.
- Lee, R. 2003. A review of recent wild sheep surveys in Baja California Sur, México. Desert Bighorn Council Transactions. 47:40-46.
- Lee, R., G. R. Martínez, J. Zatarain, y J. F. Escobar. 2012. Observations of distribution and abundance of bighorn sheep in Baja California, México. Calif Fish and Game 98:51-59.

- Lendrum, P. E., C. R., Anderson, K. L. Monteith, J. A., y R. T. Bowyer. 2014. Relating the movement of a rapidly migrating ungulate to spatiotemporal patterns of forage quality. *Mammalian. Biology-Zeitschrift für Säugetierkunde* 79(6): 369-375.
- Manly, B. F. I., I. Mcdonald, D. Thomas, T. L., Mcdonald, y W. P. Erickson. 2002. Resource selection by animals: statistical design and analysis for field studies. Klumer academic publishers. New York. EUA.
- Martínez, G. R. 2011. Muestreo terrestre y aéreo de la población de borrego cimarrón en Baja California. Estrategia estatal para la conservación y el manejo sustentable del borrego cimarrón en Baja California. Secretaría de protección al ambiente, gobierno de Baja California, México. 24-35 p.
- Martínez-Gallardo, R., y R. Eaton-González. 2008. Estatus de la conservación del borrego cimarrón (*Ovis canadensis*). En: Lorenzo, E. Espinoza y J. Ortega (eds.). Avances en los estudios de los mamíferos de México II. Sociedad mexicana de mastozoología, San Cristóbal de las Casas, Chiapas. México. 661-674 p.
- Marcum, C. L., y Lofstgaarden. 1980. A non-mapping technique for studying habitat preferences. *J Wildl Manag* 44:963-968.
- Marshal, J. P., V. C. BLEICH, P.R. Krausman, M.L. Reed, y N.G. Andrew. 2006. Factors affecting habitat use and distribution of desert mule deer in an arid environment. *Wild Soc Bull* 34:609-619.
- Mckinney, T., S. R., y J. C. Devos Jr. 2003. Gis-based evaluation of escape terrain and desert bighorn sheep populations in Arizona. *Wild Soc Bull* 1229-1236.

- Monson, G., y L. Summer. 1980. The desert bighorn: its life history, ecology and management. The university Arizona press, Tucson. EUA. 370 p.
- Morrison, M. L., B. G., Marcot, y R. W., Mannan. 1992. Wildlife-habitat relationships: concepts and applications. University Wisconsin Press, Madison. EUA. 320 p.
- Mueller, T., K. A. Olson, T. K. Fuller, G. B. Schaller, M. G. Murray, y P. Leimgruber. 2008. In research of forage: predicting dynamic habitats of mongolian gazelles using-satellite-based estimates of vegetation productivity. J Appl Ecol 45:649-658.
- Neigh, C. S. R., C. J. Tucker, y J. R. C. Townshend. 2008. North American vegetation dynamics observed with multiresolution satellite data. Remote Sens Environ 112: 149-1772.
- Neu, C., C. Byers, y J. Peek. 1974. A technique for analysis of utilization availability data. J Wildl Manag 38:541-545.
- Olson, K. A., T. Mueller, S. Bolortsetseg, P. Leimgruber, W. F. Fagan, y T. K. Fuller. 2009. A mega-herd of more than 200,000 Mongolian gazelles, *Procapra gutturosa*: a consequence of habitat quality. Oryx 43(01):149-153.
- Parent, M. B., y D. D. Verbyla. 2010. The browning of Alaska's boreal forest. Remote Sensing 2(12): 2729-2747.
- Purevdorj, T. S., R. Tateishi, T. Ishiyama, y Y. Honda. 1998. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. Int J Remote Sens 19:3519-3535.

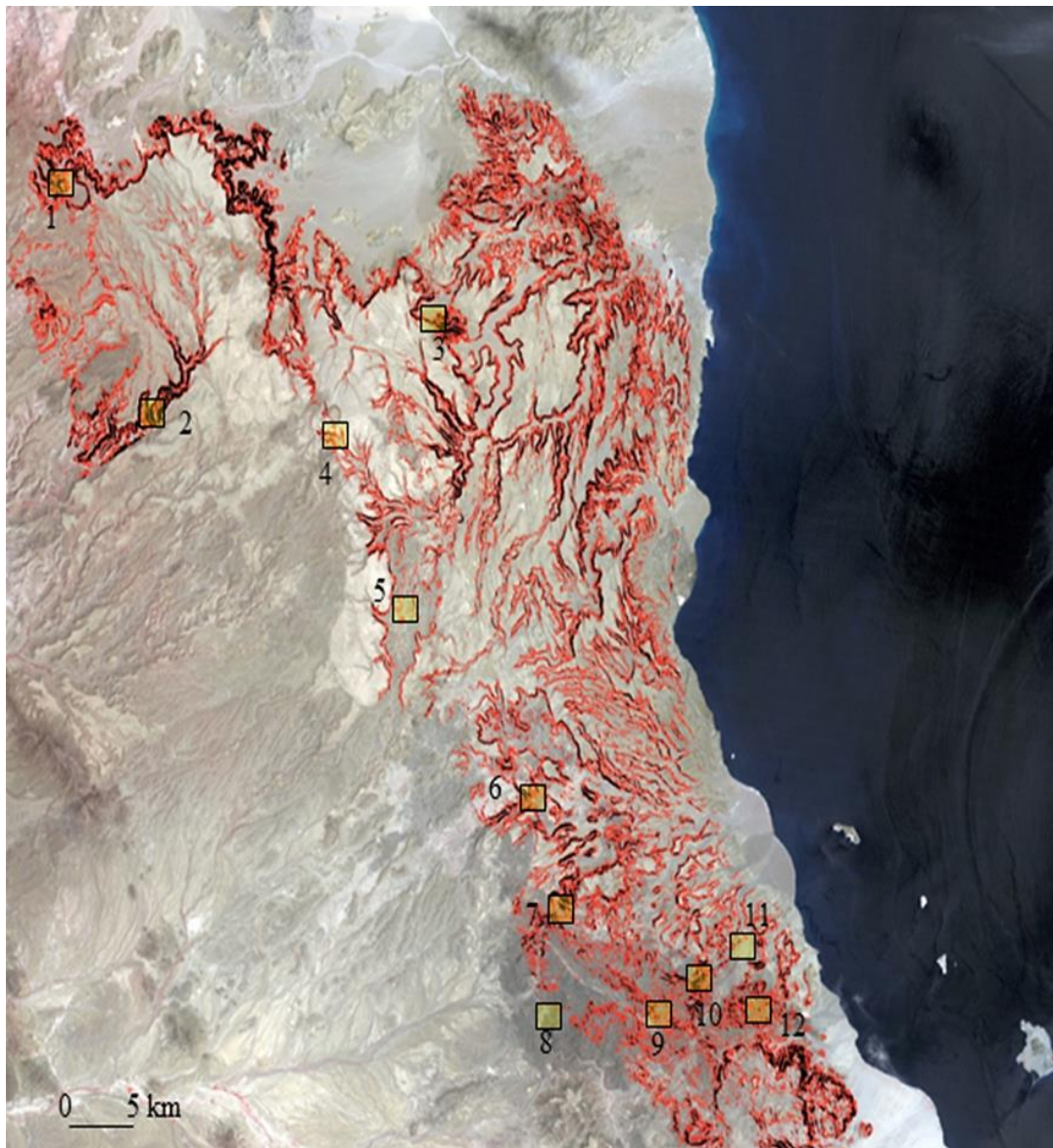


- Pettorelli, N. J. M. Gaillard, A. Mysterud, P. Duncan, N. C. Stenseth, D. Delorme, G. Van Laere, C. Toigo, y F. Klein. 2006. Using a proxy of plant productivity (NDVI) to find key periods for animal performance: the case of roe deer. *Oikos* 112:565-572.
- Pettorelli, N. 2013. The normalized difference vegetation index. Oxford University press, New York. EUA. 194 p.
- Riley, S. J., S. D. Degloria, y R. Elliot. 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences* 5:23-27.
- Risenhoover, K. L, y J.A. Bailey. 1985. Foraging ecology of mountain sheep: implications for habitat management. *J Wildl Manag* 68:993-999.
- Rogerson, J. D., Fairbanks, W. S. y L. Cornicelli. 2008. Ecology of gastropod and bighorn sheep hosts of lungworm on isolated, semiarid mountain ranges in Utah, E.E. U.U. *J Wild Diseases* 44:28-44.
- Rouse, J. W. Hass, R. H., Schell, J. A., D.W. Deering. 1974. Monitoring vegetation systems in The Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth*
- Rominger, E. M., H. A. Whitlaw, D. L., Weybright, W. C. Dunn, y W. B. Ballard. 2004. The influence of mountain lion predation on bighorn sheep translocations. *J Wildl Manag* 68:993-999.
- Rubin, E. S., W. M. Boyce, y V. C. Bleich. 2000. Reproductive strategies of desert bighorn sheep. *J Mammal* 81:769-786.

- Rubin, E. S., C. Stermer, J., Boyce, M.W., y S. G. Torres. 2009. Assessment of predictive habitat models for bighorn sheep in California's Peninsular ranges. *J Wildl Manag* 73(6): 859-869.
- Ryan, S. J., P. C., Cross, J. Winnie, C. Hay, J. Bowers, y W. M. Getz. 2012. The utility of normalized difference vegetation index for predicting african buffalo forage quality. *J Wildl Manag* 76(7): 1499-1508.
- Sandoval, A. V., R. Valdez, y A. T. Espinoza. 2014. El borrego cimarrón en México. En: Valdez, R., y J. A Ortega, (eds.). *Ecología y manejo de fauna silvestre*. Colegio de postgraduados, Texcoco, Estado de México, México. 475-501 p.
- Sappington, J., K. M. Longshore, y D. B. Thompson. 2007. Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: a case study using bighorn sheep in the Mojave Desert. *J Wildl Manag* 71: 1419-1426.
- Schroeder, C. A., R. T. Bowyer, V. C. Bleich, y T. R. Stephenson. 2010. Sexual segregation in Sierra Nevada bighorn sheep *Ovis canadensis sierrae*: ramifications for conservation. *Arctic, Antarctic, Alpine Research*. 42:476-489.
- Sesnie, S. E., B. G. Dickson, S. S. Rosenstock, y J. M. Rundall. 2012. A comparison of landsat tm and modis vegetation indices for estimating forage phenology in desert bighorn sheep (*Ovis canadensis nelsoni*) habitat in the Sonoran desert, E. E. U. U. *Int J Remote Sens* 33: 276-286.

- SMN. 2013. Servicio Meteorológico Nacional. Climatología estadística. Estación 2043 San Agustín, Ensenada, Baja California. Fecha de consulta 12 marzo del 2013. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/diarios/2043.txt>.
- USGS. 2010. U. S. Geological survey. Shuttle radar topography mission, <<http://srtm.usgs.gov/index.php>>. Consultada 12 de febrero del 2012.
- Tarango, L. A. 2000. Desert bighorn sheep in Mexico. Dissertation, University of Arizona, Tucson, EUA.
- Tarango, L. A., P. R. Krausman, R. Valdez, y R. M. Katting. 2002. Research observation: desert bighorn sheep diets in northwestern Sonora, Mexico. *J Range Manag* 55:530-534.
- Valdez, R., y P. R. Krausman. 1999. Description, distribution, and abundance of mountain sheep in North America. En: Valdez, R., y P. R. Krausman (.eds). *Mountain sheep of North America* (University of Arizona Press. Tucson. EUA. 1-22 p.
- VanBommel, F. P., I. Heitkoning, G. F. Epema, S. Ringrose, S. Bonyongo, y E. M. Veenendaal. 2006. Remotely sensed habitat indicators for predicting distribution of impala (*Aepyceros melampus*) in the Okavango delta, Botswana. *J Trop Ecol* 22:101-110.
- Van Horne, B. 1983. Density as a misleading indicator of habitat quality. *J Wildl Manag* 47: 893– 901.
- Villa, B. R. 1959. Brief notes on the present status and distribution of bighorn sheep in Mexico. *Desert Bighorn Council Transactions* 3:77-79.

- Villepique, J. T., B. M. Pierce, V. C. Bleich, A. Andic, y R. T. Bowyer. 2015. Resource selection by an endangered ungulate: a test of predator-induced range abandonment. *Adv Ecol* 2015:1-19.
- Wiedmann, B. P., y G. A. Sargeant. 2014. Ecotypic variation in recruitment of reintroduced bighorn sheep: Implications for translocation. *J Wildl Manag* 78: 394-401.
- Warrick, G. D., y P. R. Krausman. 1989. Barrel cacti consumption by desert bighorn sheep. *Southwestern Naturalist* 34:483-486.
- Wilson, L. O. 1968. Distribution and ecology of the desert bighorn sheep in southeastern Utah. Publication 68-5. Utah division of fish and game, Salt Lake City. EUA,

**ANEXO 2. Archivo fotográfico**

**Figura 19.** Distribución de aguajes temporales y permanentes en Sierra Santa Isabel, Baja California. 1. Matomi, 2. Arroyo Grande, 3. El Canelo, 4. Las Blancas, 5. Los Hemes, 6. El Zamora, 7. La Cascada, 8. El Volcán, 9. El Junco, 10. Agua Verde, 11. Miramar, 12. Las Palmitas.





**Figura 20.** Localidad de Los Hemes. Período seco. Grupo de cinco borregos (2 machos, 2 hembra y un añero) en una ladera donde los valores del NDVI fueron entre 0.01-0.05, que indican suelo desnudo.



**Figura 21.** Localidad El Zamora. Período de lluvias. Dentro del cuadro rojo se observan tres borregos, una hembra y dos añeros, en sitios con valores altos de NDVI = 0.40.



**Figura 22.** Localidad El Zamora. Sitio que los borregos seleccionaron durante el período seco, a pesar de presentar valores bajos de NDVI (0.1-0.14).



**Figura 23.** Localidad El Zamora. Sitio que los borregos seleccionaron durante el período de lluvias. Incrementa la cobertura vegetal, diversidad de especies vegetales y los valores del NDVI (0.35).





**Figura 24.** Localidad de Los Hemes. Sitio con valores altos de NDVI (0.1-0.15) durante el período seco, donde los borregos evitaron su uso.

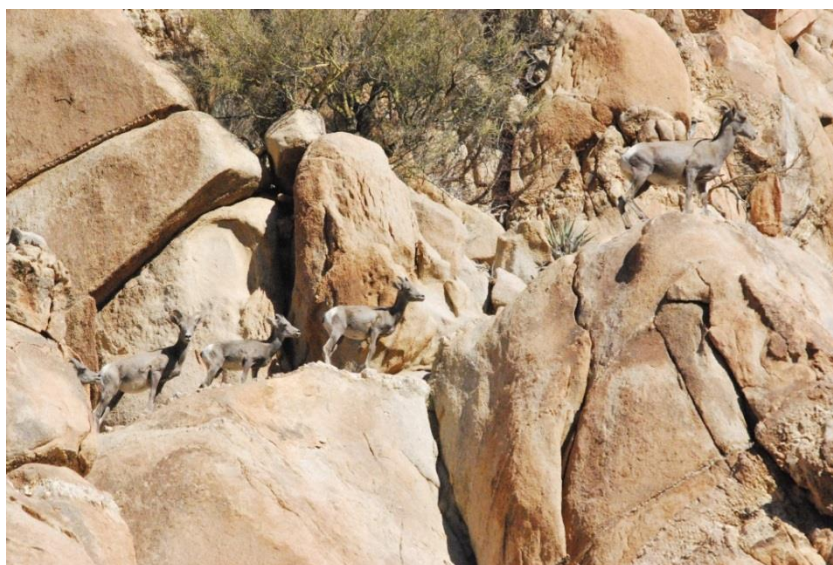


**Figura 25.** Localidad de Los Hemes. Sitio con valores altos de NDVI (0.20-0.25) durante el período de lluvias, los borregos evitaron su uso por presentar categorías de poca y baja rugosidad.





**Figura 26.** Localidad Los Hemes. Grupo de un macho clase III con dos hembras en un sitio con categoría de rugosidad media que fue utilizada en proporción a su disponibilidad.



**Figura 27.** Localidad El Zamora. Grupo de dos hembras adultas y tres añosos en un sitio con alta rugosidad que fue seleccionado.