

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

Facultad de Ciencias Forestales



**EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD
TEMÁTICA DEL MAPA DE SISTEMAS
ECOLÓGICOS DEL SANTUARIO
HISTÓRICO DE MACHUPICCHU**

Tesis para optar el Título de
INGENIERO FORESTAL

DAVID WILFREDO TORRES ESCOBAR

Lima – Perú
2014

DEDICATORIA

A Alexander von Humboldt, Antonio Raimondi,
Augusto Weberbauer y Alwyn Gentry
por la inspiración.

A Kenton Miller, Antonio Brack
y Marc Dourojeanni
por mostrarme el camino.

AGRADECIMIENTOS

Si bien es cierto que dedique un año de mi vida a este proyecto y soy el responsable de su contenido, el trabajo no lo hice solo. Durante todo este tiempo tuve el apoyo moral, técnico y económico de varias instituciones, pero eso sólo fue posible gracias a las personas que ahí trabajan.

Gracias al Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado-Santuario Histórico de Machupicchu (SERNANP-SHM) por financiar el proyecto. Especialmente gracias a la Blga. Ada Castillo Ordinola por confiar en un guardaparque voluntario y darle la oportunidad de alcanzar sus metas. También fue muy importante el apoyo de la Ing. Gysela Ladera Castañeda, la Blga. Liliana Cáceres Vizarreta, la Lic. Angela Oróz Barrientos y el Blgo. Roberto Quispe García, en diferentes etapas y aspectos del proyecto, tanto en Cusco como en Machupicchu.

Si de Machupicchu se trata, es decir del campo en sí, debo mencionar a mi compañero de patrullajes y buen amigo Fabio Chávez, Guardaparque del Santuario y vasto conocedor de su naturaleza. Gracias por enseñarme a caminar por la montaña, Fabio. En el campo también me ayudaron los guardaparques Yolanda, Jorge, Viller, David, Vicente, Justiniani, entre otros. Fue porque trabajé y viví con todos ellos durante meses, que ahora puedo tener la satisfacción de conocer el Santuario.

Gracias a la Sociedad Zoológica de Frankfurt (SZF) por financiar el taller de capacitación que formó parte de este proyecto; también al Ing. Antonio Tovar y al Ing. Fernando Regal por su participación en el taller y por sus recomendaciones.

La profesora Ing. Ethel Rubin de Celis tuvo mucho que ver en la elaboración de este proyecto, pues fue ella quien, luego de revisar las diversas propuestas que le presente, sugirió algunos ajustes y decidió que estaba listo. Por eso profe, muchas gracias.

Porque con amigos siempre es mejor, agradezco a Jano De Rutte Corzo y a Marco Bustamante Yupanqui por apoyarme en el trabajo de campo, incluso sabiendo que al hacerlo a veces no comeríamos muy bien, que las mochilas iban a estar pesadas, que todo se haría caminando y otras cosas más que ni sabíamos que pasarían. En realidad, hacer juntos este

tipo de cosas no es algo nuevo para nosotros pero creo que esta vez fue especial, por eso, muchas gracias *waiqis*. Muchas gracias también Blanca Ponce Vigo porque siempre tuviste tiempo para ayudarme con los trámites en Lima, séabía que podía contar contigo.

De modo muy especial, debo agradecer a Berta Escobar Arroyo, Wilfredo Torres Aranda, Patricia Torres Escobar y Martin Torres Escobar, mi familia, por la confianza, el apoyo y la paciencia que tuvieron durante la ejecución de este proyecto. Por eso y por mucho más, los quiero.

Finalmente, *merci* Anne Chebet, *munaycha*, por tolerar las varias semanas de ausencia y los muchos días y noches que pase encerrado leyendo y/o escribiendo. Porque a pesar de eso, disfrutamos el viaje e intentamos sacar esto adelante juntos y *ensemble* seguiremos intentando. Por eso guapa, muchas veces, muchas gracias.

RESUMEN

Uno de los insumos más importantes para definir estrategias de manejo y de conservación de los recursos naturales son los mapas temáticos. Sin embargo, antes de ser utilizados para tomar decisiones, los mapas deben ser evaluados para conocer su confiabilidad. Del mapa de Ecosistemas de los Andes Tropicales, que cubre una extensión de 1 542 644 km² y fue elaborado a una escala de trabajo de 1/250 000, se extrajo la parte correspondiente a los 380 km² del Santuario Histórico de Machupicchu, generándose así un mapa base para su validación. La información generada a partir de la evaluación de campo fue ordenada en una matriz de confusión para calcular la confiabilidad temática del mapa base. Se obtuvo que existe una correspondencia moderada, cercana a fuerte, entre lo representado en el mapa con la realidad (índice de Kappa = 0.72); luego, mediante interpretación visual de imágenes satelitales de alta resolución se ajustó el mapa con una escala de trabajo de 1/10 000, de esta forma un sistema ecológico propuesto en el mapa evaluado fue descartado y los límites de los que sí ocurren fueron ajustados a la realidad del Santuario. Finalmente, se obtuvo 12 sistemas ecológicos, 11 de orden natural y 1 modificado por el hombre, el 41% son de tipo bosque, el 44% de tipo pajonal, el 10% nival y el 5% restante corresponde a las áreas intervenidas.

Palabras clave: Andes Tropicales, Santuario Histórico de Machupicchu, sistemas ecológicos, confiabilidad temática de mapas, matriz de confusión, índice de kappa.

ABSTRAC

One of the most important tools to define strategies for management and conservation of natural resources are the thematic maps. However, before being used to make decisions, the maps should be assessed to establish their accuracy. From the Ecosystem Tropical Andes map, which covers an area of 1 542 644 km² and was prepared to a work scale of 1/250 000, the part corresponding to the 380 km² of Machupicchu Historic Sanctuary was extracted, generating a base map of their assessment. The information generated from the field work was ordered in an Error Matrix for calculating the thematic accuracy of the base map. It was found that there is a moderate correspondence, nearby strong, between what is represented on the map with reality (Kappa index = 0.72); then, by visual interpretation of high-resolution satellite images the map was adjusted with a work scale of 1/10 000, thus an ecological system initially proposed in the assessed map was discarded and the limits that do occur were adjusted to the reality of the Sanctuary. Finally, 12 ecological systems was obtained, 11 natural and 1 man-modified, 41% are forest type, 44% grassland type, 10 % nival and the remaining 5% corresponds to the modified areas.

Key words: Tropical Andes, Machupicchu Historic Sanctuary, ecological systems, thematic map accuracy assessment, error matrix, and Kappa index.

RÉSUMÉ

Les cartes thématiques sont un des facteurs de production les plus importants pour définir les stratégies de manœuvre et de conservation des ressources naturelles. Cependant, avant d'être utilisées pour prendre des décisions, les cartes doivent être évaluées pour connaître leur fiabilité. De la carte des Écosystèmes des Andes Tropicales, qui couvre une étendue de 1 542 644 km² et qui a été élaborée avec une échelle de travail de 1/250 000, a été extraite la partie correspondante aux 380 km² du Sanctuaire Historique du Machupicchu, générant une carte de base pour sa validation. L'information générée à partir de l'évaluation de terrain a été ordonnée dans une matrice de confusion pour calculer la fiabilité thématique de la carte de base. Il résulte qu'il existe une correspondance modérée, proche de forte, entre la représentation sur la carte et la réalité (indice de Kappa = 0,72); ensuite, grâce à l'interprétation visuelle des images satellites de haute résolution, la carte a été ajustée avec une échelle de travail de 1/10 000, ainsi le système écologique proposé sur la carte évaluée a été écarté et les limites de ceux qui ont changé, ont été ajustés à la réalité du Sanctuaire. Finalement, on obtient 12 Systèmes Écologiques, 11 étant d'ordre naturel et 01 modifié par l'homme, 41% sont de type forêt, 44% de type pajonal, 10% nival et les 5% restants correspondent aux zones modifiées.

Mots clés: Andes Tropicales, Sanctuaire Historique du Machupicchu, systèmes écologiques, fiabilité thématique des cartes, matrice de confusion, indice de kappa.

ÍNDICE

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VII
ÍNDICE	X
LISTA DE CUADROS.....	XII
LISTA DE FIGURAS	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Evaluación de la confiabilidad de mapas	3
2.1.1 Antecedentes	3
2.1.2 Confiabilidad temática	4
2.1.3 Fuentes de error en una clasificación temática	6
2.1.4 Diseño de muestreo.....	7
2.1.5 Levantamiento de la información.....	14
2.1.6 Análisis de la información	16
2.2 Sistemas ecológicos.....	21
2.2.1 Antecedentes	21
2.2.2 Clasificación.....	24
2.2.3 Mapeo.....	28
2.2.4 Verificación.....	34
2.2.5 Aplicaciones	35
2.3 El Santuario Histórico de Machupicchu.....	38
2.3.1 Base legal	38
2.3.2 Antecedentes	39
2.3.3 Diversidad biológica.....	42
2.3.4 Diversidad ecológica.....	47
3. MATERIALES Y MÉTODOS	51
3.1 Área de estudio	51
3.1.1 Ubicación y extensión.....	51
3.1.2 Características biofísicas.....	52
3.2 Materiales y equipos.....	53
3.2.1 De campo	53
3.2.2 De gabinete.....	53
3.3 Metodología	54

3.3.1	Definición de objetivos	55
3.3.2	Recopilación bibliográfica y cartográfica	55
3.3.3	Planificación del trabajo de campo.....	55
3.3.4	Trabajo de campo.....	60
3.3.5	Procesamiento de información	61
3.3.6	Interpretación visual.....	62
3.3.7	Descripción de unidades	62
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
4.1	Confiabilidad temática	64
4.2	Sistemas ecológicos del Santuario Histórico de Macchupicchu.....	68
5.	CONCLUSIONES.....	72
6.	RECOMENDACIONES	73
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXO 1	Comparación de la biodiversidad entre el Perú y el SHM	82
ANEXO 2	Diversidad zoológica del SHM	82
ANEXO 3	Diversidad florística del SHM.....	83
ANEXO 4	Clasificación de zonas de vida en el SHM.....	84
ANEXO 5	Pisos ecológicos del SHM	85
ANEXO 6	Cobertura vegetal del SHM.....	86
ANEXO 7	Ficha de evaluación	87
ANEXO 8	Descripción de los sistemas ecológicos del SHM	88
ANEXO 9	Fotografías de los sistemas ecológicos del SHM.....	97

Lista de cuadros

CUADRO 1: Ventajas y desventajas de los principales métodos de muestreo.	12
CUADRO 2: Matriz de confusión en proporción.	20
CUADRO 3: Ventajas y/o utilidades de los sistemas ecológicos terrestres.....	36
CUADRO 4: problemática ambiental del santuario histórico de machupicchu.....	40
CUADRO 5: Mapa base.	58
CUADRO 6: Distribución de los puntos de evaluación.	60
CUADRO 7: Distribución de fichas evaluadas en campo.	65
CUADRO 8: Matriz de confusión de los puntos evaluados en campo.	67
CUADRO 9: sistemas ecológicos del Santuario Histórico de Machupicchu.	70

Lista de figuras

FIGURA 1: acumulación de fuentes de error en un proyecto de teledetección.....	6
FIGURA 2: Ecosistemas como meta de conservación.	23
FIGURA 3: Divisiones ecológicas usadas en la organización de los sistemas ecológicos.	28
FIGURA 4: Enfoque de estratificación biofísico.....	31
FIGURA 5: clases de elevación y macroforma para sur américa.	31
FIGURA 6: geología y bioclima de sur américa.....	32
FIGURA 7: cobertura del suelo de sur américa.	32
FIGURA 8: Sistemas ecológicos terrestres de sur américa.	33
FIGURA 9: Mapa de ubicación del Santuario Histórico de Machupicchu.	51
FIGURA 10: Esquema metodológico.	54
FIGURA 11: Mapa base.	57
FIGURA 12: Distribución de los puntos de muestreo.	59
FIGURA 13: Esquema de interpretación visual.	63
FIGURA 14: Distribución de los puntos evaluados.	66
FIGURA 15: Mapa de sistemas ecológicos del Santuario Histórico de Machupicchu.	71

1. INTRODUCCIÓN

UICN (1980) estableció que los principales objetivos de la conservación de los recursos vivos son: mantener los procesos ecológicos esenciales y los sistemas vitales; preservar la diversidad genética; y asegurar el aprovechamiento sostenido de las especies y de los ecosistemas.

La Evaluación Ecosistémica del Milenio, en el 2005, ha determinado que durante los últimos cincuenta años, los humanos han alterado los ecosistemas del mundo más que en cualquier otro periodo de la historia. Veinte a setenta por ciento del área de 11 de los 13 biomas terrestres evaluados han sido convertidos a usos humanos (MA, 2005).

El objetivo de la clasificación de los Sistemas Ecológicos y sus mapas derivados es proporcionar a los administradores de recursos naturales información exhaustiva sobre los ecosistemas a escala local. La idea de interrelacionar las comunidades de vegetación existentes en base a la similitud de sus entorno biofísico, gradientes ambientales y/o procesos dinámicos, tiende a producir interpretaciones más realistas de un determinado paisaje que otros muchos tipos de clasificación de la vegetación (Josse *et al.* 2011).

El mapa de los Ecosistemas de los Andes y la información que este ofrece, son un producto que puede y debe ser mejorado con el fin de tener una herramienta lo más ajustada posible que permita a los diferentes actores analizar el estado de los ecosistemas y tomar medidas de conservación basadas en la mejor información disponible (Josse *et al.* 2009). Según Swenson *et al.* (2012) a pesar del aumento en la escala espacial que proveen los mapas de Sistemas Ecológicos, se necesitan trabajos enfocados en refinar esta información de biodiversidad a resoluciones más detalladas (ej. 1:100 000) y niveles de confiabilidad aún mayores.

Miller (1980) considera que un ecosistema está completo cuando sus partes componentes están presentes en las relaciones adecuadas con el medio ambiente y con cada una de ellas. Así entonces, dos problemas resultan evidentes a la hora de evaluar la representatividad ecológica global de la Áreas Protegidas: primero, hay muy poco acuerdo universal sobre un sistema de clasificación de las unidades bióticas del mundo y, segundo, es necesario trabajar en una escala

representativa en la que es difícil o imposible demostrar, de forma correcta, los límites de los parques nacionales y los tipos bióticos.

Durante los años 2004-2007 el Proyecto Andes-Amazonas, conducido por NatureServe, tuvo como uno de sus resultados la publicación del mapa de Ecosistemas de los Andes Tropicales, con su respectiva memoria descriptiva. El Ministerio del Ambiente del Perú, en el 2010, publicó de forma oficial el mapa de Ecosistemas Andinos, que no es sino la extracción de lo que le correspondía al Perú en el mapa antes mencionado, como miembro de la Comunidad Andina de Naciones. Toda esta información, disponible en internet, fue utilizada para ejecutar la presente investigación.

Por su parte, y con los mismos insumos, el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado se ha propuesto evaluar la representatividad ecológica del Sistema de Áreas Protegidas a nivel ecosistémico. El Santuario Histórico de Machupicchu, es un Área Protegida ubicada en la porción geográfica de los Andes considerada como la más biodiversa del planeta por su riqueza de especies, alto endemismo y fuerte amenaza (Myers *et al.* 2000).

De forma general Machupicchu como escenario natural está integrado por bosques, punas, humedales, lagunas, glaciares, infraestructura urbano/rural y aquellas zonas adyacentes que mantienen producción agropecuaria; muchos de estos ambientes son muy frágiles y contienen una biodiversidad caracterizada por su alto grado de singularidad y rareza. Sin embargo, para manejar un Área Protegida es necesario que esta información general sea estudiada y presentada como una aproximación detallada (en un mapa) de la complejidad natural existente.

En ese contexto, con este trabajo se busca aportar información práctica relacionada a la aplicación de la clasificación de sistemas ecológicos en las Áreas Protegidas del Perú, a partir de la generación de una herramienta para la toma de decisiones en la gestión del Santuario Histórico de Machupicchu. Para ello, se extrajo del mapa de Ecosistemas de los Andes Tropicales de Josse *et al.* (2009) la parte correspondiente al Santuario con el objetivo de evaluar la confiabilidad temática del mapa base así obtenido y luego ajustarlo para elaborar el mapa final de Sistemas Ecológicos del Santuario Histórico de Machupicchu.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Evaluación de la confiabilidad de mapas

2.1.1 Antecedentes

Desde que la primera fotografía aérea fue tomada en 1858, la colección de información para la elaboración de mapas a partir de teledetección ha suplantado a las observaciones de campo. Sin embargo, nunca hay una correlación completa entre la variación en la información tomada por teledetección y la existente en la superficie de la tierra (Congalton y Green, 2009).

Según Congalton y Green (1993) la necesidad de evaluar la confiabilidad de la información obtenida por teledetección se vuelve más continua y el tema está recibiendo más interés cada año. Esto no siempre ha sido así. Históricamente, la evaluación de la confiabilidad fue una idea de último momento y con frecuencia hecha de manera desordenada. Muchas veces la evaluación era de carácter puramente cualitativo y logrado solamente visitando algunas zonas para determinar si la clasificación “se ve bien”.

Foody (2002) describe dos tipos de evaluación de la confiabilidad de mapas: posicional y temática. La primera tiene que ver con la precisión en la ubicación de los objetos mapeados y mide que tan lejos están éstos de su verdadera o respectiva ubicación en el terreno; mientras que la temática tiene que ver con los atributos o características descritas para las categorías del mapa y mide si dichas características son diferentes a las encontradas en campo.

Según Chuvieco (2010) la vía más adecuada para verificar mapas es seleccionar una serie de muestras independientes, no utilizadas en la obtención de los resultados, que permitan generar una medida estadísticamente más sólida del acuerdo entre imagen y verdad-terreno. Lógicamente, la selección y recolección de esas muestras supone un costo adicional al proyecto, que no repercute en una mejora de su fiabilidad, sino sólo en la medida de ésta.

Para Mas *et al.* (2003) los resultados de la evaluación de la confiabilidad están reportados de manera muy heterogénea en la literatura. Además, los autores utilizan diferentes índices que vuelven las comparaciones entre estos estudios aún más difíciles. Algunos sugieren la estandarización del método de evaluación; sin embargo, Foody (2002) argumenta que sería perjudicial imponer un esquema único de evaluación y de reporte de los resultados, ya que los objetivos de la cartografía y de la evaluación de la confiabilidad, así como las condiciones en las que se llevan a cabo, pueden ser muy distintas.

2.1.2 Confiabilidad temática

Para Congalton (2001) la confiabilidad temática se refiere a la confiabilidad de una categoría mapeada en un momento determinado comparado con lo que realmente hay en el campo en ese momento. Para ejecutar una significativa evaluación de la confiabilidad temática, los mapas deben ser evaluados usando información correcta o que se asume como correcta. Por lo tanto, es vital tener al menos algún conocimiento de la confiabilidad de la información de referencia antes de usarla.

Mas y Couturier (2011) agregan que en la confrontación entre las clases cartografiadas y las clases determinadas en las fotografías aéreas o en el campo para los sitios de verificación, se supone que la información de referencia es altamente confiable y representa “la verdad”, por lo que esta confrontación permite evaluar la fiabilidad del mapa y conocer las confusiones que presenta.

Según Foody (2002) en los mapas temáticos a partir de teledetección, el término confiabilidad es usado típicamente para expresar el grado de “exactitud” de un mapa o clasificación. Un mapa temático y su clasificación deben ser considerados confiables si proveen una representación sin sesgos de la cobertura terrestre de la región que representa.

Congalton y Green (2009), dividen la historia de la evaluación de la confiabilidad temática en cuatro épocas. Inicialmente, no se realizaba evaluación más bien la simple apreciación de “se ve bien” prevalecía.

La segunda época es llamada la de la evaluación no espacial, que según Chuvieco (2010) en el mejor de los casos nos ofrece el grado de ajuste entre las dos fuentes (teledetección y fuente estadística), pero no informa sobre dónde se presentan los errores. En otras palabras, esta medida sólo indica el porcentaje de error, pero no su localización sobre el mapa.

En la tercera época, la de la evaluación espacial, lugares sobre el terreno son comparados con las mismas locaciones en el mapa y con su valor de fiabilidad global. El resultado nos permite conocer no sólo el grado global de acierto, sino también entre qué categorías se producen las confusiones, facilitando una reflexión sobre la leyenda elegida o el método empleado. Adicionalmente, los valores de error pueden utilizarse para corregir las estimaciones de superficies asignadas a cada tipo de cobertura.

La cuarta época de la evaluación de la confiabilidad, en la que actualmente nos encontramos, puede llamarse la de la matriz de confusión. Aquí se comparan la información de referencia con la información del mapa para un número determinado de muestras. Stehman and Czaplewski (1998) presentan los fundamentos principales de la evaluación de la confiabilidad temática de mapas, y dividen el proceso en tres etapas:

- El muestreo, que consiste en la selección de los sitios de verificación.
- La evaluación del sitio de verificación, que permite obtener las clases correspondientes a cada sitio.
- El análisis de los datos, que consiste generalmente en la elaboración de una matriz de confusión y el cálculo de índices de fiabilidad.

Según Stehman (2001) en la evaluación de la fiabilidad cartográfica, un problema crucial es la conciliación de los requisitos estadísticos que permiten una evaluación objetiva y científicamente defendible con las consideraciones logísticas que toman en cuenta los problemas de costo y de acceso para recolectar la información de los sitios de verificación.

Foody (2002) indica que el umbral crítico para una confiabilidad temática aceptable es 80%, sin embargo, Sayre *et al.* (2008) afirman que existen varias experiencias que no ratifican eso, sobre todo cuando se trata de mapas ecológicos o de vegetación. La complejidad de las variables utilizadas en este tipo de mapas hace que los procesos de verificación de diferentes

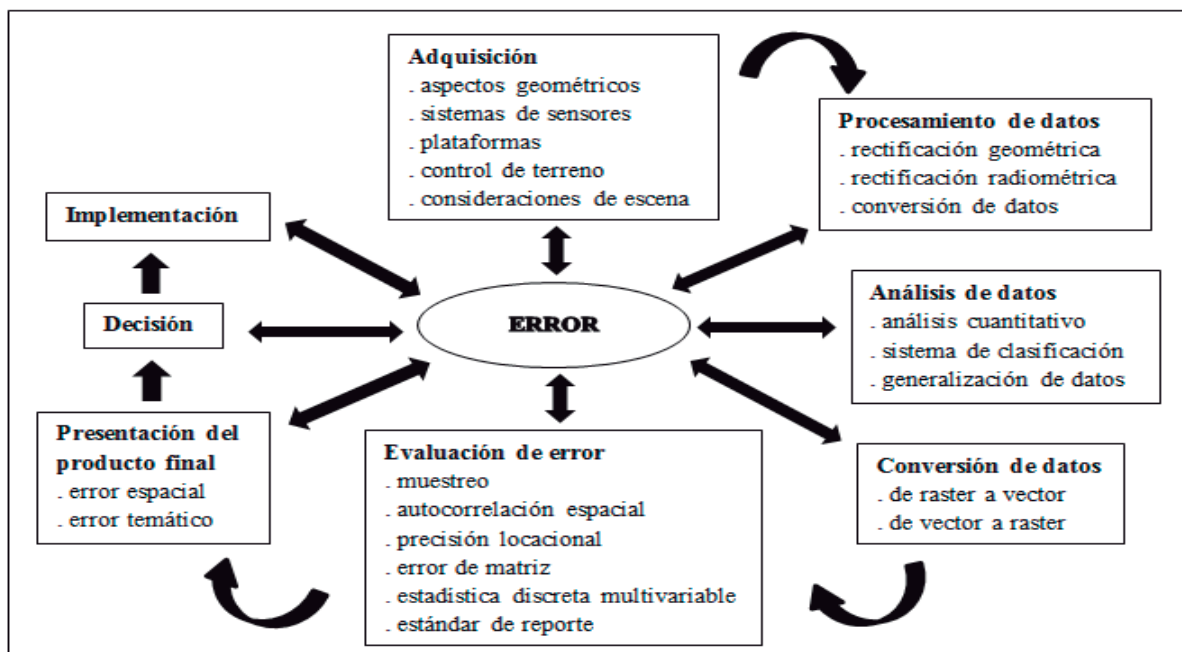
proyectos hayan arrojado valores confiabilidad más bien cercanos a 40 y 50% (Ejm. Josse *et al.* 2007).

2.1.3 Fuentes de error en una clasificación temática

Congalton y Green (2009) afirman que son muchos los criterios a tomar en cuenta, los análisis y las interpretaciones requeridas para convertir la información obtenida mediante teledetección en mapas y, como consecuencia, pueden ocurrir errores durante los diversos pasos de cualquier proyecto de mapeo.

Según Mas *et al.* (2003) existen dos tipos de error en los mapas o en las imágenes clasificadas, los errores temáticos, que se refieren a errores de atributo (etiqueta), y los errores geométricos (de posición) en la delimitación de los polígonos o la ubicación de los píxeles. Estos dos tipos de error están estrechamente ligados y es difícil separarlos. Un tercer tipo de error potencial, se le atribuye a la heterogeneidad dentro de un polígono. Para Congalton (2001), no es posible determinar qué componente del proceso contribuye más al error y cuál es el de más fácil corrección (ver figura 01).

Figura 1: Acumulación de fuentes de error en un proyecto de teledetección.



Fuente: Adaptado de Congalton (2001).

Por su parte Chuvieco (2010) menciona que las distintas variables que conviene tener en cuenta a la hora de valorar los errores estimados en el proceso de verificación son: las características del sensor, que quizás no ofrezca la resolución necesaria para esa determinada aplicación; el método de trabajo, que puede no ser capaz de extraer toda la información contenida en la imagen; la propia complejidad del área de estudio; y, finalmente, los propios errores del proceso de verificación, que lleven a una estimación poco certera del error realmente presente en la imagen.

2.1.4 Diseño de muestreo

Según Mas *et al.* (2003) el diseño de muestreo contempla la determinación del tipo de unidades de muestreo, del método de selección de las mismas, así como del número de unidades de muestreo necesarias. El diseño de un muestreo estadístico tiene como objetivo seleccionar las muestras que representan a cada sub-población y en su conjunto a la población de interés.

Congalton y Green (2009) afirman que el diseño efectivo y eficiente de un muestreo para coleccionar referencia valida e información para evaluar la confiabilidad del mapa es uno de los componentes más importantes y a la vez más difíciles en cualquier proyecto de verificación, porque el diseño determinará el costo y el rigor estadístico de la evaluación.

Según Chuvieco (2010) el muestreo sirve en este caso para seleccionar una pequeña parte del área de estudio, de forma tal que sea suficientemente representativa del conjunto. Un buen muestreo sería aquel que permita extraer la mejor estimación posible de la variable objetivo con el menor tamaño de muestra posible.

Stehman (1999) señala que el diseño de muestreo debe estar relacionado con los objetivos y con los recursos disponibles para la evaluación. Los criterios que deben considerar al planificar el diseño de muestreo son que la muestra debe: i) satisfacer el protocolo de un muestreo probabilístico; ii) ser simple de implementar y analizar; iii) tener poco desacuerdo en los estimadores claves de la evaluación; iv) permitir una adecuada estimación de la varianza; v) ser espacialmente bien distribuido; y vi) ser costo efectivo.

Para Congalton y Green (2009) el muestreo para la verificación del mapa va a estar en función de cómo están distribuidas las clases temáticas. La distribución, a su vez, estará determinada por cómo se elijan y categoricen las características del terreno a mapear, es decir, por el esquema de la clasificación. Este esquema hace posible que quien produzca un mapa pueda caracterizar el paisaje y que el usuario lo entienda. Sin una expresa definición de las clases como unidades cuantificables, puede haber poco acuerdo en qué área caracterizar y cómo.

Los autores afirman que es crítico que la información para evaluar la confiabilidad temática sea colectada y caracterizada usando el mismo esquema de clasificación que se usó para generar el mapa. Si no se cuenta con un riguroso esquema de clasificación antes de iniciar el mapeo, entonces cualquier posterior evaluación de confiabilidad será inútil porque será imposible definir las características de las unidades de muestreo. Además, mencionan que el esquema de la clasificación debe especificar la unidad mínima de mapeo.

A pesar de que la estadística clásica recomienda aplicar el muestreo aleatorio, por razones de tiempo y costo, uno de los métodos más usados es el aleatorio estratificado ya que Stehman (1996, 1999 y 2000) o Plourde y Congalton (2003) han comprobado su efectividad en la generación de resultados estadísticos válidos para distribuciones multinomiales.

a) Distribución de la información

El muestreo debe considerar si se trata de una variable discreta o continua, y cómo se distribuye esa variable en el espacio. En cuanto al tipo de variables, en verificación de clasificaciones temáticas se tiene que manejar técnicas estadísticas aptas para variables nominales. En consecuencia, el muestreo se basa sobre distribuciones categóricas, siendo la más frecuente la binomial (acierto/error). Por el contrario, cuando se pretenda verificar una variable continua el muestreo debe basarse en distribuciones continuas, como la normal o la de Poisson (Chuvieco, 2010).

Por su parte Congalton (1991) menciona que la mayoría de análisis estadísticos asumen que la población a ser muestreada es continua, se distribuye normalmente y que las muestras son independientes. Sin embargo, sabemos que los sistemas de clasificación, usualmente toman

un paisaje continuo y lo dividen arbitrariamente en categorías discretas. Así, la información de mapas temáticos es discreta, no continua, y frecuentemente no se distribuye normalmente.

Para Congalton y Green (2009) las técnicas estadísticas que asumen una distribución normal y continua pueden ser inapropiadas para la evaluación de la confiabilidad de mapas. En la mayoría de casos, un balance entre lo que es estadísticamente válido y lo que es práctico en la realidad es deseable. Por lo tanto, tener conocimientos de estas consideraciones estadísticas es una necesidad, afirman.

Los mismos autores señalan que la distribución binomial o la aproximación normal de la distribución binomial es apropiada para calcular el tamaño de la muestra de determinada confiabilidad global o la confiabilidad de cierta categoría. Es apropiada en la situación en la que sólo el acierto o desacierto son importantes.

Si bien es cierto que varios proyectos de validación realizados en Perú, como MINAM (2009 y 2012) han utilizado la distribución binomial, basándose en lo recomendado por Chuvieco (2010), para determinar la cantidad de muestras. Congalton y Green (2009) han demostrado que la distribución multinomial provee la ecuación más apropiada para determinar el tamaño de la muestra requerido para generar una matriz de confusión.

b) Unidad de muestreo

Stehman y Czaplewski (1998) mencionan que la unidad de muestreo es el lazo entre la ubicación de una característica en el mapa y su correspondiente ubicación en el terreno, es decir, sirve para comparar la clasificación del mapa con la información de referencia. También, mencionan que existen dos tipos de unidades de muestreo: el punto y el área.

Para Congalton y Green (2009) la unidad de muestreo hace referencia al elemento sobre el que se extraerá la información de referencia para compararla con los resultados. Hay cuatro posibilidades de unidades de muestreo a considerarse: un píxel, un grupo de píxeles (suele ser una ventana de 3 x 3 píxeles), un polígono, y un grupo de polígonos. Sin embargo, según Chuvieco (2010) si el mapa a ser evaluado es de polígonos, entonces las unidades de muestreo usadas en la verificación deben ser polígonos.

Según Mas *et al.* (2003) la unidad de muestreo permite relacionar la localización de la información del mapa y del terreno. Puede ser un punto, un píxel, un grupo de píxeles, un polígono del mapa o una unidad de superficie con formas predeterminadas, por ejemplo, un cuadrado o un círculo de una hectárea; su elección depende mucho de los objetivos de la evaluación, del proceso de mapeo, de la estructura del paisaje y de las categorías que más le interesen al usuario.

McCoy (2005) afirma que los principales temas a tener en cuenta para establecer el tamaño de una unidad de muestreo son la variabilidad del terreno y la resolución espacial de la imagen. Justice y Townshend (1981), citados por McCoy (2005), sugieren una fórmula práctica para determinar el área de una unidad de muestreo:

$$A = P(1 + 2L) \quad (\text{Ec. 01})$$

Donde A es la dimensión mínima de la unidad de muestreo, P es la dimensión del píxel y L es la precisión de ubicación estimada en número de píxeles.

c) Método de muestreo

Según Mas *et al.* (2003) el muestreo sirve para seleccionar una pequeña muestra del área cartografiada, de tal forma que sea representativa de la totalidad del mapa. Mas y Couturier (2011) afirman que la evaluación con diseño probabilístico es la única con validez estadística en materia de medición de confiabilidad de un mapa. En un diseño de muestreo probabilístico, todas las unidades de muestreo presentes en el mapa tienen una probabilidad conocida superior a cero de ser seleccionadas, a esta probabilidad de selección se le denomina probabilidad de inclusión.

Para Chuvieco (2010), y la mayoría de autores, los esquemas más regularmente empleados en el proceso de verificación son:

- **Aleatorio simple:** los elementos a verificar se eligen de tal forma, que todos cuenten con la misma probabilidad de ser seleccionados, y que la elección de uno no influya en la del siguiente. Gracias a este carácter probabilístico, el muestreo aleatorio es bastante sólido estadísticamente, si bien presenta problemas en su aplicación espacial, por

cuanto puede suponer elevados costos de desplazamiento. Por otra parte, existe cierta probabilidad de no recoger adecuadamente la variación espacial del error presente en la imagen clasificada, y de que algunas categorías, poco frecuentes, no estén representadas en la muestra.

- **Aleatorio estratificado:** la muestra se selecciona dividiendo la población en estratos, de acuerdo a una variable auxiliar (altitud o las mismas categorías temáticas que se han clasificado, por ejemplo). Es más complejo de diseñar que el anterior, pero aporta información sobre subconjuntos de la población, además de reducir el error de muestreo siempre que la variable auxiliar esté claramente relacionada con la distribución del error.
- **Sistemático:** la muestra se distribuye a intervalos regulares a partir de un punto seleccionado aleatoriamente. Garantiza un muestreo completo de la superficie a verificar, pero puede facilitar estimaciones erróneas si existe algún tipo de patrón periódico en el área observada (geometría de las parcelas, por ejemplo). Por otro lado, no asegura una estimación probabilística, por cuanto no existe aleatoriedad en la selección de las observaciones.
- **Sistemático no alineado:** modifica el esquema anterior, gracias a variar aleatoriamente, en cada línea y columna del muestreo, una coordenada, manteniendo fija la otra. Esto permite introducir una cierta aleatoriedad en la elección de la muestra, mientras reduce el sesgo debido a la periodicidad. Por otra parte, sigue garantizando una revisión completa del territorio.
- **Por conglomerados:** se selecciona como unidad de muestra un grupo de observaciones, en lugar de individuos aislados. En cada punto a verificar se toman varias muestras, en puntos vecinos al elegido aleatoriamente, y de acuerdo a un esquema prefijado. Además, pueden plantearse muestreos en varias fases, cambiando en cada una la unidad de muestreo. Este método reduce los costos de transporte, pero resulta más complejo y, normalmente, menos preciso que los otros.

Según Congalton (1991) quizás una combinación de muestreo aleatorio y sistemático puede proveer el mejor balance entre la validez estadística y la aplicación práctica. Muestreos sistemáticos pueden ser usados al inicio del proyecto para coleccionar cierta información de

evaluación, mientras que el muestreo aleatorio dentro de los estratos puede ser usado después de que la clasificación se haya completado. Congalton y Green (2009) resumen los pros y contras de los métodos de muestreo más usados (ver Cuadro 01).

Cuadro 1: Ventajas y desventajas de los principales métodos de muestreo.

MÉTODO	VENTAJA	DESVENTAJA
Aleatorio	Selección de muestra imparcial. Excelente propiedades estadísticas.	Costoso, especialmente en el trabajo de campo. No asegura que se tomen suficientes muestras en cada clase, ni que éstas se distribuyan en todo el paisaje.
Aleatorio estratificado	Selección de muestra imparcial. Asegura muestras en cada clase debido a que un número mínimo es seleccionado para cada una.	Requiere conocimiento previo de la distribución de las clases del mapa para poder estratificarlo. Costoso, especialmente en el trabajo de campo. Usualmente, es difícil encontrar muestras en clases pequeñas o poco distribuidas. No asegura que se tomen suficientes muestras en cada clase.
Sistemático	Fácil de implementar. Menos costoso que el aleatorio. Asegura una buena distribución de las muestras en todo el paisaje.	Puede ser sesgado si el patrón del muestreo esta correlacionado con un patrón del paisaje (periodicidad). Débil estadísticamente, ya que no todas las muestras tienen la misma probabilidad de selección.
Conglomerado	Menos costoso pues las muestras están cercas unas de otras, reduciendo el tiempo de viaje en el campo y/o el trabajo en la oficina.	Puede ser influenciado por la autocorrelación espacial, lo que genera que las muestras no sean independientes. Por lo tanto, no son muestras diferentes y se deben tomar más muestras independientes.

Fuente: adaptado de Congalton y Green (2009).

d) Tamaño de muestra

Según Mas *et al.* (2003) el tamaño de la muestra se refiere al número de sitios de verificación utilizados para estimar la confiabilidad del mapa. Entre más grande sea el tamaño de la muestra, más precisa será la evaluación; sin embargo, por razones de costo y tiempo, es conveniente determinar el tamaño de muestras mínimo, para alcanzar los objetivos.

Chuvieco (2010) señala que el tamaño de la muestra depende del nivel de probabilidad, o de confianza, que quiera otorgarse a la estimación, del error tolerable en la estimación y de la

propia heterogeneidad de la variable. La muestra sería tanto más grande cuanto mayor nivel de confianza, menor margen de error y mayor variabilidad incluya el muestreo.

Congalton (1991) recomienda verificar por lo menos 50 sitios por categoría, y de 75 a 100 si el área de estudio es superior a 400 000 ha o si hay más de 12 categorías. Según Mas *et al.* (2003) las poblaciones grandes no necesitan un tamaño de muestra más grande para obtener una evaluación de la confiabilidad precisa.

Chuvieco (2010) afirma que para el caso de una imagen clasificada, en donde la variable no es cuantitativa sino categórica, se recomienda emplear la distribución binomial de probabilidad. La expresión más sencilla (sin considerar la corrección para poblaciones finitas) sería:

$$n = \frac{z^2 pq}{L^2} \quad (\text{Ec. 02})$$

Donde z es la abscisa de la curva normal, p indica el porcentaje estimado de aciertos, q , el de errores ($q = 1 - p$), y L el nivel permitido de error. El valor de p y q puede estimarse a partir de datos auxiliares o simplemente igualarse a 50.

Sin embargo, McCoy (2005) afirma que este método no considera el tamaño de área de estudio, el número de clases, la variación en el tamaño de las clases, ni la variabilidad dentro de ellas. Por lo tanto, sería muy fácil sub-muestrear usando sólo este método. Por su parte, Congalton y Green (2009) sugieren obtener el tamaño de muestra siguiendo una distribución multinomial, con la siguiente relación (sin considerar la corrección para poblaciones finitas):

$$n = \frac{B(1 - \prod_i)}{\prod_i b_i^2} \quad (\text{Ec. 03})$$

Donde n es el número total de muestras, B es el percentil superior de la distribución chi-cuadrado con un agrado de libertad, usualmente el nivel de confianza es de 95 %, \prod_i es la mayor proporción del mapa ocupada por una clase y b_i es la precisión deseada.

Los mismos autores afirman que al evaluar la confiabilidad temática de un mapa, en la mayoría de casos, se utiliza una precisión absoluta para toda la clasificación y no para cada

clase. Por lo tanto, puede establecerse que $b_i = b$ y si no se tiene previo conocimiento sobre el valor de \prod_i , se puede asumir que es igual a $\frac{1}{2}$. En este “peor escenario”, el tamaño de muestra requerido para generar una matriz de confusión válida puede ser obtenido con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{B}{4b^2} \quad (\text{Ec. 04})$$

2.1.5 Levantamiento de la información

Para Congalton y Green (2009) en muchos casos simples observaciones o interpretaciones son suficientes para caracterizar una muestra. En otros casos, la observación no es adecuada y mediciones en el campo son necesarias.

McCoy (2005) afirma que uno de los pasos más importantes en cualquier proyecto de teledetección es realizar adecuadas mediciones u observaciones de campo del fenómeno que se está estudiando. Por varias razones, esta es también la parte más difícil del proyecto. Pues, hacer evaluaciones de campo es un trabajo tedioso y requiere de mucho tiempo. Pero incluso más difícil es el problema de determinar que se debe medir, u observar, y qué método usar.

Según Mas *et al.* (2003) este paso consiste en la caracterización del sitio de verificación para asociarlo a una o varias clases de la leyenda del mapa que se evalúa. Si la unidad de muestreo es el punto, en la práctica, lo que se evalúa es una superficie alrededor del punto. De forma general, durante el análisis de la unidad de muestreo, sugieren tener en cuenta su entorno.

Congalton y Green (2009) mencionan que para evaluar la confiabilidad de mapas, el intérprete en el terreno tiene que aplicar la misma definición de categorías temáticas que se hizo para clasificar la imagen. Esto es especialmente crítico cuando hay varias personas que realizan este chequeo de campo. La información de referencia será determinada por la complejidad del paisaje, el detalle del esquema de la clasificación, la precisión deseada en la evaluación y el presupuesto del proyecto (Stehman, 2001).

La colección de información para la evaluación de la confiabilidad requiere completar los siguientes pasos: primero, los sitios de muestreo deben de ser localizados de forma precisa tanto en la fuente de referencia (campo, por ejemplo) y en el mapa; siguiente, la unidad de

muestreo debe estar determinada; y finalmente, las características de referencia y del mapa deben ser asignadas a cada unidad de muestreo basadas en el esquema de la clasificación (Congalton y Green, 2009).

Según Foody (2002) el valor de referencia puede obtenerse por medición directa o a partir de fuentes de información auxiliares. La medición u observación directa requiere realizar un trabajo de campo simultáneo a la adquisición de la imagen. La alternativa a los trabajos de campo, es el empleo de documentos auxiliares de mayor detalle (imágenes de mayor resolución espacial, fotografías aéreas), o de sensores automáticos (temperatura, clorofila, etc.).

Chuvieco (2010) afirma que para el caso de clasificaciones de imágenes, la fotografía aérea se ha utilizado frecuentemente para validar resultados. La decisión es acertada si ambas fuentes, foto aérea e imagen, son de la misma o similar fecha. De lo contrario, puede plantear problemas, de consistencia temporal, importantes cuando las zonas sean muy dinámicas. Por otro lado, la fotointerpretación puede llevar consigo errores, lo que implicaría introducir un ruido en el proceso de verificación.

Por su parte Congalton y Green (2009) afirman que la información existente es rara vez aceptable para evaluar la confiabilidad temática de mapas, debido a:

- Los esquemas de clasificación utilizados en la generación de otros mapas usualmente son diferentes de los que se usan para crear nuevos mapas.
- La información existente es más antigua que la utilizada para generar el nuevo mapa.
- Los errores en los mapas existentes son poco conocidos.
- La información existente de inventarios de campo fue colectada para un objetivo diferente al de evaluar la confiabilidad.

Según Congalton (1991) es evidente que con el fin de evaluar adecuadamente la precisión de la clasificación obtenida por teledetección, la información de campo o datos de referencia deben ser recogidos. Sin embargo, la precisión de los datos de campo rara vez se conoce y tampoco se entiende claramente el nivel de esfuerzo necesario para recopilar los datos

apropiados. Dependiendo del nivel de detalle en la clasificación, la toma de información de campo puede ser una tarea muy difícil.

2.1.6 Análisis de la información

a) Matriz de confusión

Para Congalton y Green (2009) tener un único número para medir la confiabilidad temática de un mapa fue una mejora con respecto al método de evaluación no espacial, pero pronto fue reconocido que un simple número no era suficiente. La necesidad de evaluar categorías individuales dentro del esquema de clasificación fue reconocida y así comenzó el uso de la matriz de confusión para representar la confiabilidad del mapa.

Foody (2008) señala que la confiabilidad de un mapa depende de muchos factores incluyendo la cantidad de esfuerzo, el nivel de detalle y a la variabilidad de las categorías a ser mapeadas. Algunas veces una fiabilidad global de 85% es más que suficiente y en otras ocasiones este valor no será lo suficientemente confiable.

Chuvieco (2010) afirma que con la lista de los puntos de verificación, para los que se posee tanto su cobertura real como la deducida por la clasificación, puede generarse una tabla, denominada “matriz de confusión” puesto que recoge los conflictos que se presentan entre categorías. En esta matriz las columnas suelen indicar las clases de referencia, y las filas las categorías deducidas de la clasificación. La diagonal de esta matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (mapa y realidad), mientras que los marginales suponen errores de asignación.

Mas *et al.* (2003) describen dos tipos de error según si la lectura de la matriz se hace con base en las líneas o en las columnas. El error de comisión representa la proporción de sitios de verificación cartografiada en una cierta clase, pero que en realidad pertenece a otra categoría. El error de omisión se refiere a la proporción de sitios de verificación correspondiente a una categoría que fue cartografiada en otra.

Según Congalton y Green (1993) la matriz de confusión fue generada para comparar la clasificación del mapa obtenida por teledetección solamente con la información de referencia

recogida del campo o con la resultante de combinar trabajo de campo y fotointerpretación. Además, en esta matriz también se compara la información de referencia recogida del campo con la obtenida por fotointerpretación.

Por su parte, Congalton (2005) menciona que la matriz de confusión es útil para visualizar los resultados de la clasificación y para medir estadísticamente tales resultados. También, afirma que esta matriz es la única manera de comparar efectivamente dos mapas de forma cuantitativa.

Chuvieco (2010) concluye que la ventaja de estas tablas de confusión proviene de su capacidad para plasmar los conflictos entre categorías. De esta forma, no sólo conocemos la fiabilidad global de la clasificación, sino también la exactitud conseguida para cada una de las clases, así como los principales conflictos entre ellas.

Para Congalton (1991) la inapropiada generación de una matriz de confusión puede hacer que ésta no sea realmente representativa del mapa y, por lo tanto, la hace inservible. Los siguientes factores deben ser considerados para generar una matriz válida: la colecta de información de referencia; el esquema de la clasificación; el método de muestro; la autocorrelación espacial; y el tamaño de la muestra y el de la unidad de muestreo.

b) Fiabilidad global

Chuvieco (2010) afirma que a partir de la matriz de confusión pueden generarse toda una serie de medidas estadísticas que permitan validar numéricamente los resultados de distintas técnicas de clasificación. La medida más simple consiste en calcular la fiabilidad global del mapa, relacionando los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados:

$$\hat{F} = \frac{\sum P_o}{n} \quad (\text{Ec. 05})$$

Donde \hat{F} es la fiabilidad global del mapa, P_o la proporción del área correctamente clasificada y n el número de muestras. P_o se obtiene sumando los elementos de la diagonal, como se muestra en la Ec. 13 (ver Cuadro 02).

A partir de este valor estimado en el muestreo puede calcularse el intervalo de confianza (F) donde se situará la fiabilidad real alcanzada por la clasificación:

$$F = \hat{F} \pm z(EM) \quad (\text{Ec. 06})$$

El error de muestreo (EM) para estas validaciones puede generarse a partir de la fórmula del muestreo aleatorio simple mostrada en la Ec. 01 (sin considerar la corrección de poblaciones finitas, que no resulta significativa en este caso):

$$EM = \sqrt{\frac{pq}{n}} \quad (\text{Ec. 07})$$

Donde p indica el porcentaje estimado de aciertos, q , el de errores ($q = 1 - p$), y n el número total de muestras. El valor de p y q puede estimarse a partir de datos auxiliares o simplemente igualarse a 50.

c) Fiabilidad del usuario y del productor

Según Chuvieco (2010) conviene tener en cuenta que la fiabilidad global puede ocultar importantes diferencias entre categorías que escondan niveles de exactitud muy diversos. Por ello, un análisis más riguroso debe también considerar los valores marginales de la matriz. En el caso de las columnas, los marginales indican el número de píxeles que, perteneciendo a una determinada categoría, no fueron incluidos en ella. Éstos se denominan errores de omisión (E_o). Para cada clase se calculan con la siguiente relación:

$$E_{o,i} = \frac{X_{+i} - X_{ii}}{X_{+i}} \quad (\text{Ec. 08})$$

Donde X_{+i} indica el marginal de la columna i , y X_{ii} la diagonal de dicha columna. De forma similar, la sumatoria de las celdas no diagonales de las filas expresan los errores de comisión; esto es, píxeles que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo realmente a otra:

$$E_{c,i} = \frac{X_{i+} - X_{ii}}{X_{i+}} \quad (\text{Ec. 09})$$

Donde X_{i+} indica el marginal de la fila i , y X_{ii} la diagonal de dicha fila.

Congalton y Green (2009) explican que los errores de omisión y comisión expresan dos enfoques del mismo problema. Los primeros se refieren a la no asignación de una categoría, mientras que los segundos a una delimitación excesivamente amplia. Plantean que todo error es una omisión de la categoría correcta y, al mismo tiempo, una comisión de una categoría errada.

Por su parte, Story y Congalton (1986), citado por Chuvieco (2010), hablan de fiabilidad del usuario y del productor, la primera está en relación inversa con los errores de comisión, mientras la segunda lo está con los de omisión:

$$F_{p,i} = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$F_{u,i} = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \quad (\text{Ec. 11})$$

Woodcock (1996) afirma que desde la perspectiva del productor, la evaluación de la confiabilidad es una dimensión crítica en el proceso de evaluar las alternativas de metodologías de mapeo y sensores; mientras que desde la perspectiva del usuario la evaluación de la confiabilidad provee información importante sobre la calidad de los mapas, lo cual puede influir significativamente en la manera cómo éstos son usados.

Según Congalton y Green (2009) ambas fiabilidades están bastante relacionadas, pero puede ocurrir que una sea muy baja cuando la otra es elevada. Las dos medidas son complementarias y de gran trascendencia. La primera desde el punto de vista de quien produce una determinada clasificación, la segunda de la persona que la utiliza.

d) Índice de kappa

Mas *et al.* (2003) explican que los índices de confiabilidad descritos anteriormente no toman en cuenta los elementos fuera de la diagonal de la matriz. Por esta razón, se generalizó el uso del coeficiente de Kappa, que utiliza las sumas marginales de la matriz y da cuenta de la contribución del azar en la confiabilidad del mapa.

El índice de Kappa (K) mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar. En definitiva, intenta delimitar el grado de ajuste debido

sólo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios. Si el valor obtenido fuera 0.80 diríamos que la clasificación del mapa es un 80 % mejor que la esperada por azar (Chuvieco 2010).

Landis y Koch (1977), citados por Congalton (1991), caracterizan los posibles rangos para el estadístico de Kappa en tres grupos: un valor mayor que 0.8 representa una fuerte correspondencia, un valor entre 0.4 y 0.8 representa una correspondencia moderada, y un valor por debajo de 0.4 representa una correspondencia pobre. Las relaciones entre los componentes de la matriz de confusión que dan origen al índice de Kappa, se presentan y ejemplifican a partir del contenido del Cuadro 02 (las mismas anotaciones se utilizan en las ecuaciones a continuación).

Cuadro 2: Matriz de confusión en proporción.

Referencias	Mapa				Total
	1	2	...	Q	
1	P_{11}	P_{12}	...	P_{1q}	P_{1+}
2	P_{21}	P_{22}	...	P_{2q}	P_{2+}
...
Q	P_{q1}	P_{q2}	...	P_{qq}	P_{q+}
Total	P_{+1}	P_{+2}	...	P_{+q}	

Fuente: Mas *et al.* (2003).

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde K es el índice de Kappa, P_o la proporción de área correctamente clasificada y P_c la confiabilidad resultante del azar. P_o se obtiene sumando los elementos de la diagonal (Ec. 13). P_c se calcula sumando el producto de las sumas marginales (Ec. 14).

$$P_o = \sum_{k=1}^q P_{kk} \quad (\text{Ec. 13}) \quad P_c = \sum_{k=1}^q P_{k+} P_{+k} \quad (\text{Ec. 14})$$

Según Stehman (1997) el índice de Kappa no es un buen indicador de la calidad de un mapa y es más apropiado cuando se pretende evaluar diferentes métodos de clasificación. Muchos autores no están de acuerdo con la manera de estimar la contribución del azar y sugieren otras formas de evaluarla (Foody, 2008; Stehman, 1996).

Congalton (1991) afirma que el coeficiente de Kappa sólo es válido para un muestreo aleatorio simple. Sin embargo, estudios posteriores demuestran que los muestreos sistemático y aleatorio estratificado, además del aleatorio, también son apropiados para usar el índice de Kappa (Pourde y Congalton, 2003; Stehman, 1996).

Todos los autores concuerdan en que la evaluación de la confiabilidad no se puede resumir en un solo índice y que es muy importante incorporar en el reporte información sobre el muestreo, así como la matriz “bruta”, para que se pueda llevar a cabo el cálculo de otros índices que no fueron completados por los autores (Stehman, 1997).

2.2 Sistemas ecológicos

2.2.1 Antecedentes

La priorización global de áreas para su conservación es típicamente sugerida a una escala muy gruesa para realizarla en su totalidad (ej. Los Antos Tropicales abarcan un área de cuatro veces el tamaño de Alemania y cruza las fronteras de siete países), por lo que no son prácticas a la hora de usarla en la planificación a nivel nacional o departamental. Los esfuerzos de conservación efectivos en el campo y las decisiones requieren información sobre biodiversidad a una escala mucho más fina (Ferrier, 2002; Ferrier *et al.*, 2004).

Los 25 lugares más biodiversos y amenazados del planeta identificados por Myers *et al.* (2000) y las 237 unidades de conservación prioritaria según Olson y Dinerstein (1998) contienen 414 y 402 ecorregiones de Olson *et al.* (2001), respectivamente. Para América del Sur han sido propuestos 110 ecorregiones, pero recientemente Josse *et al.* (2003) y Sayre *et al.* (2008) han identificado y mapeado 659 Sistemas Ecológicos terrestres para la misma área. Según Ferrier *et al.* (2004) todos estos enfoques son realizados para que se complementen y no para competir entre ellos.

Según Josse *et al.* (2003) en Latinoamérica probablemente el tipo de clasificación de aplicación más común a nivel nacional ha sido el sistema de las Zonas de Vida de Holdridge, el cual debido a su modelo matemático no toma en cuenta a los humedales y muchas otros tipos azonales relacionados con sustratos especiales o hidrogeomorfológicos. Además, su uso de regiones latitudinales y altitudinales no son un buen sustituto del criterio bio-fitogeográfico.

Existen varios sistemas de clasificación ecológica y de la vegetación para el Perú, plasmados en sus correspondientes mapas, que representan valiosos esfuerzos para la comprensión de la realidad ecológica del país. Los momentos en el que fueron preparados, las herramientas empleadas para lograrlos, sus escalas, objetivos y los criterios empleados para su elaboración han sido distintos. (Reynel *et al.* 2013). Lo que unos autores incluyen, otros lo excluyen, lo olvidan, no lo reconocen, etc. Uno trata de corregir al otro, incluir lo propio y así parece una historia de nunca acabar (Brack, 1986).

El CDC-UNALM (2006) señala que conforme se ha mejorado la comprensión de la distribución espacial de las especies de plantas y animales, la ciencia ha propuesto diversas propuestas, algunas de las cuales se mantienen sin mayor variación desde hace casi siglo y medio como los reinos biogeográficos de Alfred Wallace. Posteriormente, otros autores avanzaron con la profundización de la resolución en la jerarquía ambiental como los mapas de provincias biogeográficas de Pielou y Udvardy en 1979 y 1975, respectivamente.

Reynel *et al.* (2013) afirman que los mapas preferidos por muchos ecólogos en la actualidad han sido elaborados sobre la base de datos obtenidos de sensores remotos, en los cuales los biomas son definidos mediante la estructura de la vegetación. Aunque mapas elaborados de esta manera son superiores en su resolución de detalles, sus estratos no consideran las similitudes en la composición florística, por lo cual no representan, necesariamente, unidades biológicas o biogeográficas significativas; contienen, más bien unidades estructurales.

Los mismos autores manifiestan que los mapas con buen nivel de resolución de las unidades florísticas, es decir, de los ensamblajes de especies distintivos, los endemismos y la consideración del detalle de los aspectos físicos, son idóneos para interpretaciones relacionadas a biogeografía, biología de la conservación y macroevolución.

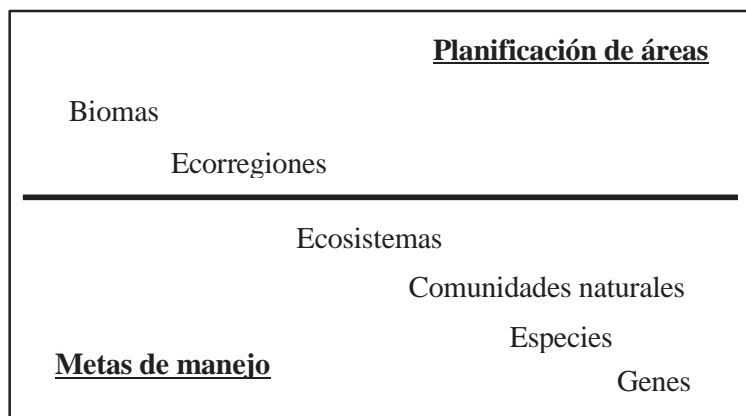
Para Reynel *et al.* (2013) un buen ejemplo de mapa con base florística es el de Ecorregiones elaborado por Dinerstein *et al.* (1995). También consideran dentro de ese grupo al mapa de Provincias Biogeográficas hecho por Udvardy (1975), el mapa Base de las Américas de Daly y Mitchell (2000), el esquema Biogeográfico de América Latina de Morrone (2006) y el mapa de Sistemas Ecológicos elaborado por NatureServe (2007).

Josse *et al.* (2007) explica que la experiencia adquirida en el mapeo de vegetación en Norteamérica, le sirvió a NatureServe para comprender que la mejor forma de representar la diversidad de las comunidades vegetales a escalas medias, es mediante la combinación de parámetros del ambiente físico y de la fisonomía de la vegetación.

Los autores encontraron, que el conjunto de criterios que mejor discriminan las comunidades va a variar según el paisaje. Esto parece obvio, pero a menudo los esquemas de clasificación son bastante rígidos en el uso de un grupo de criterios, en el ánimo de conservar la consistencia. Es en base a esta experiencia que NatureServe desarrolló la Clasificación Internacional de Sistemas Ecológicos Terrestres.

Según Bow *et al.* (2008) la clasificación de Sistemas Ecológicos provee un marco para organizar información detallada sobre la composición, estructura y función de los ecosistemas terrestres de escala intermedia en Sur América, la cual puede ser usada para la elaboración de mapas estandarizados y/o en la evaluación, planificación y monitoreo de la biodiversidad (ver Figura 02). Es la fuente de información detallada más consistente sobre diversidad ecológica, a una escala intermedia, actualmente disponible para todo el continente.

Figura 2: Ecosistemas como meta de conservación.



Fuente: Bow *et al.* (2008).

De manera preliminar el CDC-UNALM (2006) analizó de forma conjunta la información disponible para Perú, aclarando que luego deberá ser validada pero que se ha utilizado por ser lo más cercano a tener un mapa de vegetación o ecosistemas de una escala mediana, basado en

parámetros biológicos y no sólo en parámetros climáticos y físicos. Como resultado identificaron 122 Sistemas Ecológicos a nivel nacional, y se menciona que el número que podría aumentar posteriormente.

Los mismos autores indican que un total de 90 Sistemas están cubiertos por alguna Área Natural Protegida (ANP) (80%). Sin embargo, el número de Sistemas Ecológicos con el área necesaria para obtener una representatividad mínima aceptable (>10% de su superficie en alguna ANP) es muy bajo, alrededor de 45, es decir, el 40% del total de Sistemas identificados para el país. De estos, los medianamente representados también se encuentran en números bajos, 16 para rangos de cobertura de 10 – 20%.

Por otro lado, con el énfasis dado por el Convenio de Diversidad Biológica (CDB) al enfoque por ecosistemas, la planificación para la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales requieren de mapas de ecosistemas que utilicen una clasificación unificada y con criterios consistentes a través de las fronteras políticas, y que además tenga un grado de resolución conceptual y espacial que sea representativo de la enorme diversidad biológica y ecosistémica del Neotrópico (Josse *et al.* 2007).

El CDC-UNALM (2006) afirma que el mapa de Ecorregiones, ha sido aceptado por la mayoría de los países latinoamericanos como base biogeográfica para los procesos de identificación de prioridades de conservación. Sin embargo, no puede ser utilizado para su estudio tal cual ha sido producido, pues la escala a la que fue generado es demasiado gruesa, inclusive para un análisis a nivel país.

Por lo tanto, como parte del proceso previo para utilizar dicho sistema, el CDC-UNALM mejoró los límites y a su vez generó insumos para ayudar a comprender mejor su integridad biogeográfica y los procesos que ahí ocurren. Asimismo propuso nuevas Ecorregiones para el Perú basándose en fuentes bibliográficas y consulta a expertos.

2.2.2 Clasificación

Los Sistemas Ecológicos terrestres son grupos de comunidades de plantas que tienden a ocurrir en forma conjunta en paisajes con procesos ecológicos, sustratos, y/o gradientes ambientales

similares. Representan una escala de trabajo menor a la escala de la ecorregión, pero mayor a la escala de las asociaciones vegetales o alianzas usadas en las clasificaciones de ecología de comunidades (Josse *et al.* 2003 y 2007; Bow *et al.* 2008).

Según Josse *et al.* (2003) esta clasificación se basa en la cobertura vegetal actual, no potencial. En cuanto al proceso, la clasificación se desarrolló utilizando el continente entero, como el marco físico para la selección de criterios de estratificación espacial, tales como bioclima, geofomas, geomorfología, hidrogeomorfología, a los que se combinó con unidades fitogeográficas como una manera de representar el componente biótico con sus discontinuidades florísticas.

Múltiples factores ambientales o criterios diagnósticos han sido evaluados y combinados de diferentes formas para explicar la co-ocurrencia espacial de comunidades naturales. Están incluidos los siguientes factores (Josse *et al.* 2003):

a) Biogeográficos y bioclimáticos

Debido a su amplia influencia en la fitogeografía las variaciones climáticas de escala continental, tales como la variación de la humedad y la estacionalidad, fueron reflejadas en unidades mayores denominadas Divisiones Ecológicas. Estas unidades regionales permiten organizar la clasificación y describir la distribución de cada Sistema. Patrones regionales de clima, fisiografía, alteración de regímenes e historia biogeográfica fueron descritos para cada División.

Para propósitos de la clasificación también fueron importantes los factores bioclimáticos subregionales, especialmente donde existen gradientes abruptos de elevación o donde el mar tiene una fuerte influencia en la vegetación. Para caracterizar los factores climáticos subregionales se integró las categorías bioclimáticas globales de Rivas-Martinez, éstas incluyen temperatura relativa, humedad y estacionalidad.

b) Ambientales

Dentro de ámbito de los factores biogeográficos y climáticos, la composición, la estructura y las funciones ecológicas son fuertemente influenciadas por la fisiografía local, las macroformas y el sustrato. Algunas variables ambientales estaban descritas en clasificaciones existentes y se

usaron como factores diagnósticos para los Sistemas. Otros factores como las macroformas necesitaron ser definidos de forma estandarizada para su aplicación como diagnóstico.

c) Dinámica ecológica

Varios procesos dinámicos eran lo suficientemente comprendidos como para ser utilizados en la clasificación. En muchos casos, una característica como alteración del régimen puede proveer la única variable para distinguir tipos de sistemas. Una vez caracterizado de manera estandarizada, este y otros procesos dinámicos pueden ser usados en múltiples clasificaciones.

d) Yuxtaposición del paisaje

A una escala local el régimen climático, la fisiografía, el sustrato y los procesos dinámicos suelen ocurrir en forma de mosaicos. La reiterada yuxtaposición de comunidades vegetales reconocibles provee un criterio útil e importante para clasificaciones de factores múltiples.

e) Estructura, composición y abundancia de la vegetación

En clasificaciones de vegetación es bien sabido que tanto la fisonomía y la composición de la vegetación siguen mucho sobre la composición, la estructura y las funciones del ecosistema. Sin embargo, la importancia relativa de la fisonomía puede variar en diferentes ecosistemas, especialmente a escala local. Mientras que las diferencias en fisonomía puede sugerir inicialmente diferencias entre ecosistemas, el conocimiento de la composición de la vegetación debe indicar distinciones más significativas.

En la clasificación de la vegetación, se reconoce al cambio de la composición de especies en el espacio (diversidad beta) como indicador para diferenciar ecosistemas. El objetivo de la clasificación de Sistemas Ecológicos es reconocer donde ese cambio es relativamente abrupto y explicar por qué ocurre tal cambio en el terreno. Si bien la diversidad beta es una consideración primaria, la abundancia relativa de vegetación puede ser también de importante consideración.

Bow *et al.* (2008) afirman que los factores arriba descritos se usaron a diferentes niveles de resolución espacial, con lo que se obtuvo un primer nivel más general de unidades (Divisiones Ecológicas, ver Figura 03). Ellas presentaron un contexto espacial más manejable como para

identificar y aplicar a un nivel de mayor resolución espacial el conjunto de criterios o parámetros que mejor explicasen la distribución de las comunidades naturales.

Josse *et al.* (2003) señalan que los Sistemas Ecológicos fueron elaborados para proveer una unidad de clasificación de fácil mapeo, usualmente desde imágenes de satélite, y fácilmente identificable en el campo. Representan también una escala apropiada para descubrir y modelar hábitats de muchas especies de animales vertebrados y plantas vasculares.

Esta clasificación, con el apoyo de muchos especialistas en vegetación de Sur América y el Caribe, produjo una lista de 780 Sistemas Ecológicos para la región. Sin embargo, la ocurrencia de éstos en el terreno no fue mapeada inicialmente como parte del esfuerzo de elaboración de la clasificación (Bow *et al.* 2008).

Según Josse *et al.* (2003), idealmente, esta clasificación ecológica resulta de varias fases, todas parte de un proceso en continua mejora. Estas fases suelen incluir: i) revisión de literatura y síntesis del conocimiento adquirido, ii) formulación de una hipótesis inicial describiendo cada tipo, iii) diseño y establecimiento de un muestreo estratificado, iv) recolección de datos de campo, v) análisis de la información, vi) descripción de los tipos, vii) establecimiento de claves dicotómicas para la clasificación de unidades, viii) mapeo de las unidades de clasificación, y ix) refinamiento de la clasificación, estableciendo prioridades para nueva colección de información.

La nomenclatura para la clasificación de Sistemas Ecológicos incluye tres componentes principales que comunican distribución regional (División Ecológica), fisonomía de la vegetación y composición y/o entorno ambiental. El nombre final es una combinación de estas características ecológicas con consideraciones relacionadas con el uso local y la aplicación práctica (Josse *et al.* 2003).

Figura 3: Divisiones Ecológicas usadas en la organización de los Sistemas Ecológicos.



Fuente:
Josse *et al.* (2003).

2.2.3 Mapeo

Para extender la utilidad de esta clasificación a los administradores y conservacionistas de Sur América, Sayre *et al.* (2008) desarrollaron un método estandarizado para mapear los Sistemas Ecológicos terrestres a una resolución espacial relativamente fina (escala de trabajo de 1:250 000, 20 ha como unidad mínima de mapeo) para todo el continente (ver Figura 10).

Un enfoque de estratificación biofísica continental fue adoptado para delinear ecosistemas como unidades físicas y ambientales que soportan un tipo de cobertura particular. Luego los

ecosistemas resultantes fueron caracterizados usando la clasificación de desarrollada por NatureServe. Este proceso se muestra en el diagrama de la Figura 04.

a) Elevación

Se creó un Modelo de Elevación Digital (MED) de 90 m para todo el continente a partir de información generada por la Misión Topográfica del Radar Shuttle (SRTM, por sus siglas en inglés). Para facilitar el procesamiento, los datos de 90 m de resolución generados para el continente fueron reensamblados a una resolución de 450 m. Las siguientes clases de elevaciones fueron identificadas y mapeadas de acuerdo a su importancia florística en la determinación de la distribución de la vegetación suramericana: 0 – 500m, 500 – 1000 m, 1000 – 2000 m, 2000 – 3300 m, y > 3300 m (ver Figura 05).

b) Macroformas

El MED de 450 m fue usado también para producir una plataforma del relieve continental, con todos los píxeles asignados dentro de alguna de las siguientes fisiografías regionales: llanuras, llanuras onduladas, colinas, montañas, mesetas, valles, llanuras inundables, y llanuras costeras. En el método para la determinación de las clases de relieve se empleó el análisis del “vecino más cercano” con una ventana móvil de 5 por 5 píxeles y también se siguieron otros enfoques para modelar macro-relieves. Primero fueron modelados cuatro relieves para todo el continente: llanuras, llanuras aluviales, colinas y montañas. Luego se derivaron las siguientes clases, subsecuentemente y de forma independiente pero sobrepuesta a la matriz de llanuras/colinas/montañas: llanuras costeras, llanuras inundables, valles y mesetas (Figura 05).

c) Bioclima

Las regiones bioclimáticas fueron desarrolladas usando la información meteorológica global del proyecto WorldClim con macrogrids de 1 km² de resolución espacial y formulas elaboradas por Rivas-Martinez para delinear regiones isobioclimáticas. El enfoque de Rivas-Martinez define cuantitativamente cinco regiones macroclimáticas para el planeta (polar, boreal, templado, mediterráneo y tropical) y luego los subdivide en regiones bioclimáticas usando información meteorológica sintetizada en índices de continentalidad, termicidad y humedad (ver Figura 06).

d) Geología

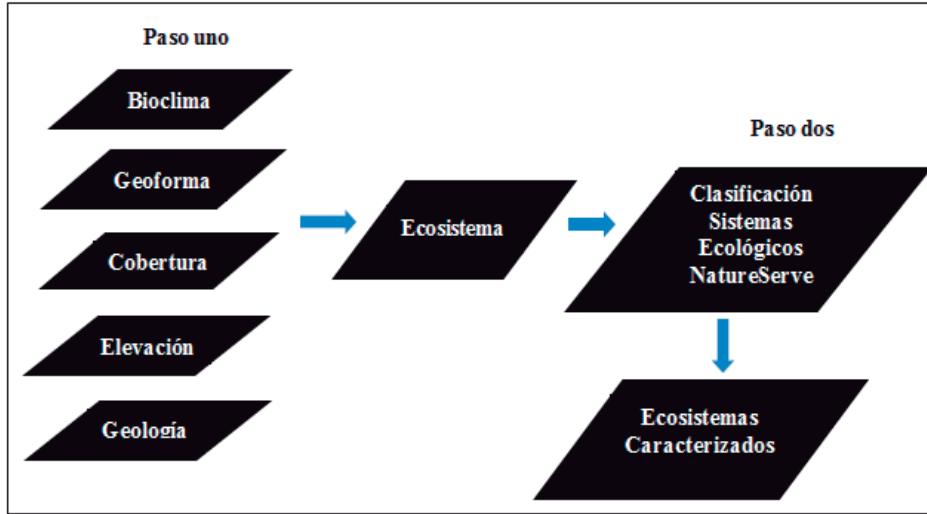
Un conjunto de datos geológicos de todo el continente fue adquirido a partir de la digitalización de mapas geológicos de todos los países de Sur América. Esta capa de datos se desarrolló usando fuentes de escala 1:500 000 para todos los países a excepción de Brasil, en donde se utilizaron mapas de escala 1:1 000 000. Con el objetivo de mapear ecosistemas, la información geológica suramericana fue reclasificada en las siguientes clases: zonal, sedimentario, piedra caliza/calcárea, aluvial, salar, glaciar y único. Se generó esta clasificación para identificar sustratos litológicos que permitan distinguir la distribución de la vegetación a una escala regional o continental (ver Figura 06).

e) Cobertura

Se trabajó con el conjunto de datos generados para toda Sur América por el proyecto Global Land Cover 2000. Esta información tiene una resolución espacial de 1 km², y establece 73 clases de cobertura para todo el continente, las cuales luego fueron reclasificadas en 26 tipos de cobertura (ver Figura 07).

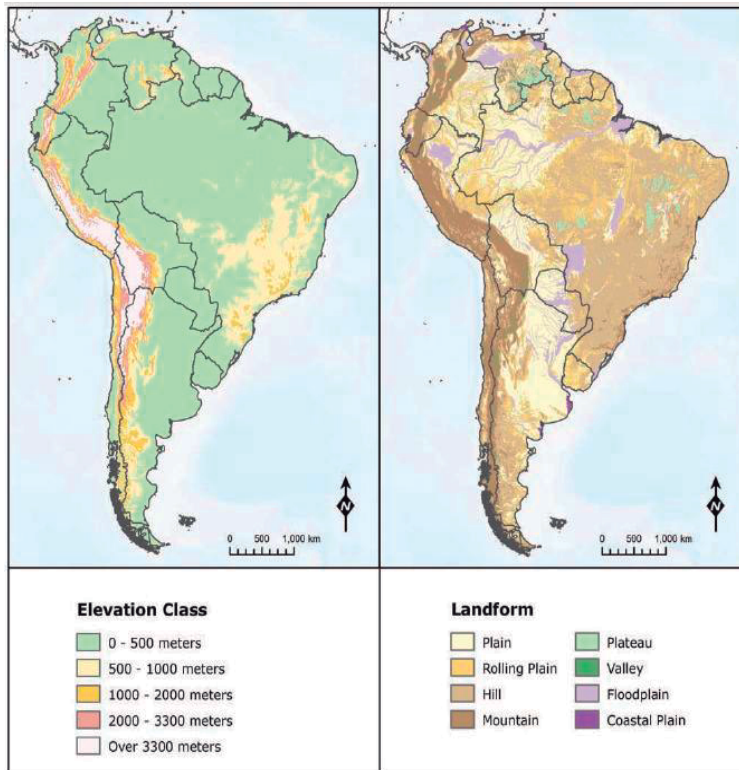
Estas cinco fuentes de información fueron combinadas para producir una nueva plataforma continental de formato raster donde cada celda fue caracterizada con un único código (ver Figura 04). Se decidió que el valor numérico de cada código fuera aditivo, con la intención de retener valores de la clase original en la característica resultante. Códigos únicos fueron modelados para toda Suramérica, excepto Galápagos y las islas Malvinas, y luego evaluados y homologado a algún Sistema Ecológico de NatureServe (Sayre *et al.* 2008).

Figura 4: Enfoque de estratificación biofísico.



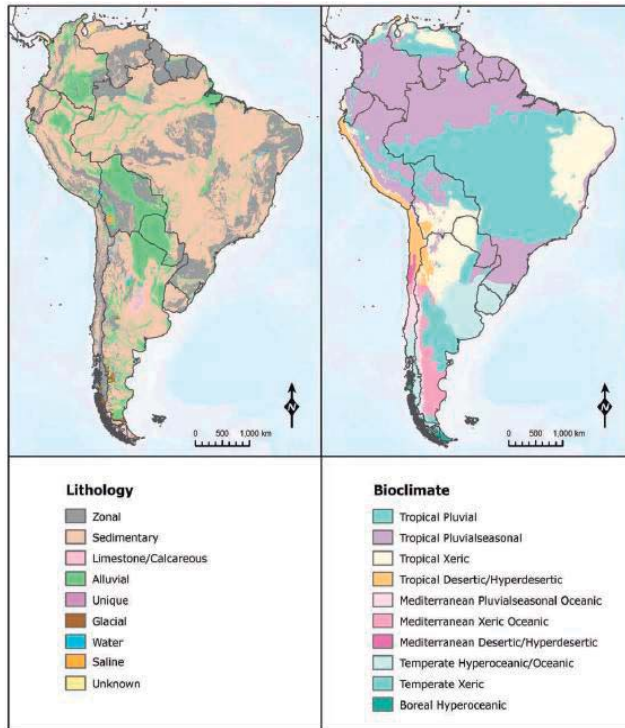
Fuente: adaptado de Bow *et al.* 2008.

Figura 5: Clases de elevación y macroforma para Sur América.



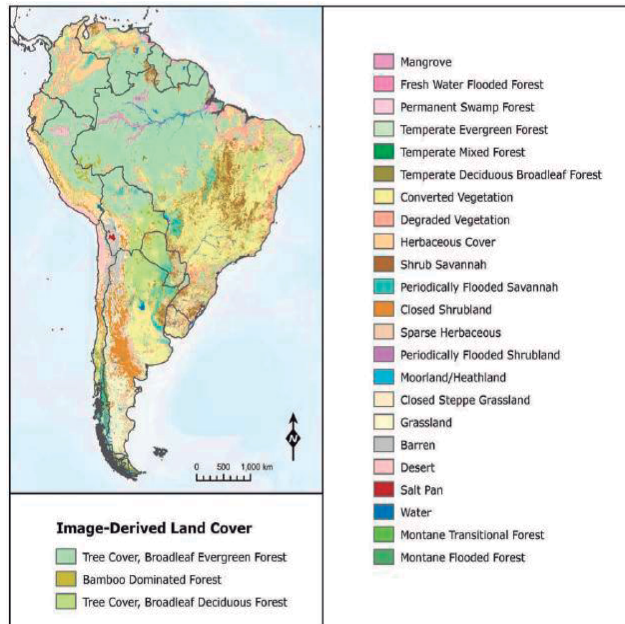
Fuente:
Sayre *et al.* (2008).

Figura 6: Geología y Bioclima de Sur América.



Fuente: Sayre *et al.* (2008).

Figura 7: Cobertura del suelo de Sur América.



Fuente: Sayre *et al.* (2008).

Figura 8: Sistemas Ecológicos terrestres de Sur América.



Fuente: Sayre *et al.* (2008).

2.2.4 Verificación

Según Josse *et al.* (2009), idealmente, se tendría que haber ejecutado una extensiva campaña de campo con puntos de muestreo distribuidos de forma aleatoria estratificada para coleccionar información. Tal validación de campo no fue posible dentro del alcance del proyecto de mapear los Sistemas Ecológicos terrestres del continente sudamericano pero si se realizó un análisis comparativo.

Sayre *et al.* (2008) seleccionaron siete mapas existentes, de un total de veintiuno, y homologaron de forma lógica sus categorías a la clasificación de NatureServe para ser usados como información de referencia en la comparación. Luego, se ejecutó un muestreo aleatorio estratificado para cada ecosistema en nueve biomas de la clasificación de Ecorregiones de WWF. Las ecorregiones fueron usadas como estratos para la verificación. Finalmente, se implementó una evaluación de la confiabilidad para producir la fiabilidad global, el estadístico de Kappa, entre otros.

Los autores encontraron que la confiabilidad para las nueve ecorregiones muestreadas va desde el 25% hasta el 49%, y la fiabilidad global fue de 35%. Según Foody (2002) la fiabilidad global recomendada para mapas de cobertura es de 80–85%. Sin embargo, Sayre *et al.* (2008) afirman que es difícil de obtener ese nivel de confiabilidad en mapas detallados de sistemas ecológicos, cobertura del suelo y/o vegetación.

Otros estudios similares muestran valores de confiabilidad global iguales a 31%, 42%, 50%, 53%, y 59%. Lo obtenido para el caso de los Ecosistemas o Sistemas Ecológicos terrestres de Sur América no es particularmente sorprendente debido a la compleja naturaleza de la información que se usó y de la inevitable subjetividad del método de evaluación de confiabilidad ejecutado (Sayre *et al.* 2008).

Swenson *et al.* (2012) explican que en el caso del mapa de la cuenca amazónica de Perú y Bolivia (1.25 millones de km²), el área de estudio se dividió en tres zonas para la evaluación de su confiabilidad temática pero sólo se lograron verificar 66 de los 91 Sistemas Ecológicos establecidos en el mapa.

En las Yungas, una de las tres zonas, se tuvo 241 puntos de verificación, sin embargo, sólo cuatro Sistemas fueron adecuadamente muestreados para su respectiva evaluación de confiabilidad. Adicionalmente, se evaluaron cinco conjuntos de Sistemas, agrupados en función de su similitud ecológica. Como resultado general se obtuvo una fiabilidad global de 90%. (Swenson *et al.* 2012).

Para la evaluación de la confiabilidad de la zona de Selva Baja peruana un total de 784 muestras fueron evaluadas: 270 en campo y 514 interpretando imágenes satelitales. Se utilizaron evaluación de campo, interpretación de imágenes satelitales, verificación de campo e interpretación de imágenes combinados, y análisis de Sistemas Ecológicos agrupados. Finalmente, se obtuvo una fiabilidad global-índice de Kappa de 91%-89%, 47%-41%, 62%-58% y 86%-79%, respectivamente (Josse *et al.* 2007).

Por su parte, el MINAM (2009) en el proceso de validación del mapa de Deforestación de la Amazonía Peruana evaluó en campo 234 puntos de verificación; mientras que el MINAM (2012) hizo lo propio para el mapa de Cobertura Vegetal del Perú, evaluando en campo 451 puntos.

2.2.5 Aplicaciones

La mayor parte de las autoridades sobre el tema reconocen 15 biomas terrestres (ej. Evaluación Ecosistémica del Milenio, 2005). Las ecorregiones son subdivisiones de los biomas según los patrones biogeográficos de su biota (Olson *et al.*, 2001). Sin embargo, muchas de las unidades espaciales de interés práctico para las evaluaciones podrían tener un tamaño menor que los biomas o las ecorregiones (Rodríguez *et al.*, 2011).

Según el CDC-UNALM (2008) los Sistemas Ecológicos son considerados para la planificación ecorregional como objetos de conservación y, por lo tanto, su validación en campo es necesaria (aunque no siempre posible), ya que de su correcta delimitación depende la selección final de los sitios prioritarios para conservación.

Josse *et al.* (2009) argumentan que los indicadores de conservación de biodiversidad a nivel ecosistémico sirven como un filtro inicial ya que de modo particular representan tanto la

conservación de especies como el mantenimiento de los principales procesos naturales que las sustentan. Los mismos autores recomiendan aplicar su metodología para identificar vacíos y prioridades de conservación en los sistemas nacionales de áreas protegidas a escala de ecosistemas. Las principales ventajas y utilidades de la clasificación de Sistemas Ecológicos son mostradas en el Cuadro 03.

Cuadro 3: Ventajas y/o utilidades de los Sistemas Ecológicos terrestres.

VENTAJAS	UTILIDADES
<ul style="list-style-type: none"> - Implementar programas de monitoreo y evaluación de la integridad ecológica. - Evaluar la representación de hábitats dentro de las ANP de manera consistente a través de las fronteras políticas. - Investigar sobre las relaciones especie-hábitat, tanto de especies animales como vegetales. - Mapeo de diferentes servicios ambientales (ej. Almacenamiento de carbono, condición de cuencas hidrográficas, etc.). - Planificación de la conservación de manera efectiva, aplicando los mismos enfoques y acciones en lugares distintos pero con sistemas ecológicos iguales o similares. - Aportar en el conocimiento de la cobertura vegetal natural actual y potencial, facilitando de esta forma procesos de restauración ecológica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Representar la biodiversidad del país a nivel de ecosistema para poder preservarla y manejarla. - Ayudar a representar y valorar los servicios ambientales y la resiliencia de los ecosistemas. - Evaluar y monitorear el estado de conservación de la biodiversidad a nivel de ecosistema. - Apoyar a la gestión del territorio; - Identificar áreas prioritarias para la conservación y para el manejo de recursos naturales a nivel nacional y regional. - Contribuir a fortalecer la representatividad ecológica del SINANPE y de los Sistemas Regionales de Conservación.

Fuente: tomado de Tovar (2013).

Los Sistemas Ecológicos, combinados con otras fuentes de información, han sido aplicados recientemente por Josse *et al.* (2013) para facilitar insumos para una serie de aplicaciones en el marco de la planificación y el monitoreo de la Amazonia, con relevancia en las actividades y decisiones de conservación a nivel local.

Rodríguez y Young (2000) determinaron que el sistema de Áreas Protegidas del Perú no representa de forma adecuada la diversidad biológica ni la ecológica. Rodríguez *et al.* (2004)

demonstraron que la red global de Áreas Protegidas aún está lejos de estar completa. En ese sentido, Swenson *et al.* (2012) hicieron un análisis de las deficiencias, para el ámbito de la cuenca amazónica de Perú y Bolivia, examinando la representatividad de los Sistemas Ecológicos terrestres, la distribución de especies (aves, mamíferos, anfibios y plantas) y de áreas irremplazables por su riqueza de endemismos, con respecto a las Áreas Protegidas existentes.

A pesar que las Listas Rojas de Especies de la UICN cuentan con bases sólidas y están ampliamente aceptadas, se ha reconocido la necesidad de evaluar la biodiversidad a mayores niveles de organización biológica. Esta necesidad ha tenido como respuesta la generación, a escala nacional y regional, de mapas de ecosistemas, comunidades y hábitats; además de la reciente resolución en el Congreso Mundial de Conservación del 2008 para desarrollar criterios cuantitativos para la evaluación de ecosistemas (Keith *et al.*, 2013).

Según Rodríguez *et al.* (2011 y 2012) las Listas Rojas de Ecosistemas y sus criterios establecerán estándares internacionales sólidos para evaluar el estado de la biodiversidad, complementando los éxitos de las Listas Rojas de Especies, de varias maneras:

- Los ecosistemas podrían ser más representativos de la diversidad biológica en general que lo son las especies individuales.
- Incluyen componentes abióticos fundamentales que sólo son considerados indirectamente en las evaluaciones de especies.
- Las disminuciones en el estatus de ecosistemas también podrían ser más aparentes que las extirpaciones o extinciones de especies particulares.
- La sociedad frecuentemente percibe la pérdida de diversidad biológica en términos de la pérdida de beneficios ecosistémicos como agua limpia, comida, madera y combustible.
- Las evaluaciones a nivel de ecosistema podrían también requerir menos tiempo que evaluaciones especie por especie (al 2010 sólo se había evaluado el estatus de menos del 3% de especies conocidas del mundo).

En América la clasificación de Sistemas Ecológicos, se ha aplicado desde el ámbito continental (Sayre *et al.* 2008) hasta una escala ecorregional (Josse *et al.* 2009) y nacional (Rodríguez *et al.* 2010). En el Perú se han mapeado los Sistemas Ecológicos de las Yungas Peruanas, del Bosque Seco de Tumbes y Piura, del Desierto de Sechura, de los Bosques Montanos de la Cordillera Real Oriental, de la Cuenca Amazónica y del Cusco. Recientemente, Sayre *et al.* (2013) lo han iniciado el proceso en todo el continente africano.

2.3 El santuario histórico de machupicchu

2.3.1 Base legal

El establecimiento, la conservación, el manejo, la protección y el desarrollo del Santuario Histórico de Machupicchu están determinados por los siguientes dispositivos legales y convenios internacionales (Galiano, 2000):

- Decreto Supremo 001-81-AA del 08.01.81: que, declara el establecimiento legal, como Área Natural y Cultural Protegida a Machupicchu, en la categoría de Santuario Histórico.
- Inclusión en la lista de Patrimonio Cultural y Natural Mundial al SHM, por la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural de la Humanidad de la UNESCO el 09.12.1983.
- Ley N° 26834, Ley de Áreas Naturales Protegidas 30.07.1997.
- Ley N° 26839 Ley sobre la Conservación y Aprovechamiento Sostenible de la Diversidad Biológica, 17.06.1997.
- Convenio Internacional sobre la Protección del Patrimonio Cultural y Natural del Mundo: UNESCO 1972.
- Convenio sobre la Diversidad Biológica: Resolución Legislativa N° 26181, 11.05.93.
- Ley N° 613 Código del Medio Ambiente, 24.11.1994.
- Ley del Amparo de Patrimonio Cultural, 1964.
- Ley de Turismo, 1998.
- Planes Maestros del SHM, 1999 y 2005.

- Planes Directores de las Áreas Naturales Protegidas, Decretos Supremos 010-99 AG y 016-2009-MINAM.
- Creación de la Unidad de Gestión del SHM, Decreto Supremo 023-99-AG, 09.07.1999.

2.3.2 Antecedentes

Swenson *et al.* (2012) afirman que la cordillera de Vilcabamba es un área importante de endemismos en aves, mamíferos y plantas. Además, constituye el área irremplazable más grande y compacta para aves y mamíferos, y también es altamente irremplazable para algunas plantas. Actualmente, la Cordillera del Vilcabamba sólo tiene un Área Protegida, el Santuario Histórico de Machupicchu, que solo cubre 326 km² y es altamente impactado por el turismo.

Dourojeanni (1976) analizando el mapa ecológico del Perú, explica que el área que podría constituir una Unidad de Conservación incluye al menos seis formas de vida. La altura de las aproximadamente 50 500 hectáreas consideradas en el proyecto varía desde más de 5 000 hasta menos de 2 000 msnm. Consecuentemente, la flora y la fauna son muy variadas, pero no abundantes debido a la explotación económica y a prácticas dañinas en el uso de la tierra.

Según Miller (1980) aunque en un principio, la preocupación radicaba en protección y restauración de la zona central, investigaciones más detalladas revelaron que también se encuentran objetos, estructuras y sitios en las selvas y montañas circundantes. Mientras estas selvas se mantengan invariables, no habrá necesidad de preocuparse.

Gracias a una cuidadosa cooperación entre los departamentos, la planificación regional y el ímpetu del desarrollo para el bienestar de la población rural, a largo plazo y en forma estable, el gobierno peruano extendió el concepto de sitio arqueológico al de Santuario Histórico Nacional (Miller, 1980).

El Santuario Histórico de Machupicchu (SHM) existe como Área Natural Protegida (ANP) desde el año 1981; en 1983, la UNESCO lo declaró como sitio de Patrimonio Mundial de la Humanidad con la doble categoría: Natural y Cultural; y en el 2011, el Comité de Patrimonio

Mundial consideró analizar la inclusión del Santuario en la lista de Patrimonio Mundial en Peligro (sePerú, 2011).

La razón para su creación como ANP fue: contribuir a la conservación del espléndido paisaje que los Incas escogieron para integrar en él una de sus obras más importantes, así como para preservar las extraordinarias estructuras históricas que perduran. Es decir, se trata de armonizar los principios de la conservación de los recursos naturales renovables con el deber de preservar los legados históricos y mostrarlos del mejor modo posible a los ojos de la humanidad (Dourojeanni, 1976).

Según Miller (1980) Machupicchu está lejos de ser un lugar de naturaleza prístina. Los ecosistemas de la región están profundamente alterados desde muchos siglos atrás. No obstante, conservan valores importantes como son la flora y la fauna aceptablemente representativas de la zona de vida natural a que pertenecen.

Estudios recientes realizados en el Santuario muestran un incremento en las amenazas: deforestación y degradación de los ecosistemas a causa de la expansión de actividades agrícolas y ganaderas, incendios forestales derivados de quemas agrícolas u otros, alteración del paisaje derivada de actividades de expansión y mantenimiento de infraestructura y vías de acceso, y un crecimiento no siempre ordenado de la actividad turística (sePerú, 2011; Agusti, 2003; CANDES, 2010). Regalado y Arias (2006) resumen la problemática del SHM en el Cuadro 04:

Cuadro 4: Problemática ambiental del Santuario Histórico de Machupicchu.

PROBLEMAS	CAUSAS	EFEECTO
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No se comprende el concepto de “gestión de capacidad de carga”, por lo que este aún no es incorporado en los procesos de planificación. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sobrecarga de visitantes durante los recorridos en la ciudad Inca y en la red de caminos Inca, especialmente en temporada alta, genera grandes deterioros. ▪ Crecimiento no planificado de los turistas (gran afluencia estacional de visitantes).
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gran demanda de servicios turísticos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Crecimiento urbano desordenado en los puntos de acceso al SHM y en

Conflictos generados por actividades turísticas.	(transporte, alojamiento, alimentación, entre otros).	<p>puntos intermedios al interior del área natural (Aguas Calientes).</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Invasión de terrenos, en donde se desarrolla infraestructura precaria de servicios. ▪ Falta de adecuados sistemas de gestión de residuos sólidos y de aguas negras. ▪ Servicios turísticos de muy baja calidad. ▪ Desarrollo de infraestructura hotelera. ▪ Crecimiento urbano. ▪ Desarrollo de servicios públicos de transporte (ferrocarril, helicópteros y ómnibus). ▪ Demanda de animales de carga.
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No se realizan adecuados procesos de planificación estratégica ni operativa (plan maestro, planes de sitio, planes anuales) para los diversos atractivos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sobreposición de jurisdicciones y responsabilidades institucionales. ▪ Desorganización y caos institucional al momento de implementar los planes operativos individuales. ▪ Uso irracional de la tierra y falta de su discriminación por sectores (necesidad de un microzonificación)
Conflictos generados por actividades agrícolas y pecuarias.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Actividades agropecuarias incompatibles con el SHM. ▪ Limitada capacidad de monitoreo, por parte de las autoridades, de las actividades que se desarrollan en el SHM. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No se cumple con la normatividad vigente. ▪ Incendios forestales. ▪ Disminución de la diversidad arbórea y deforestación. ▪ Demanda de combustibles (leña). ▪ Introducción de diversas especies exóticas que compiten y desplazan a las especies nativas. ▪ Ganadería doméstica de animales exóticos. ▪ Erosión y degradación de las zonas de pastoreo (capacidad de carga superada hasta en cinco veces). ▪ Caza furtiva y extracción de especies de flora. ▪ Pérdida de biodiversidad.
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Falta de planificación en el desarrollo de actividades agropecuarias. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ A pesar de las propuestas existentes, aún no se implementa la zonificación de ANP.

<p style="text-align: center;">Conflictos generados por servicios públicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausencia de planificación en el desarrollo de actividades relacionadas con los servicios públicos. ▪ Limitada normatividad ambiental para la regulación de servicios públicos dentro del SHM. ▪ Limitada capacidad de monitoreo de las actividades económicas y sociales complementarias al interior y fuera del SHM. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ampliaciones y refacciones en la central de generación hidroeléctrica sin estudios adecuados de impacto ambiental. ▪ Inexistente monitoreo ambiental de los servicios de transporte público al interior y fuera del SHM. ▪ Ausencia de protocolos ambientales de operación. ▪ Derrames de combustible, emisión de ruidos contaminantes y de gases de combustión incompleta. ▪ Talleres de maestranza y reparación precarios (infraestructura física inapropiada). ▪ Ausencia de estudios de impacto ambiental y evaluaciones de impacto ambiental en las actividades económicas y sociales.
---	---	--

Fuente: Regalado y Arias (2006).

2.3.3 Diversidad biológica

Los resultados de los estudios realizados sobre diversidad biológica en el SHM son sorprendentes (ver Anexo 1), por lo que es importante señalar los factores principales que la determinan, a fin de poder acceder a un adecuado entendimiento del reto que significa la conservación y el manejo del Santuario en sus tres categorías: los ecosistemas, las especies y los genes. Según Galiano (2000) entre los factores causales de la diversidad biológica del SMP se tiene:

- El levantamiento de los Andes.
- La estabilidad climática hacia las vertientes orientales que dan hacia la Amazonía durante el movimiento de las placas tectónicas y deriva continental.
- Las fluctuaciones climáticas del Pleistoceno que afectaron los bosques en su posición altitudinal.
- La variedad de formaciones vegetales que posee el SHM.
- La contrastada orografía a ambos márgenes del río Urubamba.

A continuación se muestra los resultados de la diversidad biológica del SHM, logrados a través de diversos estudios en las últimas décadas.

a) Fauna

Según Dourojeanni (1976) entre otros mamíferos, se sabe de la existencia de la nutria, el mono, el puma, el oso hormiguero, el perezoso, el manco y el venado. En términos generales, la fauna ha sido diezmada, tanto por la caza como por la destrucción del hábitad esencial.

Son varios los animales de los que se tiene referencia que alguna vez estuvieron presentes, aunque no existen registros recientes de éstos, como es el caso de los primates y algunos felinos. Algunos autores indican que hasta hace 40 años era común registrar monos como musmuqui *Aotus sp.* y choro *Lagothrix sp.* en las cercanías de Machupicchu (CDC-UNALM, 2002).

A continuación se resume lo conocido sobre fauna hasta el momento para el ámbito del SHM (Galiano, 2000, 2005 y 2007; INRENA, 2005; CDC-UNALM, 2002). Para más detalles ver el Anexo 2.

- **Mamíferos**, 58 especies de las que 42 son mamíferos pequeños, siendo los más numerosos los murciélagos (24) y los roedores (12). Los mamíferos más grandes (16) se encuentran en un estado crítico, con poblaciones mínimas como: el oso de anteojos *Tremarctos ornatus*, taruca *Hippocamelus antisensis*, venado cola blanca *Odocoileus peruvianus*, tanka taruka *Mazama chunyi*, pudu o venado enano *Pudu mephistophilis* y la nutria o mayupuma *Lontra longicaudis*. Algunos felinos, primates (monos) y mustélidos se encuentran en situación incierta o ya no existen individuos en el SHM pues su reporte proviene de registros entre los años 1911-1930.
- **Aves**, 446 especies, entre los vertebrados es el grupo con mayor diversidad específica, contiene el 22% de la avifauna peruana. Las familias más numerosas corresponden a los Tiranidos o atrapamoscas (73), Traupidos o tangaras (54), Trochilidos o picaflores (33), Fumaridos o canasteros (25), Emberezidos (25) y Falconidos o rapaces (22). Entre las especies amenazadas y de notable colorido podemos mencionar al tunqui o gallito de las rocas *Rupcúla peruviana*; el tucan andino *Andigena hypoglauca*, el

relojero *Momotus aequatoriallis*, los quetzales *Pharomachrus antisanus*, *P. auriceps*, el cucarachero Inca *Thryothorus eisenmanni*.

- **Peces**, 13 especies, su estado de conservación es incierta, no se han realizado estudios desde los años veinte. Se reportaron especies endémicas como *Acrobycon ipanquianus*, *Bryconamericus pachacuti*, *B. grosvenori*, *Ceratobranchia binghami*.
- **Herpetofauna**, 37 especies. Que comprende 12 anfibios y 25 reptiles: (9 lagartijas y 16 culebras). Entre las especies endémicas podemos citar: *Gastrotheca ochoai*, *Liolaenus ortizii*, *Proctoporus guentheri* y *Stenocercus ochoai*.
- **Mariposas**, > 377 especies, es el grupo más estudiado de los invertebrados, comprende el 22% de las mariposas peruanas. Las especies endémicas son: *Cumaidocloidius cordillerae*, *Sibolia machupicchanus*, *Curtara picchua*, *Perumires machupichanua*.

b) Flora

La flora ha sufrido graves y probablemente irreversibles modificaciones. Por otro lado, la explotación forestal ha sido intensa. La construcción del ferrocarril ocasionó la casi total desaparición del cedro y del ulcumano, cuya explotación fue intensísima entre 1940 y 1965, lo mismo que la de otras especies, para proveer durmientes. Al pie de las ruinas de Mandor, donde hoy sólo pastan unas pocas vacas raquílicas, se han extraído cedros de hasta dos metros de diámetro (Dourojeanni, 1976).

En función a lo publicado por Galiano (2000, 2005 y 2007), INRENA (2005) y CDC-UNALM (2002), a continuación se resumen los diversos tipos de flora hasta ahora conocidas y registradas para el Santuario (ver Anexo 3):

- Entre **plantas vasculares y no vasculares** el SHM tiene un registro en progreso a la actualidad de > 3250 especies.
- En relación a las **angiospermas** y **gimnospermas** del Perú, que registra 17143 especies, en el SHM se tienen registradas hasta ahora 2880 especies (6 gimnospermas, 2774 angiospermas: 780 monocotiledóneas y 1994 dicotiledóneas) que representan el 15% de la flora nacional de esos grupos taxonómicos.
- El SHM alberga un 15% de las **especies endémicas** de la flora peruana.

- **Líquenes**, es el grupo menos conocido, se tienen registradas unas 20 especies.
- **Hongos**, otro grupo poco estudiado, se registran cerca de 20 especies.
- **Musgos**, > 200 especies.
- **Helechos**, 365 especies, que representan el 36.5% de la flora de helechos del país.
- **Monocotiledóneas**, 780 especies, las familias con más número de especies son las Orquídeas con 425 especies, las Gramíneas (Poaceae) con 155 especies y las Bromelias con 45 especies.
- **Dicotiledóneas**, 1994 especies, siendo las 10 familias más numerosas: Asteraceae (> 200), Solanaceae (77), Fabaceae (63), Rosaceae (48), Scrophulariaceae (42), Melastomataceae (40), Rubiaceae (40), Piperaceae (39), Ericaceae (34) y Campanulaceae (30).
- **Orquídeas**, > de 425 especies, es el grupo más atractivo y el que está sometido a mayor presión. En el SHM se concentra el 25 % de especies de orquídeas de la flora peruana. Existe un endemismo considerable y en los últimos años se han descrito varias especies nuevas para la ciencia.
- **Árboles**, > de 370 especies que pertenecen a 67 familias y 145 géneros. Las familias que tienen el mayor número de especies son: Lauraceae (26), Moraceae (17), Melastomataceae (16), Euphorbiaceae (14), Rosaceae (14), Solanaceae (14), Rubiaceae (14). Sólo Machupicchu tiene más especies de árboles que todo el continente europeo (300 especies). La diversidad arbórea en ecosistemas similares de bosques montanos húmedos en el mundo presentan un promedio de 50 spp/ha, el promedio en el SHM es de 90 spp/ha con 10 cm de dap.

c) Hábitats

El hábitat siempre se vincula a un animal o planta específicos, es decir, no puede hablarse de hábitat a solas (CDC-UNALM, 2002). A continuación se mencionan algunos:

- **Queñuales**: En el SHM los bosques de queñuales representan una superficie total de 316 ha, de las cuales el 56% (177 ha) es bosque homogéneo y el 41% (131 ha) es bosque heterogéneo. Se distribuyen desde los 3 200 a los 4 270 msnm. Las especies reportadas para el SHM son: *Plylepis pauta*, *P. seríceo*, *P. racemosa* y *P. peppei*. Los

bosque con mayor superficie se encuentran en la zona de Incatambo, Mesada, Palkay y Yanacocha; sin embargo, también se pueden encontrar pequeños relictos de bosque en: Chaupiwayqo, Quinsacocha, Pacaymayu, Warmiwañuska, Chakiqocha, Caracol, Pampaqawana, Runkurakay y Chakimayu (Arce y Toivonen, 2002). Adicionalmente, estos bosques son a su vez hábitat para 110 especies de aves, de las cuales varias son endémicas (Galiano, 2005).

- **Orquídeas:** según los últimos estudios realizados, las localidades con mayor diversidad de orquídeas son: Choquesuysuy (considerada como la zona que presenta mayor riqueza de orquídeas), Intiwatana, Aobamba alto, Km. 107, Incatambo, Runkuraqay, Phuyupatamarca, Wiñaywayna, Chachabamba, Putukusi, Mandor, y Qda. Aguas Calientes (Christenson, 2003).
- **Gallito de las rocas (*Rupicula peruviana*):** en el SHM el tunki o gallito de las rocas se encuentra hasta los 2 400 msnm y puede ser vista a lo largo del trayecto de la carretera entre la estación del ferrocarril de Puente Ruinas y el Valle de Mandor (Walker y Fjeldsa, 2001). El gallito de las rocas se encuentra catalogada como especie en situación vulnerable (INRENA, 2005).
- **Nutria, lobito de río o mayupuma (*Lontra longicaudis*):** en Machupicchu ha sido registrada varias veces en épocas recientes en el río Vilcanota entre los kilómetros 88 y 119 del ferrocarril (CDC-UNALM, 2002). Su hábitat está siendo perturbado en razón de las aguas negras y la basura plástica. La nutria se encuentra categorizada como especie en vías de extinción (INRENA, 2005; CDC-UNALM, 20002).
- **Pato de los torrentes (*Merganetta armata*):** reportado en las aguas torrentosas del Río Vilcanota, al pie de la Ciudadela Machupicchu y Q'oriwayrachina, y en el río Kusichaka. Es considerada común en el SHM, llegando hasta los 4 000 msnm en ríos y quebradas de aguas rápidas (INRENA, 2005).
- **Oso de anteojos (*Tremarctos ornatus*):** el área de distribución del oso andino del SHM cubre aproximadamente el 37% de su superficie y es un área que está sujeta a frecuentes incendios y a la actividad agrícola. Las poblaciones de esta especie están localizadas mayormente hacia el norte del río Vilcanota y el área estimada como hábitat de excelente calidad representa unas 8 900 ha; además se estima que deben

existir un aproximado de 20 individuos en todo el Santuario (Figuroa y Stucchi, 2002). El mejor hábitat para el oso de anteojos se encuentra en los bosques húmedos y muy húmedos montanos bajos (Peyton, 1984).

2.3.4 Diversidad ecológica

El término diversidad ecológica se refiere a la variedad de comunidades de plantas y animales y a la heterogeneidad de los ecosistemas. Al recorrer el Camino Inca, se observan nevados, montañas, lagunas, bosques, pajonales y otros paisajes lo que representa una gran diversidad de ecosistemas (Galiano, 2000). Según Miller (1980) no es suficiente conservar muestras representativas de cada tipo ecosistémico, sino el conjunto regional.

Debido a la ubicación y características varias del SHM, no existe un consenso en cuanto a su diversidad ecológica (ver Anexo 4). A continuación se muestra una breve descripción de las diversas clasificaciones ecológicas y/o propuestas de manejo para el ámbito del Santuario, las que difieren entre sí en los criterios aplicados, en las escalas utilizadas y en los resultados obtenidos.

a) Ecorregiones

Según la clasificación del CDC-UNALM (2006) el SHM posee muestras representativas de tres de las 21 ecorregiones del Perú. A continuación se describen brevemente:

- **Bosques Secos del Centro – Valles Interandinos**, esta ecorregión se caracteriza por la presencia de bosques secos en el fondo del valle y matorrales ralos semicaducifolios con matorrales con gramíneas a medida que se asciende a la Puna.
- **Puna de los Andes Centrales**, caracterizada por su aridez y oxígeno limitado, los cuales asociados a los cambios como sequías y heladas han favorecido al desarrollo de especies adaptadas a estas condiciones.
- **Yungas Peruanas**, se caracterizan por su vegetación densa, presentan una estructura vertical organizada en múltiples estratos que se desarrolla sobre terrenos con fisiografía extremadamente accidentada (por grandes pendientes).

b) Zonas de vida

El INRENA (1999) considera 9 Zonas de Vida; sin embargo, algunos autores como Galiano y Machicao (1995) o Acurio (1998 y 2000) citan 10 Zonas de Vida. En el proyecto "Ampliación del Inventario de la Diversidad Florística del SHM" realizado por la Universidad Nacional San Antonio Abad de Cusco para el Programa Machu Picchu se identifican, en total, 13 Zonas de Vida. El INRENA (2005) utilizó el esquema de 10 Zonas de Vida para la actualización del Plan Maestro del SHM, sin embargo, manifestó que en el futuro se necesitará mayor investigación sobre el tema.

El CDC-UNALM (2002) en un estudio compilatorio describen algunas características básicas de las nueve zonas de vida citadas por la mayoría de autores, pero aclaran que se ha obviado la zona de vida bosque húmedo - Montano Subtropical, ya que no se tiene seguridad sobre su ocurrencia en el Santuario. Por su parte, Galiano (2005) plantea y describe 14 Zonas de Vida para el ámbito del SHM (ver Anexo 4).

c) Pisos ecológicos

El CDC-UNALM (2002), en base a los estudios realizados por varios autores como Tupayachi y Galiano (1988), Monteagudo (1997), Galiano (2000) y Acurio (2000), identifica los siguientes pisos ecológicos y sus respectivas expresiones fisonómicas (más detalles son mostrados en el Anexo 5):

- **Bosque húmedo de montaña**, entre 1 850 – 2 000 metros (fondo de valle) y 2 600 msnm.
- **Vegetación arbórea, arbustiva y herbácea** (con alternancia de áreas desnudas donde predominan masas rocosas), entre 2 600 metros y 3 800 msnm.
- **Línea ecotónica y pajonal de puna**, sobre los 3 800 msnm hasta la línea de nieves (aprox. 4 600 msnm).
- **Piso nival**, paisaje totalmente yermo y cubierto de nieves eternas.

d) Elementos naturales metas de conservación

Galiano (2005), plantea que los elementos naturales meta de conservación del Santuario se encuentran en estado *regular*, y señala que se deben efectuar acciones contundentes, para su

mejoramiento y restauración ecológica. El agrupamiento planteado por el autor, se describe a continuación:

- **Bosques altoandinos de Polylepis:** su rango de distribución altitudinal en el SHM está entre los 3 200-4 500 msnm. Estos bosques, en apariencia homogéneos en su flora asociada, presentan una considerable diversidad. Su estado de conservación es crítico porque es sometida a tala indiscriminada, convirtiéndose en escasos remanentes en calidad de relictuales.
- **Pajonales altoandinos:** entre altitudes de 3 600-4 200 msnm, es contiguo al bosque de Polylepis; la vegetación dominante es de tipo gramínea. Esta formación es vulnerable a razón de que es dedicada al pastoreo de ganado doméstico; en parte es resultado de la los bosques altoandinos.
- **Humedales:** en el SHM, se localizan en las áreas próximas al Salkantay y Chullunku. Este grupo es potencialmente productor de agua y biomasa para pastizales de manera permanente, además alberga una importante diversidad de aves.
- **Bosques montanos mesoandinos:** es el grupo más afectado por la ampliación de la frontera agrícola. Se encuentra a una altitud de 3 300-3 700 msnm, debajo de los bosques de Polylepis. En el Santuario se encuentran entre el km. 87 a 97 y en la zona de Cusichaca hacia Huayllabamba.
- **Bosques húmedos montanos de ceja de selva:** se encuentran en un rango altitudinal de 2 200-3 800 msnm. Han sido pobremente explorados biológicamente, siendo objeto de una destrucción acelerada. Sólo el Camino Inca principal (Ruta 1) atraviesa más del 50% de este tipo de bosques. Presenta invasión de especies vegetales que corresponden al bosque seco y de especies introducidas invasoras.
- **Bosques secos de fondo de valle:** se encuentra entre las altitudes de 1 850-2 600 msnm. Esta zona es objeto de agricultura intensiva y sobre pastoreo. Muestras en buen estado se ubican entre el km. 82 y 96 (Piscacucho a Torontoy) y la zona ubicada entre el km. 120 y 127 del ferrocarril.

e) Sistemas ecológicos

Tovar *et al.* (2010) incluyen a Machupicchu dentro de las 46 áreas prioritarias para la conservación ecorregional de las Yungas Peruanas, reconociendo su importancia ecológica ya que en él se encuentran, afirman los autores, al menos 10 sistemas ecológicos objetos de conservación.

Esto cobra importancia si se toma en cuenta que, para esa misma ecorregión, el CDC-UNALM y TNC (2006) identificaron 21 sistemas ecológicos y Josse *et al.* (2007), en un estudio similar, encontraron 32 sistemas ecológicos, por lo que el SHM alberga prácticamente a la mitad o a la tercera parte de la diversidad natural de esa ecorregión.

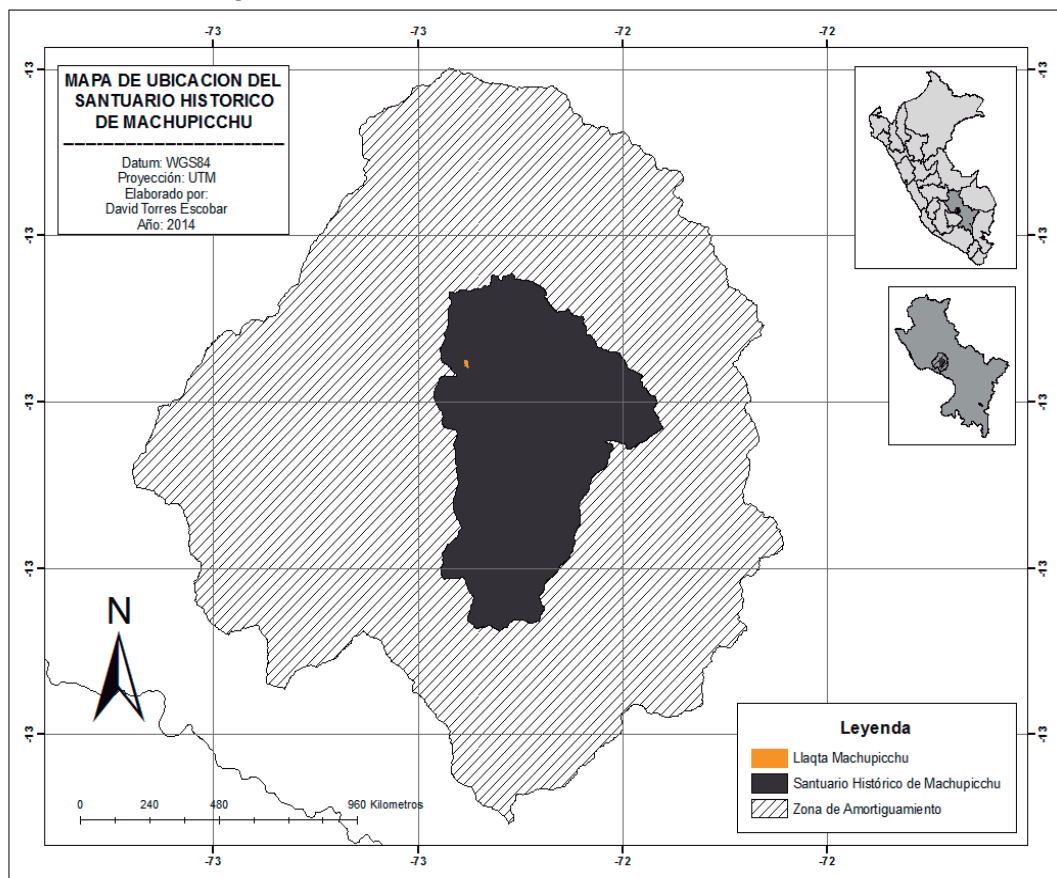
3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

3.1.1 Ubicación y extensión

La investigación fue realizada en el Santuario Histórico de Machupicchu (SHM), que está ubicado en Perú, en el Departamento de Cusco, Provincia de Urubamba, Distrito de Machupicchu, entre las coordenadas 13°13'00" y 13°13'08". Tiene una extensión de aproximadamente 38 000 ha y su rango altitudinal está entre los 1 800 y 6 264 msnm.

Figura 9: Ubicación del Santuario Histórico de Machupicchu y su Zona de Amortiguamiento.



Fuente: elaboración propia.

3.1.2 Características biofísicas

a) Clima

La precipitación media anual va entre los 1 000 y 1 950 mm (parte sur y nor-oeste, respectivamente), ocurren en los meses de noviembre a abril, pero alcanza sus niveles máximos en los meses de enero y febrero. En Machupicchu, zona típica de selva alta del sur del Perú, es evidente la mayor precipitación debido a la existencia de una intensa nubosidad convectiva. La temperatura media anual esta alrededor de los 15°C, con una marcada diferencia entre la parte sur y oeste debido, principalmente, a la diferencia de altitud (INRENA, 198).

b) Hidrografía

Hidrográficamente, el SHM pertenece a la cuenca del río Urubamba, en la vertiente del Atlántico. Tiene como curso principal al río Urubamba, entre el tramo comprendido entre su confluencia con la quebrada Misquipuquio, en la cota de 2 700 msnm, y la confluencia aguas abajo con el río Aobamba, en la cota 1 810 msnm. Tiene como límites a los ríos Cusichaca y Aobamba, los que a su vez son tributarios del Urubamba por la margen izquierda. Asimismo, presenta a los nevados Salkantay, Chullunku y la Verónica, que son una fuente importante de aportes a la escorrentía superficial (INRENA, 1998).

c) Fisiografía

El área de estudio presenta rasgos morfológicos que son el resultado de una larga evolución, originada por factores tectónicos y erosionales. Básicamente, en el Santuario se han identificado dos Grandes Paisajes, la Planicie y el Montañoso, que son bien definidos por las formas y características del relieve, la litología y los procesos de formación. Las formas de tierra varían desde superficies planas a plano-onduladas, con pendiente de ligera a fuertemente inclinadas (2-15%) en las partes más altas y en los fondos de valle, hasta superficies montañosas de bien accidentadas a escarpadas y taludes, con pendientes de fuertemente inclinadas a extremadamente empinadas (8->75%). (INRENA, 1998).

d) Cobertura vegetal

La Clasificación y caracterización de la cobertura vegetal del SHM se ha basado en criterios fisonómicos, fisiográficos y florísticos. En total, se han determinado nueve tipos de cobertura

vegetal (ver anexo 6). Los más importantes son, en cuanto a mayor superficie, el pajonal de puna (31.5%) y el bosque húmedo de montaña (24.2%) (INRENA, 1998).

3.2 Materiales y equipos

Para la ejecución del trabajo se utilizaron los materiales, equipos e instalaciones disponibles del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas–Santuario Histórico de Machupicchu (SERNANP-SHM) y del Geoservidor del Ministerio del Ambiente (MINAN). Los materiales y equipos utilizados se indican a continuación:

3.2.1 De campo

- Brújula
- GPS Garmin
- Carpa
- Bolsas de dormir
- Matras
- Cocina
- Gas propano
- Filmadora
- Cámara fotográfica
- Imagen SPOT impresa (ESC 1/80000, formato A-3)
- Mapa preliminar de Sistemas Ecológicos (ESC 1/80000, formato A-3)
- Fichas de evaluación
- Linternas
- Pilas
- Víveres

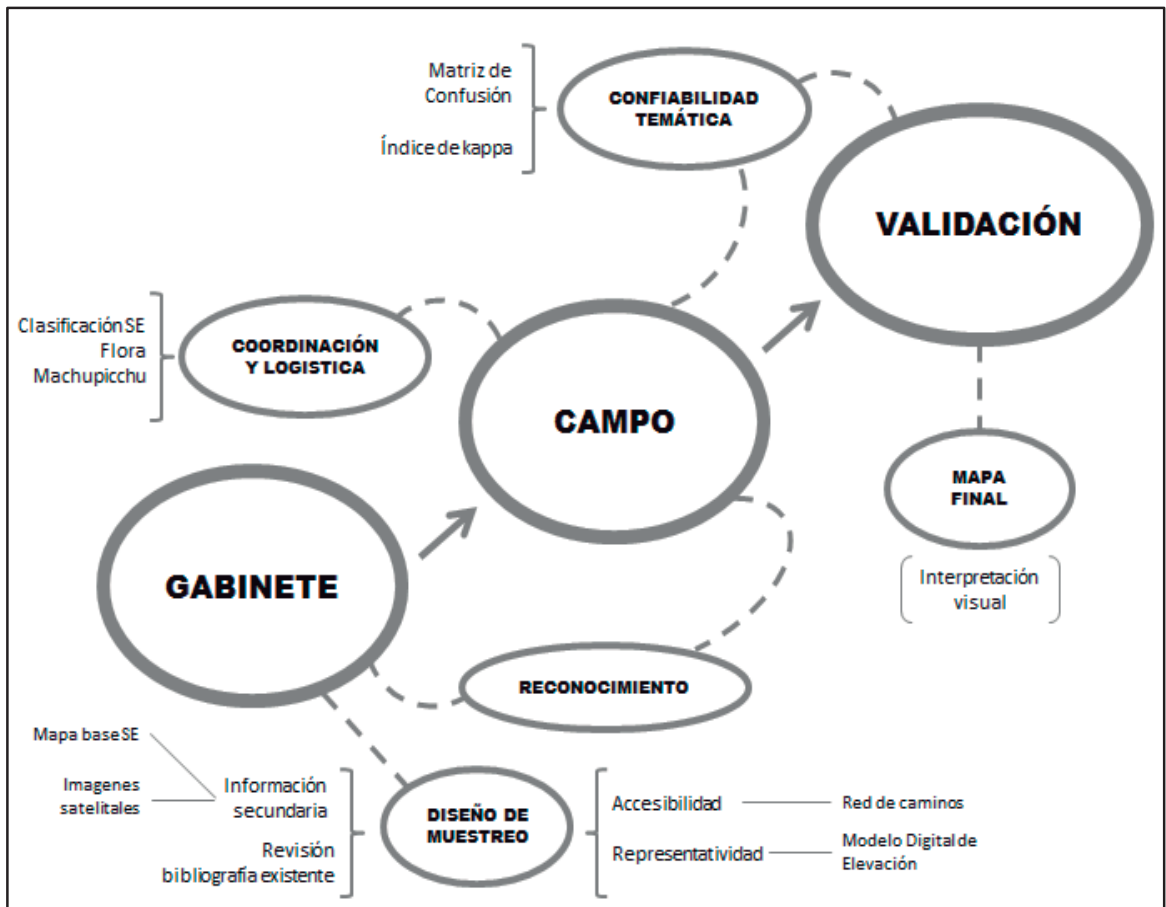
3.2.2 De gabinete

- Imagen SPOT en formato digital (resolución espacial de 2.5 m). Año 2010.
- Mosaico digital de ortofotos. Año 2000.
- Shape de Sistemas Ecológicos de los Andes para Perú. Año 2009.
- Hojas de la Carta Nacional a escala 1/100000: 27-q y 27-r.
- Mapa de Zonas de Vida en formato digital. Año 1998 y 2005.
- Mapa de Cobertura Vegetal en formato digital. Año 1998 y 2005.
- Computadora personal.
- Softwares ArcGis 9.3 y MapSource.
- Planes Maestros del SHM. Año 1998 y 2005.
- Libros e informes de trabajos ejecutados en el SHM anteriormente.

3.3 Metodología

La evaluación de la confiabilidad temática del mapa de Sistemas Ecológicos del Santuario Histórico de Machupicchu se desarrolló siguiendo un esquema o proceso de validación general, sugerido por McCoy, (2005) para proyectos de teledetección, que a su vez se ajustó a lo utilizado por Josse *et al.* (2007) para la validación del mapa de las Yungas (ver figura 10), finalmente todo esto fue adaptado de forma específica a la realidad natural del Santuario. A continuación se describen las siete etapas seguidas.

Figura 10: Esquema metodológico.



Fuente: elaboración propia.

3.3.1 Definición de objetivos

Con el objetivo general de validar el mapa de Ecosistemas de los Andes Tropicales (Josse *et al.* 2009) para el ámbito del SHM, se vio por conveniente evaluar su confiabilidad a partir de información levantada en campo y analizada mediante una matriz de confusión y parámetros estadísticos. Con el respaldo de los resultados obtenidos, se prosiguió con la edición y/o ajuste del mapa base y su memoria descriptiva (NatureServe, 2009), con la intención de generar el mapa final de Sistemas Ecológicos del Santuario Histórico de Machupicchu.

3.3.2 Recopilación bibliográfica y cartográfica

En esta etapa se tuvo que revisar información relacionada a la evaluación de confiabilidad de mapas, la clasificación de sistemas ecológicos y el componente natural del SHM. Esta información se encontraba dispersa, sin embargo, fue obtenida en el Centro de Documentación e Información Forestal (CEDINFOR), el Centro de Datos para la Conservación (CDC), el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas-Santuario Histórico de Machupicchu (SERNANP-SHM) y a través de búsquedas por internet.

Los documentos (libros, informes, artículos, etc.), mapas (digitales y físicos) y bases de datos (cuantitativas y cualitativas) obtenidos fueron revisados y organizados, teniendo en cuenta su utilidad, por un lado, para la mejor comprensión de los temas objeto de estudio y, por otro lado, para definir el método a usar y discutir los resultados generados.

3.3.3 Planificación del trabajo de campo

En esta etapa se partió del mapa base obtenido al extraer del mapa de Ecosistemas de los Andes Tropicales la porción correspondiente al Santuario. El mapa base, que contenía el área y el objeto de estudio, es decir, al Santuario y a sus Sistemas Ecológicos preliminares, fue el escenario fundamental sobre el cual se ejecutó el diseño de muestreo.

a) Mapa base

Este mapa resultó con 13 Sistemas Ecológicos, distribuidos en 57 polígonos, para las 37 379 ha del SHM (ver Cuadro 06), incluía una clase no ecológica y no consideraba los cuerpos de agua. Estos Sistemas Ecológicos fueron modelados usando interpretación de imágenes de satélite,

bases de datos bióticas y abióticas y trabajo de campo; se trabajaron a una escala aproximada de 1:250 000, con una unidad mínima de mapeo de 25 ha y un error en los límites de ± 100 m.

b) Diseño de muestreo

Se optó por usar un muestreo aleatorio estratificado. El área fue estratificada por Sistema Ecológico, es decir, cada Sistema era un estrato, con esto se aseguraba que los Sistemas con áreas pequeñas también fueran adecuadamente evaluados. El tamaño de muestra mínimo requerido para lograr la validez estadística, se obtuvo asumiendo el modelo multinomial de distribución de los datos, para el cálculo se utilizaron un 95% de nivel de confianza, una estimación del acierto de 50% y un error de 10% (ver Ec. 03, Pág. 13).

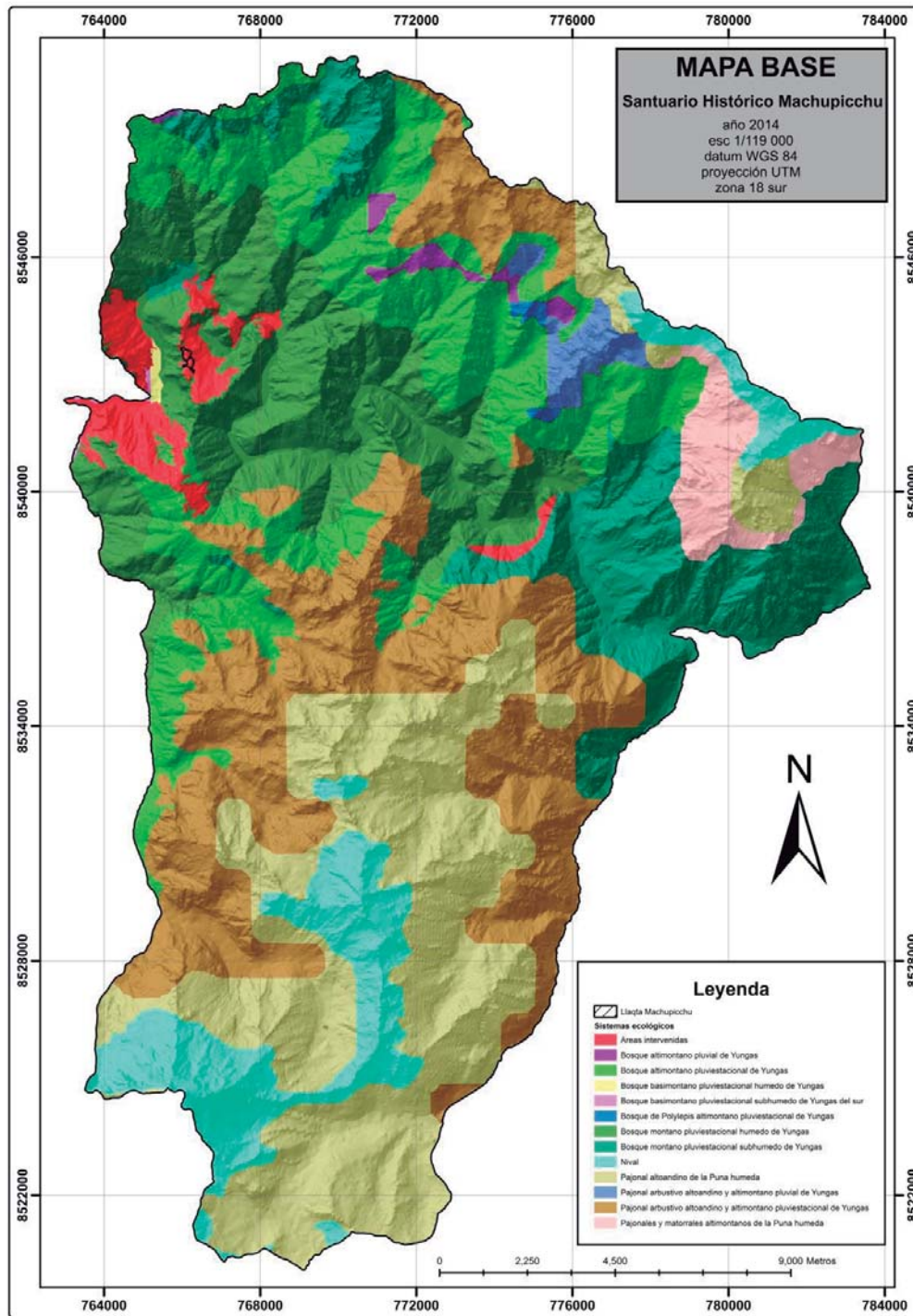
$$n = \frac{B(1 - \prod_i)}{\prod_i b^2}$$

El resultado se plasmó de forma gráfica en el mapa base. A través de un análisis SIG, se utilizaron los siguientes insumos en formato digital: una imagen de alta resolución (2.5 m) del año 2010, un mosaico de fotografías aéreas del año 2000, un modelo de elevación del terreno, curvas de nivel, el mapa base y la red de caminos para una aproximación más precisa.

Los criterios que se tomaron en cuenta para la selección definitiva de los puntos a ser evaluados en campo fueron: la existencia de vegetación, su accesibilidad desde los caminos existentes y la presencia en diferentes niveles altitudinales.

Así entonces, se determinaron 126 muestras distribuidas en toda la extensión del Santuario. Para obtener una mayor representatividad y solides estadística se incrementó el número de muestras en un 25% con lo que se establecieron 156 (Ver cuadro 07). El tipo de muestra usado fue el punto, con la intención de evaluar su área circundante desde el punto pero también durante el trayecto para tener un panorama más completo de la muestra.

Figura 11: Mapa base.



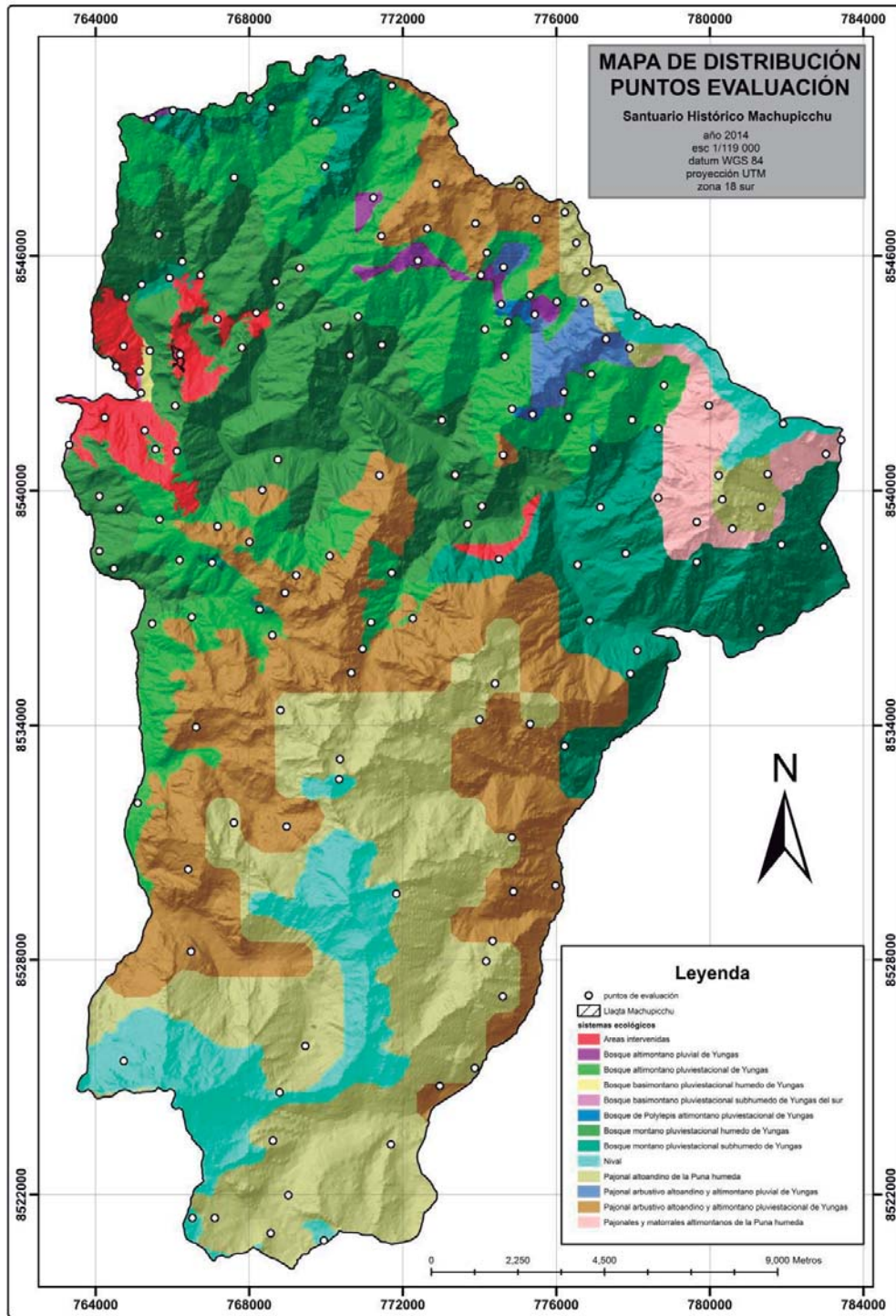
Fuente: Josse *et al.* (2009).

Cuadro 5: Mapa base.

N°	SISTEMAS	CÓDIGO NATURESERVE	ÁREA (ha)	POLIGONOS	PROPORCIÓN (%)
1	Áreas intervenidas		979	7	3
2	Nival		2979	5	8
3	Bosque altimontano pluvial de yungas	CES409.043	215	5	1
4	Bosque altimontano pluviestacional de yungas	CES409.044	6006	6	16
5	Bosque basimontano pluviestacional húmedo de yungas	CES409.054	36	1	0
6	Bosque basimontano pluviestacional subhúmedo de yungas	CES409.053	15	2	0
7	Bosque montano pluviestacional húmedo de yungas	CES409.051	5769	3	15
8	Bosque montano pluviestacional subhúmedo de yungas	CES409.921	4225	11	11
9	Bosque de Polylepis altimontano pluviestacional de yungas	CES409.046	70	2	0
10	Pajonal altoandino de la puna húmeda	CES409.084	7911	5	21
11	Pajonal arbustivo altoandino y altimontano pluviestacional de yungas	CES409.059	7778	5	21
12	Pajonales y matorrales altimontanos de la puna húmeda	CES409.087	958	2	3
13	Pajonal arbustivo altoandino y altimontano pluvial de yungas	CES409.058	438	3	1
	TOTAL		37379	57	100

Fuente: elaboración propia.

Figura 12: Distribución de los 156 puntos de muestreo.



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 6: Distribución de los puntos de evaluación.

N°	SISTEMAS	CÓDIGO	Nt	Np
1	Áreas intervenidas		3.3	6
2	Nival		10.4	8
3	Bosque altimontano pluvial de yungas	CES409.043	0.72	5
4	Bosque altimontano pluviestacional de yungas	CES409.044	20.24	23
5	Bosque basimontano pluviestacional húmedo de yungas	CES409.054	0.12	1
6	Bosque basimontano pluviestacional subhúmedo de yungas	CES409.053	0.05	3
7	Bosque montano pluviestacional húmedo de yungas	CES409.051	19.45	22
8	Bosque montano pluviestacional subhúmedo de yungas	CES409.921	14.24	24
9	Bosque de <i>Polylepis</i> altimontano pluviestacional de yungas	CES409.046	0.24	4
10	Pajonal altoandino de la puna húmeda	CES409.084	26.67	27
11	Pajonal arbustivo altoandino y altimontano pluviestacional de yungas	CES409.059	26.22	23
12	Pajonales y matorrales altimontanos de la puna húmeda	CES409.087	3.23	5
13	Pajonal arbustivo altoandino y altimontano pluvial de yungas	CES409.058	1.48	5
	TOTAL		126	156

Fuente: elaboración propia. (Nt: N° teórico/formula; Np: N° práctico)

c) Detalles adicionales

La evaluación de los puntos se realizó a través de fichas impresas. El modelo utilizado fue adaptado del aplicado por Josse *et al.* (2007) en la validación del mapa de Sistemas Ecológicos de las Yungas Peruanas (ver anexo 7). El área de estudio se dividió en tres zonas, debido a la existencia de caminos o vías troncales que permitían acceder a la mayor cantidad de puntos.

- norte (márgenes del río Urubamba, ascendiendo por las quebradas),
- centro (área accesible desde ambas márgenes de la ruta 1 de camino Inka)
- sur (margen izquierda del río Cusichaca - Palkay – margen derecha del río Ahobamba, y Salkantay - Incachiriasca).

3.3.4 Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en salidas a los puntos preestablecidos en las zonas norte, centro y sur (en ese orden) del Santuario. La toma de datos se realizó en base a la ficha de evaluación desarrollada en la etapa previa (ver Anexo 7), con el cual se verificaron *in situ* la ocurrencia de los Sistemas Ecológicos. El equipo de campo estuvo conformado por tres personas que

contaban con experiencia en trabajos relacionados en Áreas Protegidas, Sistemas de Información Geográfica, Sistemas Ecológicos y Botánica, además anteriormente habían realizado trabajos en el Santuario.

La evaluación de los puntos se basó en un proceso iterativo de síntesis de información en dos sentidos: de lo particular a lo general y de lo general a lo particular, es decir, primero, se estudió lo establecido en la Memoria Descriptiva de los Ecosistemas de los Andes elaborado por NatureServe (2009), para luego, verificar su ocurrencia o no en la realidad y complementar o ajustar la descripción acorde con lo que se encuentra en campo.

Durante un trabajo de campo de más de treinta días para la evaluación de los puntos de verificación se generó información sobre la fisonomía vegetal, el rango altitudinal y la presencia de los géneros diagnósticos de cada Sistema Ecológico. Adicionalmente, se realizó un registro fotográfico múltiple, de las características más resaltantes de los ambientes recorridos dentro del Santuario.

Todos los tramos fueron realizados a pie siguiendo gran parte de las 51 rutas determinadas por el trabajo de investigación de Torres (2012). El trabajo se realizó en campamentos y en los puestos de control y vigilancia del SERNANP-SHM para ordenar la información recolectada hasta el momento y también para conversar con los guardaparques sobre temas puntuales que permitieron realizar con más eficiencia el trabajo. Al mismo tiempo, esos momentos fueron aprovechados para explicar al personal de campo en qué consistía la investigación y como podía ser usada.

Durante el trabajo de campo se utilizaron una imagen satelital y el mapa base, ambos impresos en formato A-3 y a escala 1/80 000. Estos insumos fueron usados de forma complementaria a las fichas pues en ellos estaban ubicados gráficamente los puntos, que a su vez estaban ordenados en una hoja A-4 impresa con sus respectivas coordenadas UTM (ver Figura 12).

3.3.5 Procesamiento de información

Para realizar la validación del mapa se generó una base de datos organizando la información de las fichas traídas del campo, es decir, los tipos de fisonomía y todos los géneros indicadores de

cada Sistema Ecológico, así como su relación con los rangos altitudinales y observaciones adicionales.

Una vez procesadas las fichas o formatos de cada punto, los datos finales (SÍ ES o NO ES) fueron procesados a través de una Matriz de Confusión para posteriormente calcular la fiabilidad global y el índice de kappa, con esto se determinó la confiabilidad temática del mapa base. Los resultados de las fichas también fueron utilizados como guía para la edición del mapa. Las ecuaciones usadas fueron (ver Ec. 05, Pág. 17; Cuadro 02 y Ec. 12 Pág. 20):

$$F = \frac{\sum P_o}{n} \qquad K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c}$$

3.3.6 Interpretación visual

La edición del mapa se realizó para mejorar algunos límites que no contaban con los suficientes vértices, ofreciendo así la apariencia de cuadrados grandes con poco detalle. Para realizar el ajuste de los límites de los Sistemas Ecológicos se utilizó la interpretación visual pues se contaba con buen conocimiento de la realidad biofísica del área, imágenes actuales de alta resolución, así como con documentos bibliográficos y cartográficos para el ámbito del Santuario.

Este trabajo se organizó utilizando una grilla de 435 polígonos, de 100 ha cada uno a excepción de los del borde, que sirvió como un marco para ejecutar de forma ordenada la edición de los límites. El orden seguido fue la numeración, en sentido de menor a mayor. (Ver Figura 13). Finalmente, es importante mencionar que la escala de trabajo fue de 1:10 000 y la unidad mínima de mapeo fue igual a 5 ha. De esta forma se obtuvo el mapa final de sistemas ecológicos del Santuario Histórico de Machupicchu.

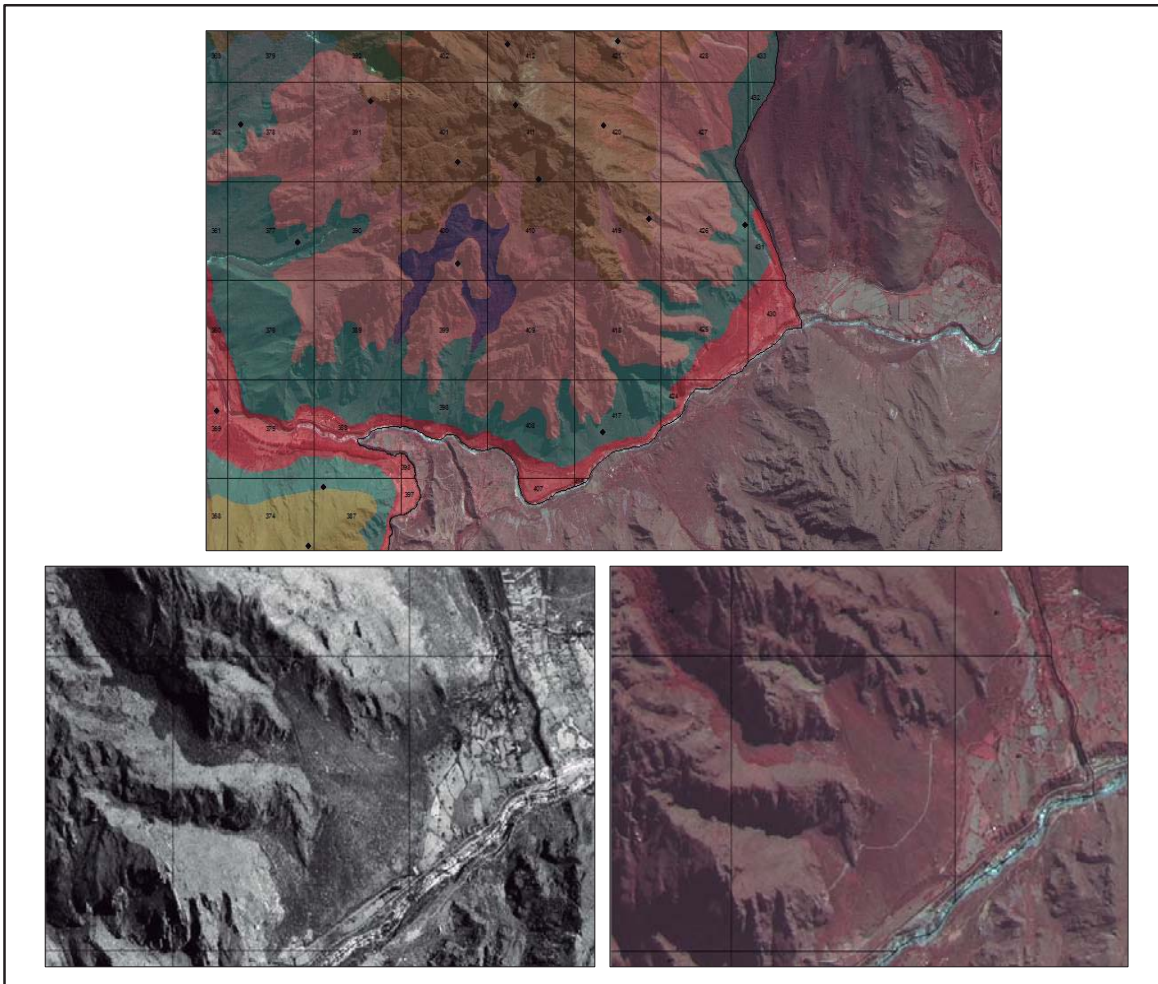
3.3.7 Descripción de unidades

En esta etapa se adaptó la información presentada por NatureServe (2009), que estaba a una escala ecorregional, a la realidad del SHM utilizando como filtro la información publicada específicamente para el área del Santuario (escala local). Se utilizaron en el proceso los resultados y las recomendaciones de estudios ejecutados anteriormente, principalmente los de:

Peyton (1984), INRENA (1998 y 2005), Ochoa y Trujillo (2000), Arce y Toivonen (2002), CDC-UNALM (2002) y Galiano (2000 y 2005).

Esta parte del trabajo se enfocó principalmente a los géneros y especies diagnósticos de flora para cada Sistema Ecológico evaluado, pero también fue importante introducir en las descripciones la toponimia de la zona, específicamente, los nombres de los ríos, quebradas, nevados y centros poblados. Finalmente, cada Sistema cuenta en su descripción con información acerca de su ubicación, rango altitudinal, condiciones climáticas, composición florística y de sus principales presiones.

Figura 13: Esquema de interpretación visual.



Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Confiabilidad temática

Debido a lo inaccesible de algunas zonas y también a las condiciones climáticas adversas, sólo se consiguió evaluar en campo 109 puntos, de los 156 propuestos, en las cuatro salidas prolongadas y otras visitas cortas. En la Figura 14 y en el cuadro 08 se muestra su distribución.

En el presente trabajo la confiabilidad global del mapa tuvo un valor de 0.76 (0.76%), mientras que el índice de kappa fue 0.72 (72%) (Ver cuadro 09). Congalton (1991), entre otros, afirman que un valor de índice de kappa mayor a 0.8 representa una fuerte correspondencia, un valor entre 0.4 y 0.8 representa una correspondencia moderada, y un valor por debajo de 0.4 representa una correspondencia pobre.

Durante el diseño de muestreo se determinó que los puntos estén separados al menos unos 500 m entre sí. De esta forma, las muestras tenían mayor grado de independencia, esto afectó indirectamente la cantidad de puntos de evaluación establecidos, que dicho sea de paso, no alcanzaron la cantidad mínima (30-50 puntos por clase) sugerida por varios autores (Congalton y Green, 2009; Stehman y Czaplewski, 1998).

Tres Sistemas Ecológicos (Bosque altimontano pluvial de yungas, CES409.043; Bosque basimontano pluvial subhúmedo de yungas, CES409.053; Pajonal arbustivo altoandino y altimontano pluvial de yungas, CES409.058) no se evaluaron en campo a través de la ficha, sin embargo, al igual que el resto de sistemas, fueron verificados durante el proceso de interpretación para el mapa final. El Sistema Ecológico Bosque de Polylepis altimontano pluvial de Yungas (CES409.046), si bien no tuvo una evaluación directa en las clases descritas en el mapa base, su verificación se dio en zonas no establecidas por dicho mapa, es decir, fueron observaciones de fichas con resultado negativo (NO ES) de Sistemas que finalmente resultaron ser Bosques de Polylepis.

La evaluación de los muestras, sobre todo para la parte florística, se realizó en un radio promedio de 100 m alrededor de los puntos, tal como lo recomiendan McCoy (2005) o

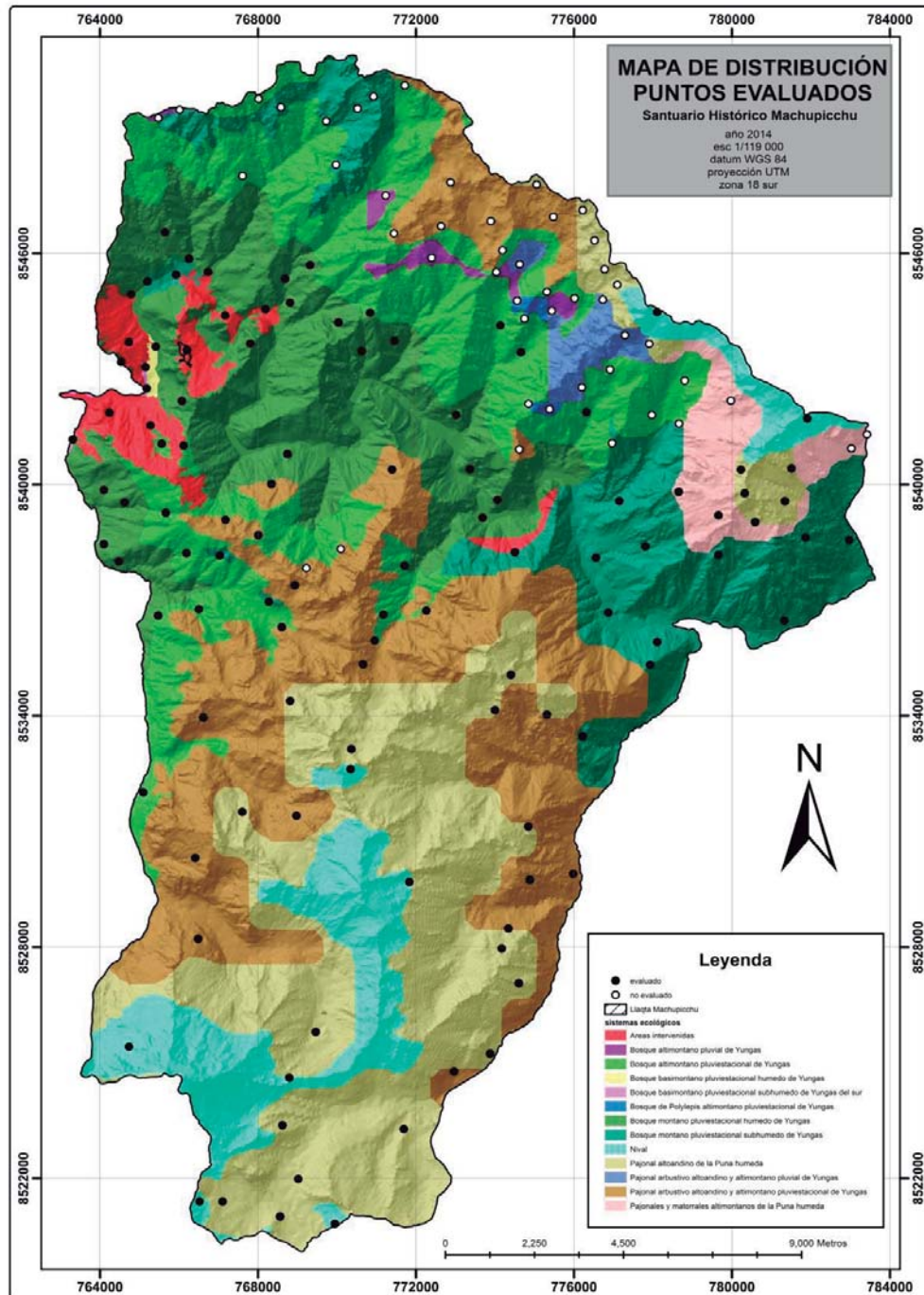
Stehman y Czaplowski (1998), esto fue bastante irregular durante el desarrollo del proyecto, dependiendo de las características de la zona. No se logró llegar a las coordenadas exactas de algunos puntos (30%, aproximadamente) por lo que éstos fueron evaluados desde los miradores o puntos altos, que permitían tener un panorama con menor detalle pero con buena perspectiva.

Cuadro 7: Distribución de fichas evaluadas en campo.

N°	SISTEMAS ECOLÓGICOS	CÓDIGO	Np	FICHA
1	Áreas intervenidas	-	6	8
2	Nival	-	8	6
3	Bosque altimontano pluvial de yungas	CES409.043	5	0
4	Bosque altimontano pluviestacional de yungas	CES409.044	23	13
5	Bosque basimontano pluviestacional húmedo de yungas	CES409.054	1	1
6	Bosque basimontano pluviestacional subhúmedo de yungas	CES409.053	3	3
7	Bosque montano pluviestacional húmedo de yungas	CES409.051	22	22
8	Bosque montano pluviestacional subhúmedo de yungas	CES409.921	24	18
9	Bosque de Polylepis altimontano pluviestacional de Yungas	CES409.046	4	0
10	Pajonal altoandino de la puna húmeda	CES409.084	27	21
11	Pajonal arbustivo altoandino y altimontano pluviestacional de yungas	CES409.059	23	15
12	Pajonales y matorrales altimontanos de la puna húmeda	CES409.087	5	2
13	Pajonal arbustivo altoandino y altimontano pluvial de yungas	CES409.058	5	0
	TOTAL		156	109

Fuente: elaboración propia (Np: N° práctico/ideal).

Figura 14: Distribución de los 109 puntos evaluados (de color negro los puntos evaluados en campo).



Fuente: elaboración propia

Cuadro 8: Matriz de confusión de los puntos evaluados en campo.

	DATO CAMPO											Puntos mapa	Error de Comisión		
	AI	Nival	CES409.043	CES409.044	CES409.054	CES409.053	CES409.051	CES409.921	CES409.046	CES409.084	CES409.059			CES409.087	CES409.058
AI	4					2								6	0.33
Nival		8												8	0
CES409.043			-											0	-
CES409.044				13										13	0
CES409.054					1									1	0
CES409.053					3	-								3	1
CES409.051	3					18				1				22	0.18
CES409.921				2		5	7			1	3			18	0.61
CES409.046									-					0	-
CES409.084		1						1	18	1				21	0.14
CES409.059				1				1	1	12				15	0.2
CES409.087											2			2	0
CES409.058													-	0	
Puntos dato	7	9	0	16	4	0	25	7	2	19	15	5	0	109	
Error de Omisión	0.43	0.11	-	0.19	0.75	-	0.28	0	1	0.05	0.2	0.6	-		

Fuente: elaboración propia.

4.2 Sistemas Ecológicos del Santuario Histórico de Macchupicchu

Las imágenes satelitales interpretadas, independientemente de su resolución espacial, incluyen píxeles mixtos, ya sea en situaciones de borde, en ecotonos o en zonas de transición entre una cobertura y otra, por lo que su validación representa algunos desafíos (Josse *et al.* 2007). En Machupicchu esto es aún más crítico debido a su accidentada geografía y a su diversidad ecológica.

La edición del mapa base se realizó mediante interpretación visual de una imagen satelital con resolución espacial de 2.5 m complementada con información de 109 puntos evaluados en campo. Al mapear tipos de bosque mediante interpretación visual Malleux (2007) afirma que se consigue una gran ventaja frente al método de interpretación digital, mientras que McCoy (2005), entre otros, aseguran que la interpretación visual o digital por sí solas no alcanzan la precisión necesaria si no son acompañados por información de campo levantada específicamente para el proyecto de validación.

Finalizada la evaluación de la confiabilidad del mapa base se pasó al proceso de ajuste o edición, el cual si bien no tuvo participación en el análisis cuantitativo de la validación, fue fundamental para complementar de forma cualitativa la información recogida en las fichas. Se trató que la edición fuera lo más detallada posible especialmente en los polígonos con pocas fichas y, sobre todo, en los de ubicación y/o forma no comprobada.

El proceso de edición se ordenó en base a una grilla de 435 cuadrados de 100 ha cada uno (los del perímetro son analizados de forma parcial). El área de los cuadrados se determinó debido a que permitía su visualización completa en la plataforma del software utilizado a una escala de 1:10 000 (ver Figura 13). La escala a la que Josse *et al.* (2009) trabajaron el mapa base fue de 1:250 000, es decir, el ajuste para el ámbito del SHM se realizó con un nivel de detalle 25 veces más grande, lo que se refleja en la unidad mínima de mapeo utilizada (5 ha), aunque en algunos casos se trabajó a niveles más finos, como en las Áreas Intervenidas, debido a la información con que se contaba.

Luego del proceso de validación (en campo y gabinete) se obtuvo que el SHM contiene muestras representativas de 12 Sistemas Ecológicos (SE), siendo 11 de orden natural y 1

modificado por el hombre. Al agruparlos se tiene que el 41% del Santuario presenta una ocurrencia de sistemas de tipo bosque (6 SE), 44% de tipo pajonal (4 SE), 10% con cobertura nival (1 SE) y el 5% restante corresponde a las áreas intervenidas (1 SE). Los resultados ordenados y cuantificados se muestran en el Cuadro 9.

NatureServe (2009) propuso una serie de especies diagnósticas muchas de las cuales no fueron identificadas en el SHM, ni en el campo ni, especialmente, en los inventarios botánicos existentes; por tal motivo se decidió trabajar a nivel de género con algunas excepciones que contaban con respaldo bibliográfico.

Como resultado del trabajo de campo y la interpretación visual durante la edición, el Sistema Ecológico Bosque basimontano pluviestacional subhúmedo de Yungas (CES409.053) propuesto en el mapa base fue descartado por no coincidir con lo que establecía la memoria descriptiva de tal Sistema para los parámetros florístico y altitudinal, entre otros.

En función a los resultados y recomendaciones de estudios relacionados a los bosques de Polylepis del SHM (Arce y Toivonen (2002), principalmente), los polígonos del Sistema Ecológico Bosque de Polylepis altimontano pluviestacional de Yungas (CES409.046) no sólo fueron cambiados de lugar sino también aumentados en número, pues se generó nuevos en la parte sur y suroeste del Santuario.

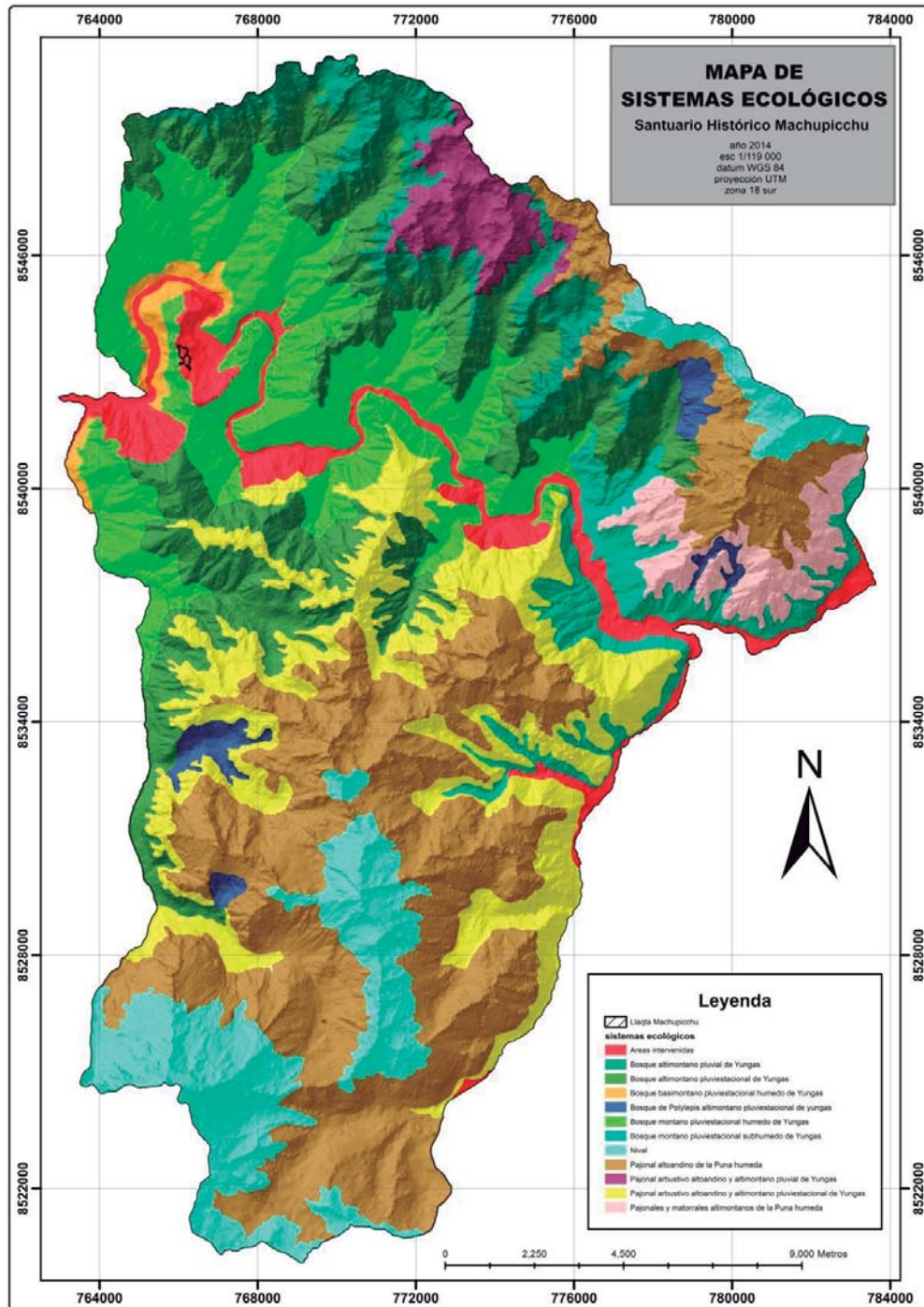
A continuación, en la Figura 15 se muestra el mapa final obtenido que representa los doce sistemas ecológicos presentes en el Santuario Histórico de Machupicchu. La descripción y fotografías de cada sistema ecológico se muestran en el Anexo 8 y 9, respectivamente.

Cuadro 9: Sistemas Ecológicos del Santuario Histórico de Machupicchu.

Nº	SISTEMAS ECOLÓGICOS	CÓDIGO	ÁREA 1		ÁREA 2		SHM %
			ha	%	ha	%	
1	Áreas intervenidas	-	979	3	1 858	5	5
2	Nival	-	2 979	8	3 688	10	10
3	Bosque altimontano pluvial de Yungas	CES409.043	215	1	1 982	5	
4	Bosque altimontano pluviestacional de Yungas	CES409.044	6 006	16	5 290	14	
5	Bosque basimontano pluviestacional húmedo de Yungas	CES409.054	36	0	347	1	
6	Bosque basimontano pluviestacional subhúmedo de Yungas	CES409.053	15	0	-	-	41
7	Bosque montano pluviestacional húmedo de Yungas	CES409.051	5 769	15	5 567	15	
8	Bosque montano pluviestacional subhúmedo de Yungas	CES409.921	4 225	11	1 540	4	
9	Bosque de Polylepis altimontano pluviestacional de Yungas	CES409.046	70	0	510	1	
10	Pajonal altoandino de la Puna húmeda	CES409.084	7 911	21	10 043	27	
11	Pajonal arbustivo altoandino y altimontano pluviestacional de Yungas	CES409.059	7 778	21	4 560	12	44
12	Pajonales y matorrales altimontanos de la Puna húmeda	CES409.087	958	3	1 055	3	
13	Pajonal arbustivo altoandino y altimontano pluvial de Yungas	CES409.058	438	1	938	3	
	TOTAL		37 379	100	37 378	100	100

Fuente: elaboración propia.

Figura 15: Mapa de Sistemas Ecológicos del Santuario Histórico de Machupicchu.



Fuente: elaboración propia.

5. *CONCLUSIONES*

- El mapa de Ecosistemas de los Andes, en el ámbito del Santuario Histórico de Machupicchu (SHM), tiene una correspondencia moderada, muy cercana a fuerte, con la realidad. Esto ratifica el buen nivel de detalle que poseen los trabajos de mapeo de Sistemas Ecológicos, lo que permite su ajuste a una escala local.
- El rigor estadístico teóricamente exigido para el proceso de evaluación de la confiabilidad temática de mapas, sobre todo en lo referente al muestreo, difícilmente será cumplido debido a razones logísticas y presupuestales, por lo que asumir ciertas condiciones resulta no sólo práctico sino que es, además, necesario.
- Es importante que los mapas incluyan en su memoria descriptiva la estimación de la precisión del mapa publicado, la cual debe contener la información completa acerca de su desarrollo así como su metadata. Incluso, sería más recomendable y ordenado presentar esto como un informe a parte.
- El mapa final obtenido representa el documento cartográfico de mayor detalle que se ha elaborado para el SHM, además lo vincula a la clasificación ecológica más completa que existe para todo el continente americano (Sistemas Ecológicos) y que actualmente viene siendo manejada a nivel mundial.
- Ajustar el mapa de Ecosistemas de los Andes Tropicales al ámbito del SHM permitirá utilizar los resultados de dicho trabajo no sólo a escala ecorregional sino que ahora también podrán ser usados en la toma de decisiones locales para el ámbito concreto del Santuario y con esto ser una herramienta para su gestión.
- El SHM es la primera área protegida del Perú que implementa técnicamente la clasificación de Sistemas Ecológicos, estableciendo así un precedente concreto y útil para el cumplimiento de esta tarea en el resto de áreas protegidas.

6. RECOMENDACIONES

- En base a la revisión bibliográfica y lo encontrado al desarrollar este trabajo es recomendable que en futuros proyectos similares se determine el número de muestras siguiendo un modelo multinomial, aunque con esto se eleve el número de muestras a ser evaluadas.
- La verificación doble, es decir, desde el campo y mediante interpretación visual de imágenes satelitales, es el método más recomendable para conseguir la evaluación de una mayor cantidad de muestras, sino es que de su totalidad. La interpretación visual como parte del proceso de edición o ajuste del mapa final puede generar información sobre las muestras no evaluadas en campo, que a su vez podría ser ordenada en una matriz de confusión y generar su propio índice de kappa. Luego los datos de campo y digitales serían introducidos a una matriz combinada y a partir de ella se calcularían los resultados promedios para el total de las muestras.
- Para ejecutar proyectos de validación, no sólo de mapas ecológicos o de vegetación sino de cualquier clasificación, es clave comenzar con el estudio detallado del proceso de elaboración del mapa a evaluar y sus objetivos, para tener un mejor nivel de referencia y ejecutar mejor el diseño de muestreo y la fase de campo.
- Se recomienda el uso de los resultados de este estudio como insumo para la zonificación ecológica del Santuario así como para la evaluación de los servicios ecosistémicos existentes.
- Si bien los doce ecosistemas establecidos están dentro de un Área Protegida, su estado de conservación o potencialidad no es el mismo por lo que éstos deben ser determinados para que posteriormente sea complementado con la elaboración de mediadas técnicas necesarias para su recuperación o aprovechamiento (investigación, ecoturismo y servicios ecosistémicos, principalmente) según sea el caso.
- La propuesta final de este trabajo, el mapa y su memoria descriptiva, debe servir como un marco o base sobre la cual se ordenen los resultados obtenidos en los inventarios y otros estudios (antiguos y futuros) realizados en el Santuario, especialmente sobre flora y servicios ecosistémicos.

7. **BIBLIOGRAFÍA**

- Agusti, F.** 2003. Gestión Ambiental del Camino Inca a Machupicchu: Diagnostico y propuestas de solución. Cusco, IMAPI. 67 p.
- Arce, R. y Toivonen, J.** 2002. Estudio de los bosques del género *Polylepis* en el Santuario Histórico de Machupicchu. Cusco, INRENA. 84 p.
- Bow, J.; Josse, C.; Sayre, L.; Sotomayor, L. y Touval, J.** 2008. Terrestrial ecosystems of South America. Arlington, TNC. 46 p.
- Brack, A.** 1986. Ecología de un país complejo. **In** Gran geografía del Perú: naturaleza y hombre. Vol. 2. Barcelona. p. 177-319.
- CANDES (Consultores Asociados en Naturaleza y Desarrollo).** 2010. Límite de cambio aceptable y capacidad de carga de la red de caminos Inca y la ciudadela de Machupicchu. Cusco, MINCETUR. 209 p.
- CDC-UNALM (Centro de Datos para la Conservación-Universidad Nacional Agraria La Molina).** 2002. Biodiversidad del Santuario Histórico de Machupicchu: estado actual del conocimiento. Lima, PROFONANPE. 278 p.
- CDC-UNALM (Centro de Datos para la Conservación-Universidad Nacional Agraria La Molina).** 2006a. Análisis del recubrimiento ecológico del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. Lima, TNC. 148 p.
- CDC-UNALM (Centro de Datos para la Conservación-Universidad Nacional Agraria La Molina).** 2006b. Planificación para la conservación ecorregional de las Yungas Peruanas: conservando la diversidad natural de la selva alta del Perú. Lima, TNC. 207p.
- CDC-UNALM (Centro de Datos para la Conservación-Universidad Nacional Agraria La Molina).** 2008. Planificación para la conservación ecorregional del Desierto de Sechura. Lima, TNC. 180 p.

- Christenson, E.** 2003. Machu Picchu: orquídeas. Lima, INRENA. 166 p.
- Chuvieco, E.** 2010. Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio. España, Ariel. 590 p.
- Congalton, R.** 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 37: 35-46.
- Congalton, R.** 2001. Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information. *International Journal of Wildland Fire* 10: 321-328.
- Congalton, R. and Green, K.** 1993. A practical look at the sources of confusion in error matrix generation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 59: 641-644.
- Congalton, R. y Green, K.** 2009. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. Boca Raton, CRC Press. 183 p.
- Dourojeanni, M.** 1976. Machu Picchu y el sistema de conservación del Perú. *Parques* 1(2): 8-11.
- Ferrier, S.** 2002. Mapping spatial pattern in biodiversity for regional conservation planning: where to from here? *Systematic Biology* 51(2): 331-363.
- Ferrier, S.; Powell, V.; Richardson, K.; Manion, G.; Overton, J.; Allnutt, T.; Cameron, S.; Mantle, K.; Burgess, N.; Faith, D.; Lamoreux, J.; Kier, G.; Hijmans, R.; Funk, V.; Cassis, G.; Fisher, B.; Flemons, P.; Lees, D.; Lovett, J. y von Rompaey, R.** 2004. Mapping more of terrestrial biodiversity for global conservation assessment. *Bioscience* 54(12): 1101-1109.
- Figuroa, J. y Stucchi, M.** 2002. Situación actual del oso de anteojos en el Santuario Histórico de Machupicchu y zonas adyacentes - estudio preliminar. Cusco, INRENA. 122 p.
- Foody, G.** 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 80: 185-201.

- Foody, G.** 2008. Harshness in image classification accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing* 29(11): 3137-3158.
- Galiano, W.** 2000. Situación ecológico-ambiental del Santuario Histórico de Machupicchu: una aproximación. Cusco, PROFONANPE. 104 p.
- Galiano, W.** 2005. Diagnóstico y propuesta para la conservación de la biodiversidad del Santuario Histórico de Machupicchu y Zona de Amortiguamiento. Cusco, INRENA. 52 p.
- Galiano, W.** 2007. Diagnóstico de la investigación biológica y ambiental del Santuario Histórico de Machupicchu. Cusco, INRENA. 183 p.
- INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales).** 1999. Plan Maestro del Santuario Histórico de Machupicchu 1998-2003. Lima, INRENA. 287 p.
- INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales).** 2005. Plan Maestro del Santuario Histórico Machupicchu 2005–2010. Cusco, INRENA. 234 p.
- Josse, C.; Navarro, G.; Comer, P.; Evans, R.; Faber-Langendoen, D.; Fellows, M.; Kittel, S.; Menard, S.; Pyne, M.; Reid, M.; Schulz, K.; Snow, K. y Teague, J.** 2003. Ecological systems of Latin America and the Caribbean: a working classification of terrestrial systems. Arlington, NatureServe. 47 p.
- Josse, C.; Navarro, F.; Encarnación, F.; Tovar, A.; Comer, P.; Ferreira, F.; Rodríguez, J.; Saito, J.; Sanjurjo, J.; Dyson, J.; Rubin de Celis, E.; Zárate, R.; Chang, J.; Ahuite, M.; Vargas, C.; Paredes, F.; Castro, W.; Maco, J. y Reátegui, F.** 2007. Sistemas ecológicos de la cuenca amazónica de Perú y Bolivia: clasificación y mapeo. Arlington, NatureServe. 94 p.
- Josse, C.; Bow, J. y Dyson, J.** 2007. An accuracy assessment of the Peru lowlands portion of the Andes-Amazon ecological systems map. NatureServe. 36 p.

- Josse, C., Cuesta, F., Navarro, G., Barrena, V., Cabrera, E., Chacón-Moreno, E., Ferreira, W., Peralvo, M., Saito, J. y Tovar, A.** 2009. Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Lima, CAN. 100 p.
- Josse, C.; Young, B.; Lyons-Smyth, R.; Brooks, T.; Frances, A.; Comer, P.; Petry, P.; Balslev, H.; Bassuner, B.; Goettsch, B.; Hak, J.; Jørgensen, P.; Larrea-alcázar, D.; Navarro, G.; Saatchi, S.; Sanchez de Lozada, A.; Svenning, J.; Tovar, A. y Moscoso, A.** 2013. Desarrollo de insumos para la toma de decisiones de conservación en la cuenca amazónica occidental. *Ecología Aplicada* 12(1): 45-65.
- Malleux, R.** 2007. Estudio comparativo entre dos sistemas de clasificación digital y la interpretación visual para la estratificación del bosque de producción permanente Biabo–Cordillera azul. Tesis Ing. Forestal. Lima, Perú, UNALM. 143 p.
- Mas, F.; Reyes, J. y Pérez, A.** 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas* 51: 53-72.
- Mas, F. y Couturier, S.** 2011. Evaluación de bases de datos cartográficas. **In** Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. México. p. 675-703.
- McCoy, R.** 2005. *Field methods in Remote Sensing*. New York, The Guilford Press. 159 p.
- Millennium Ecosystem Assessment.** 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington D.C., Island Press. 155p.
- Miller, K.** 1980. Planificación de parques nacionales para el ecodesarrollo de Latinoamérica. España, FEPMA. 500 p.
- MINAM (Ministerio del Ambiente).** 2009. Memoria descriptiva del mapa de deforestación de la Amazonia peruana. Lima, MINAM. 108 p.
- MINAM (Ministerio del Ambiente).** 2012. Memoria descriptiva del mapa de cobertura vegetal del Perú. MINAM. 76 p.

- Myers, N.; Mittermeier, R.; Mittermeier, C.; Fonseca, G. and Kent, J.** 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853-858.
- NatureServe.** 2009. International Ecological Classification Standard: Terrestrial Ecological Classifications. *Sistemas Ecológicos de los Andes del Norte y Centro*. Arlington, NatureServe. 70 p.
- Ochoa, J. y Trujillo, I.** 2000. Caracterización biológica, ecológica y ambiental en la red de caminos Inka del Santuario Histórico de Machupicchu. Cusco, INRENA. 180 p.
- Olson, D. and Dinerstein, E.** 1998. The global 200: a representation approach to conserving the Earth's most biologically valuable ecoregions. *Conservation Biology* 12: 392-411.
- Olson, D.; Dinerstein, E.; Wikramanayake, E.; Burgess, N.; Powell, G.; Underwood, E.; D'amico, J.; Itoua, I.; Strand, H.; Morrison, J.; Loucks, C.; Allnutt, T.; Ricketts, T.; Kura, Y.; Lamoreux, J.; Wettengel, W.; Hedao, P. y Kassem, K.** 2001. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on earth. *Bioscience* 51(11): 933-938.
- Peyton, B.** 1984. Spectacled bear habitat use in the Historical Sanctuary of Machupicchu and adjacent áreas. Masters Thesis. USA, University of Montana. 97 p.
- Plourde and Congalton,** 2003. Sampling method and sample placement: how do they affect the accuracy of remotely sensed map? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 3: 289-297.
- Regalado, O. y Arias, J.** 2006. Desarrollo sostenible en turismo: una propuesta para Machupicchu. *Cuadernos de Difusión* 11 (20): 1-11.
- Reynel, C.; Pennington, T. y Särkinen, T.** 2013. Cómo se formó la diversidad ecológica del Perú. Lima, FDA. 412 p.
- Rodríguez, L. y Young, K.** 2000. Biological diversity of Peru: determining priority áreas for conservation. *Ambio* 29(6): 329-337.

Rodríguez, J.; Rodríguez-Clark, K.; Baillie, J.; Ash, N.; Benson, J.; Boucher, T.; Brown, C.; Burgess, N.; Collen, Ben.; Jennings, M.; Keith, D.; Nicholson, E.; Revenga, C.; Reyers, B.; Rouget, M.; Smith, T.; Spalding, M.; Taber, A.; Walpole, M.; Zager, I. y Zamin, T. 2011. Definición de categorías de UICN para ecosistemas amenazados. *Conservation Biology* 25: 21-29.

Rodríguez, J.; Rodríguez-Clark, K.; Keith, D.; Barrow, E.; Benson, J.; Nicholson, E. y Wit, P. 2012. UICN red list of ecosystems. *Sapiens* 5: 6-70.

Rodrigues, A.; Andelman, S.; Bakarr, M.; Boitani, L.; Brooks, T.; Cowling, R.; Fishpool, L.; Fonseca, G.; Gaston, K.; Hoffmann, M.; Long, J.; Marquet, P.; Pilgrim, J.; Pressey, R.; Schipper, J.; Sechrest, W.; Stuart, S.; Underhill, L.; Waller, R.; Watts, M. y Yan, X. 2004. Effectiveness of the global protected area network in representing species diversity. *Nature* 428: 640-643.

Sayre, R.; Bow, J.; Josse, C.; Sotomayor, L. y Touval, J. 2008. Terrestrial ecosystems of South America. In *North America land cover summit*. Washington D.C. p. 131-152.

Sayre, R., Comer, P.; Hak, J.; Josse, C.; Bow, J.; Warner, H.; Larwanou, M.; Kelbessa, E.; Bekele, T.; Kehl, E.; Amena, R.; Andriamasimanana, R.; Ba, T.; Benson, L.; Boucher, T.; Brown, M.; Cress, J.; Dassering, O.; Friesen, B.; Gachathi, F.; Houcine, S.; Keita, M.; Khamala, E.; Marangu, D.; Mokua, F.; Morou, B.; Mucina, L.; Mugisha, S.; Mwavu, E.; Rutherford, M.; Sanou, P.; Syampungani, S.; Tomor, B.; Vall, A.; Vande Weghe, J.; Wangui, E. y Waruingi, L. 2013. A new map of standardized terrestrial ecosystems of Africa. Washington D.C., Association of American Geographers. 24 p.

sePerú (Servicios Ecosistémicos Perú). 2011. Estudio de factibilidad para poner en valor los servicios ecosistémicos del Santuario Histórico de Machupicchu. Cusco, SERNANP. 34 p.

Stehman, S. 1996. Estimating the kappa coefficient and its variance under stratified random sampling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62(4): 401-407.

- Stehman, S.** 1997. Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment* 62(1): 77-89.
- Stehman, S.** 1999. Basic probability sampling designs for thematic map accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing* 20(12): 2347-2366.
- Stehman, S.** 2000. Practical implications of designs-based sampling inference for thematic map accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 72(1): 35-45.
- Stehman, S.** 2001. Statistical rigor and practical utility in thematic map accuracy assessment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67(6): 727-734.
- Stehman, S. y Czaplewski, R.** 1998. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles. *Remote Sensing of Environment* 64(3): 331-344.
- Swenson, J.; Young, B.; Beck, S.; Comer, P.; Córdova, J.; Dyson, J.; Ember, D.; Encarnación, F.; Ferreira, W.; Franke, I.; Grossman, D.; Hernandez, P.; Herzog, S.; Josse, C.; Navarro, G.; Pacheco, V.; Stein, B.; Timaná, M.; Tovar, A.; Tovar, C.; Vargas, J. y Zambrana-Torrelío, C.** 2012. Plant and animal endemism in the Eastern Andean slope: challenges to conservation. *BMC Ecology* 12: 1-18.
- Torres, D.** 2012. Georreferenciación y mapeo de las rutas de patrullaje rutinario del Santuario Histórico de Machupicchu. Cusco, SERNANP-SHM. 18 p.
- Tovar, A.** 2013. Taller de Capacitación: Sistemas Ecológicos y su aplicación en Áreas Naturales Protegidas. Cusco, SERNANP-SHM.
- Tovar, A., Tovar, C., Saito, J., Soto, A., Regal, F., Cruz, Z., Véliz, C., Vásquez, P., Rivera, G.** 2010. Yungas peruanas–Bosques montanos de la vertiente oriental de los Andes del Perú: una perspectiva ecorregional de conservación. Lima, CDC-UNALM. 150 p.
- Tupayachi, A. y Galiano, W.** 1988. Flora del Santuario Histórico de Machupicchu: Wiñay Wayna. *Biota* 95: 33-41.

UICN (Unión Internaional para la Conservación de la Naturaleza). 1980. Estrategia mundial para la conservación. Suiza, UICN. 70 p.

Walker, B. y Fjeldsa, J. 2001. Guía de campo de aves del Santuario Histórico de Machupicchu. Cusco, INRENA. 217 p.

ANEXO 1

COMPARACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD ENTRE EL PERÚ Y EL SHM

Lugar	Mamíferos	Aves	Anfibios	Reptiles	Mariposas diurnas	Angiospermas y Gimnospermas
Perú	460	1710	292	342	>30000	>20000
SHM	58 (13%)	446 (26%)	12 (4%)	28 (8%)	420 (10%)	>3250 (16%)

Fuente: Galiano, 2005.

ANEXO 2

DIVERSIDAD ZOOLOGICA DEL SHM

Grupo Taxonómico	Número de especies
Mamíferos	58
Aves	460
Peces	13
Reptiles	28
Anfibios	12
Mariposas diurnas	377 (420)

Fuente: Galiano, 2005.

ANEXO 3

DIVERSIDAD FLORÍSTICA DEL SHM

Grupo Taxonómico	Número de especies	% Flora Peruana
Flora vascular y no vascular	>3250	15
Líquenes	20	-
Fungí (hongos)	20	-
Briofitos (musgos)	>200	-
Pteridofitos (helechos)	365	36.5
Gimnospermas	06	0.0032
Monocotiledóneas	780	4.2
Orchidaceae	425	25
Poaceae	155	21.55
Bromeliaceae	45	10.71
Árboles	>370	14.8
Dicotiledoneas	1994	10.75
Asteraceae	>200	14
Solanaceae	77	14.31
Fabaceae	63	6.48
Rosaceae	48	42.48
Scrophulariaceae	42	17.57
Melastomataceae	40	6.27
Rubiaceae	40	6.9
Piperaceae	39	6.73
Ericaceae	34	26.15
Campanulaceae	30	23.07
Especies introducidas	212	-

Fuente: Galiano, 2005.

ANEXO 4

CLASIFICACIÓN DE ZONAS DE VIDA EN EL SHM

INRENA (1995)	Galiano y Machicao (1995)	Galiano (2005)	INRENA (2005)
Bosque húmedo – Subtropical	Bosque húmedo – Montano Subtropical	Bosque húmedo – Montano Subtropical	Bosque muy húmedo – Montano Subtropical
Bosque húmedo – Montano Bajo subtropical	Bosque pluvial – Montano Subtropical	Bosque pluvial – Montano subtropical	Bosque muy húmedo – Montano Bajo Subtropical
Bosque muy húmedo – Montano Bajo Subtropical	Bosque muy húmedo – Montano Bajo Subtropical	Bosque muy húmedo – Montano Bajo Subtropical	Bosque húmedo – Montano Bajo Subtropical
Bosque pluvial – Montano Subtropical	Bosque muy húmedo – Montano Subtropical	Bosque muy húmedo – Montano Subtropical	Bosque húmedo – Montano Subtropical
Bosque muy húmedo – Montano Subtropical	Bosque húmedo – Subtropical	Bosque húmedo – Subtropical	Bosque húmedo – Premontano Subtropical
Páramo muy húmedo – Subalpino Subtropical	Bosque húmedo – Montano Bajo subtropical	Bosque húmedo – Montano Bajo Subtropical	Bosque seco – Montano Bajo Subtropical
Páramo pluvial – Subalpino Subtropical	Páramo pluvial – Subalpino Subtropical	Estepa – Montano Bajo Subtropical	Páramo – Subalpino Subtropical
Tundra pluvial – Alpina Subtropical	Páramo muy húmedo – Subandino Subtropical	Estepa espinosa – Montano Bajo Subtropical	Páramo pluvial – Subalpino Subtropical
Nival Subtropical	Tundra pluvial – Andino Subtropical	Bosque seco – Montano Bajo Subtropical	Tundra pluvial – Alpina Subtropical
	Nival Superior	Bosque muy seco - Tropical	Nival Subtropical
		Páramo pluvial – Subandino Subtropical	
		Páramo muy húmedo – Subandino Subtropical	
		Tundra pluvial – Andino Subtropical	
		Nival Superior	

ANEXO 5

PISOS ECOLÓGICOS DEL SHM

Pisos Ecológicos	Descripción
De 2000 a 2600 msnm	Caracterizado por una vegetación de Bosque Montano bajo muy húmedo donde predominan asociaciones densas de <i>Cecropia ruiziana</i> , <i>Cinchona pubescens</i> , <i>Nectandra herrerae</i> , <i>Inga adenophylla</i> , <i>Trema micranta</i> , <i>Erythrina falcata</i> , <i>Erythrina lorenai</i> , <i>Rhus juglandifolia</i> , <i>Cedrela herrerae</i> , <i>Ocotea caniflora</i> , <i>Siparuna harogifolia</i> , <i>Laplacea fruticosa</i> , <i>Condaminea corymbosa</i> , <i>Styrax obovata</i> , <i>Smilax sp.</i> Todas con abundante epifitismo; este tipo de vegetación no sólo se encuentra en el Cañón del Machupicchu, sino también en las pequeñas quebradas que confluyen en el río Urubamba.
De 2600 a 3800 msnm	con vegetación arbórea, arbustiva y herbáceas que alternan con áreas desnudas por las pendientes rocosas, este piso corresponde al bosque húmedo montano bajo, donde sobresalen asociaciones de <i>Clethra obovata</i> , <i>Clusia sp</i> , <i>Cyathea divergens</i> , <i>Alnus jurullensis</i> , <i>Galactia speciosa</i> , <i>Durantha sprucei</i> , <i>Tibouchina longifolia</i> , <i>Vallea stipularis</i> , <i>Rapanea pearcei</i> , <i>Weimania bífida</i> , <i>Chusquea scandens</i> , <i>Begonias como Begonia parviflora</i> , <i>Begonia bracteosa</i> , <i>Abatia macrophylla</i> , <i>Cassia glandulosa</i> , <i>Heliconia affinis</i> , <i>Oreocallis grandiflorum</i> , <i>Calceolaria atawallpe</i> . Orquídeas tales como: <i>Epidendrum crassilabium</i> , <i>E. secundum</i> , <i>E. frederici</i> – <i>guilielmi</i> , <i>Sobralia dichotoma</i> , <i>S. violácea</i> , <i>Justicia cuscoensis</i> , <i>Cuphea cordata</i> , entre las más representativas.
De 3800 msnm a más	con predominio de la vegetación criptocaula y arrosetada con abundante gramínetum; pero, es posible encontrar en las depresiones del terreno, ojos de agua y, lagunillas, asociaciones arbóreas y arbustivas propias del bosque húmedo montano alto, Páramo lluvioso, Páramo sub alpino, éstas son de: <i>Escalonia resinosa</i> , <i>E. myrtilloides</i> , <i>Vallea stipularis</i> , <i>Miconia alpina</i> , <i>M. sclerophylla</i> , <i>Brachyotum quinquinerve</i> , <i>Myrcianthes oreophylla</i> , <i>Weimannia pentaphylla</i> , <i>Vaccinium marginatum</i> , <i>V. floribundum</i> , <i>Pernettya purpurea</i> , <i>Cavendisha elliptica</i> , <i>C. paniculata</i> , <i>C. mandonii</i> , <i>Befaria glauca</i> , <i>Demostenesia spp</i> , <i>Gaultheria spp</i> , <i>Baccharis spp</i> , <i>Eupatorium spp</i> . Asociaciones herbáceas de: <i>Halenia umbellata</i> , <i>Gentianella dolychopoda</i> , <i>Syphocamphyllus dependens</i> , <i>S. krauseanus</i> , <i>Valeriana decusata</i> , <i>Stevia cuzcoensis</i> , <i>Bidens triplinervis</i> , <i>Liabum uniflorum</i> , <i>Senecio submultinervis</i> , <i>Stipa ichu</i> , <i>Eragrostis lurida</i> , <i>Cortaderia bífida</i> , <i>Festuca dichoclada</i> , <i>Calamagrostis heterophylla</i> ; Puyas y Pitcaimias de la puna.

Fuente: Tupayachi y Galiano (1988).

ANEXO 6

COBERTURA VEGETAL DEL SHM

COBERTURA	TIPO DE COBERTURA	% DEL SHM	OBSERVACIONES
Bosques	Bosque húmedo de montaña	24.2	Altitud: 2000-3800 msnm. Bosque montano de alta diversidad florística.
Matorrales	Matorral húmedo	20	Altitud: 2300-3800 msnm. Vegetación secundaria originada sobre todo por incendios forestales y de otra vegetación arbustiva.
Herbazales	Pajonal de puna	31.5	Altitud: 3800-4400 msnm. Predominio de herbáceas sobre otras formas de vida; incluye bofedales.
	Césped de puna	1.1	Altitud: 3800-4400 msnm. Herbazal tipo césped (estrato bajo); bofedales.
	Herbazal de tundra	11.4	Altitud: encima de 4400 msnm. Menos diversidad florística que pajonal y césped de puna; bofedales.
Cultivos	Áreas de cultivos y vegetación secundaria	4.4	Valles de los ríos Urubamba y Cusichaca. Cultivos de maíz, arveja, cebada, habas y papa.
Otros	Nevados	7.5	Altitud: encima de 4600 msnm. Nevados Salkantay, la Verónica y Chullunku.
	Lagunas	<0.1	Altitud: encima de 4200 msnm. Lagunas Quimsacocha, Yanacocha y otras.
	Centros poblados y grupos arqueológicos	<0.1	Machupicchu – Aguas Calientes.

Fuente: INRENA (1999)

ANEXO 7

FICHA DE EVALUACIÓN

Zona de trabajo	<input type="checkbox"/> Intihuatana	<input type="checkbox"/> Huallabamba	<input type="checkbox"/> Piscacucho	Clase fisonómica	<input type="checkbox"/> bosque
	<input type="checkbox"/> Aguas calientes	<input type="checkbox"/> Qorihuayrachina	<input type="checkbox"/> Wiñaywaina		<input type="checkbox"/> arbustal
				<input type="checkbox"/> pajonal	
Fecha				<input type="checkbox"/> matorral	
Responsable				<input type="checkbox"/> agricultura/plantación	
Asistente					
N° de fotos				Altura del dosel (m)	
UTM x				Pendiente	
UTM y				<input type="checkbox"/> < 5 %	
Precisión GPS				<input type="checkbox"/> 5 - 15 %	
altitud (msnm)				<input type="checkbox"/> 15 - 30 %	
				<input type="checkbox"/> 30 - 50 %	
				<input type="checkbox"/> 50 - 75 %	
				<input type="checkbox"/> 75 - 100 %	
Código Sistema Ecológico	CES409.921				
BOSQUE MONTANO PLUVIESTACIONAL SUBHÚMEDO DE YUNGAS					
Especies características				Orientación	
<i>Parapiptadenia excelsa</i>				Macroforma	
<i>Erythrina falcata</i>				<input type="checkbox"/> planicie	
<i>Jacaranda mimosifolia</i>				<input type="checkbox"/> valle	
<i>Carica quercifolia</i>				<input type="checkbox"/> terraza	
<i>Caesalpinia spinosa</i>				<input type="checkbox"/> lomada	
<i>Dasyphyllum brasiliensis</i>				<input type="checkbox"/> meseta	
<i>Juglans soratensis</i>				<input type="checkbox"/> colina	
<i>Cedrela lilloi, C. sp.</i>				<input type="checkbox"/> montaña	
<i>Bocconia integrifolia</i>				<input type="checkbox"/> ladera	
<i>Myrsine coriacea</i>					
<i>Aralia soratensis</i>				Nivel de intervención	
<i>Mimosa soratensis</i>				Paisaje	
<i>Tecoma stans</i>				<input type="checkbox"/> alto	
				<input type="checkbox"/> medio	
				<input type="checkbox"/> bajo	
				<input type="checkbox"/> nulo	
				Muestra	
				<input type="checkbox"/> alto	
				<input type="checkbox"/> medio	
				<input type="checkbox"/> bajo	
				<input type="checkbox"/> nulo	
Notas					

Fuente: adaptado de Josse *et al* (2007).

ANEXO 8

DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS ECOLÓGICOS DEL SHM¹

CES409.043

BOSQUE ALTIMONTANO PLUVIAL DE YUNGAS



En el SHM se distribuye de forma irregular por la parte alta de las quebradas Torontoy, Pampacahua, Alcamayo, Aguas Calientes y Mandor. Este Sistema Ecológico se restringe sólo a la parte norte del Santuario.

Presente en laderas montañosas altas y filos de serranías con nieblas frecuentes. Ombroclima supratropical Húmedo-hiperhúmedo y en un rango altitudinal desde los 2 900-3 100 a 4 000-4 200 msnm.

Los siguientes especies son diagnósticas para el sistema: *Podocarpus rusbyi*, *P. oelifolius*, *Hesperomeles lanuginosa*, *Ilex elliptica* (e), *I. cuzcoana* (e), *I. andicola*, *I. jelskii*, *Weinmannia microphylla*, *W. pentaphylla*, *W. pinnata*, *Oreopanax stenophyllum* (e), *O. urubambanus* (e), *O. weberbauerii* (e), *Symplocos* spp., *Hedyosmum maximum*, *Hedyosmum scabrum*, *Clethra obovata* (e), *C. ferruginea*, *C. cuneata*, *Gaultheria buxifolia*, *G. glomerata*, *Clusia faviflora*, *C. trochiformis*, *Miconia herrerae*, *M. vargasii*, *M. peruviana*, *M. alpina*, *M. setulosa*, *M. rugifolia*, *Myrsine andina*, *M. sprucei*, *M. pearcei*, *M. pellucida*, *Myrteola phyllicoides*, *M. mimmularia*.

¹ en función a lo establecido por NatureServe (2009)

CES409.044

BOSQUE ALTIMONTANO PLUVIESTACIONAL DE YUNGAS



Sistema Ecológico ubicado en la zona norte (parte media de las quebradas Torontoy, Pampacahua, Alcamayo, Aguas Calientes y Mandor) y central (parte alta de las quebradas Yanacocha, Sayaqmarka, Chachabamba y Pacaymayo) del SHM.

Termoclima supratropical inferior, con bioclima pluviestacional y ombroclima húmedo. Rango altitudinal: 3 000-3 100 a 3 400-3 600 msnm.

Los siguientes especies son diagnósticas para el sistema: *Podocarpus rusby*, *P. oleifolius*, *Myrcianthes indifferens* (e), *M. oreophilla* (e), *Weinmannia crassifolia*, *W. lentiscifolia*, *W. pinnata*, *W. microphylla*, *Oreocallis grandiflora*, *O. mucronata*, *Roupala montana* *R. meisneri*, *Morella pubescens*, *Clethra cuneata*, *C. obovata* (e), *C. ferruginea*, *Escallonia resinosa*, *E. myrtilloides*, *E. pilgeriana*, *E. albifolium*, *Oreopanax thaumasiophyllum*, *Oreopanax urubambanus* (e), *O. stenophyllum* (e), *O. weberbauerii* (e), *Cervantesia tomentosa*, *Nectandra herrerae* (e), *N. furcata*, *N. longifolia*, *N. pulverulenta*, *Hesperomeles ferruginea*, *H. cuneata*, *H. escalloniifolia*, *H. latifolia*, *H. heterophylla*, *Duranta coriacea*, *D. sprucei*, *Passiflora quadriflora* (e), *P. exoperculata*, *P. dentata*.

CES409.054

BOSQUE BASIMONTANO PLUVIESTACIONAL HÚMEDO DE YUNGAS



Sistema Ecológico de distribución reducida, concentrada en la parte oeste del Santuario, desde la parte baja de Mandor, San Miguel hasta Intihuatana. En muchas zonas, estos bosques han sido destruidos y sustituidos total o parcialmente, mediante la acción humana, por sus etapas seriales de bosques secundarios así como por cultivos de café, palta y plátanos, fundamentalmente.

Prospera en laderas montañosas con suelos bien drenados. Ombroclima

termotropical superior húmedo. Con un rango altitudinal que va desde 1200 hasta los 1 700-2 000 msnm.

Los siguientes especies son diagnósticas para el sistema: *Juglans neotropica*, *Juglans boliviana*, *Saurauia biserrata* (e), *Podocarpus glomeratus*, *Mauria denticulata* (e), *M. heterophylla*, *M. ferruginea*, *Toxicodendron striatum*, *Nectandra herrerae* (e), *N. acutifolia*, *N. furcata* (e), *N. laurel*, *N. longifolia*, *N. reticulata*, *Myrcia splendens*, *Ceiba salmonea* (e), *Escallonia myrtilloides*, *E. albifolium*, *Protium sp.*, *Cyathea caracasana*, *C. delgadii*, *Cedrela odorata*, *Alchornea glandulosa*, *Alchornea sp.*, *Mollinedia pulcherrima*, *Siparuna suaveolens* (e), *S. muricata*, *Myrcia esplendens*, *Cinchona pubescens*, *C. officinalis*, *Ladenbergia magnifolia*, *Guettarda ochreatea* (e), *G. hirsuta*, *Pouteria cinnamomea* (e), *P. lucuma*, *Freziera calophylla*, *Ternstroemia jelskii*, *Vochysia sp.*, *Condaminea corymbosa*, *Dunalia spinosa*, *Erythrina falcata*, *E. edulis*.

CES409.051

BOSQUE MONTANO PLUVIESTACIONAL HÚMEDO DE YUNGAS



Sistema Ecológico con bosques frondosos ubicados en la parte baja de las quebradas Torontoy, Pampacahua, Alcamayo, Aguas Calientes, Mandor, Pacaymayo y Chachabamba hasta el Abra San Miguel. También aparece cerca de la unión del río Aobamba con el Urubamba (desde la parte baja de la quebrada Yanacocha).

Presente en suelos bien drenados en laderas de montaña. Termoclima mesotropical con ombroclima húmedo. Rango altitud: 1 700-1 900 a 2 900-3 100 msnm.

Los siguientes especies son diagnósticas para el sistema: *Weinmannia microphylla*, *W. pinnata*, *W. pentaphylla*, *W. sorbifolia*, *W. crassifolia*, *W. bangii*, *Cedrela odorata*, *Cinchona micrantha*, *Cinchona officiinalis*, *C. pubescens*, *Mutisia venusta* (e), *M. lanata*, *M. acuminata*, *Prunus rotunda* (e), *P. integrifolia*, *P. rigida*, *P. pleiantha*, *Styrax cordatus* (e), *S. pentlandianum*, *S. peruvianum*, (e), *Nectandra acutifolia*, *N. membranacea*, *N. laurel*, *N. utilis*, *Persea ferruginea*, *P. peruviana*, *Styloceras laurifolium*, *Styloceras columnare*,

Podocarpus glomeratus, *P. oleifolius*, *Prumnopitys harmsiana*, *Hedyosmum scabrum*, *H. angustifolium*, *H. scatorum*, *H. racemosum*, *Citharexylum laurifolium*, *C. herrerae*, *C. dentatum*, *Duranta mutisii*, *D. obtusifolia*, *D. triacantha*, *D. sprucei*, *Escallonia resinosa*, *E. myrtilloides*, *E. pilgeriana*, *Juglans boliviana*, *J. neotropica*, *Geonoma helmitoclada* (e), *Ficus ruiziana*, *F. tonduzii*, *F. crassiuscula*, *F. cuatrecasana*, *F. trigona*, *F. eximia*, *Morus insignis*, *Myrsine coriacea*, *M. pellucida*, *M. pearcei*, *M. sprucei*, *Saurauia biserrata*, *Hesperomeles ferruginea*, *H. cuneata*, *H. escalloniifolia*, *H. latifolia*, *Mauria ferruginea*, *M. denticulata* (e), *M. subserrata*, *M. sericea*, *Columellia oblonga*, *C. obovata*, *C. weberbaueri*, *Clusia faviflora*, *C. trochiformis*, *Clethra cuneata*, *C. ferruginea*, *C. obovata*, *Myrcia splendens*, *Myrcianthes oreophilla* (e), *M. indifferens* (e), *M. halli*, *Bejaria aestuans*.

CES409.921

BOSQUE MONTANO PLUVIESTACIONAL SUBHÚMEDO DE YUNGAS



Sistema Ecológico representado mayormente como manchas remanentes dispersas o aisladas ascendentes por las quebradas de Misquipuquio, Piscaunuyoc, Chaquimayo, Torontoy, Waynaquente, Lulluchapampa y Huayruro.

Bioclima pluviestacional y ombroclima subhúmedo del piso bioclimático mesotropical. Ocupan un rango altitudinal situado aproximadamente entre los 2 000-2 100 y los 2 800-3 100 msnm.

Los siguientes especies son diagnósticas para el sistema: *Erythrina falcata*, *Carica glandulosa*, *C. papaya*, *C. pubescens*, *Caesalpinia spinosa* (e), *Dasyphyllum leiocephalum* (e), *Myrsine coriacea*, *Mimosa cuzcoana* (e), *M. revoluta*, *Tecoma stans*, *T. sambucifolia*, *Schinus molle*.

CES409.046

BOSQUE DE POLYLEPIS ALTIMONTANO PLUVIESTACIONAL DE YUNGAS



Sistema Ecológico de bosques dominados por el género *Polylepis*, de distribución muy restringida. Suelen encontrarse en manchas o rodales muy densos, ubicados cerca a las nacientes de la quebrada Torontoy; por el cauce alto de la quebrada Piscaunuyoc; la parte alta de Mesada y el inicio del río Aobamba, Palkay.

Presente en ambientes de laderas altas abruptas y pedregales de derrubios. Ombroclima supratropical Húmedo. Su rango altitudinal es:

2 900-3 100 a 4 000-4 200 msnm.

Los siguientes especies son diagnósticas para el sistema: *Polylepis racemosa* (e), *P. subsericans* (e), *P. sericea*, *P. pepeii*, *P. pauta*, *P. besserii*, *Berberis carinata* (e), *B. humbertiana* (e), *B. dryandriphylla*, *Miconia theizans*, *M. setulosa* (e), *M. alpina* (e), *M. peruviana* (e), *M. herrerae* (e), *Buddleia montana*, *B. americana*, *B. incana*, *Schinus pearcei*, *S. microphyllus*, *Hesperomeles lanuginosa*, *H. cuneata*, *H. latifolia*, *H. heterophylla*, *Oreopanax cuspidatus*, *O. ischnolobus*, *Myrsine pearcei*, *M. sprucei*, *M. andina*, *Barnadesia caryophylla*, *B. berberoides*, *Tournefortia maculata*, *Prunus torunda*, *P. rigida*, *Mutisia lanata*, *M. venusta* (e), *Escallonia resinosa*, *E. myrtilloides*, *E. albifolium*, *Oreopanax cuspidatus*, *O. ischnolobus*, *Gaultheria buxifolia*, *G. vaccinioides*, *Jungia rugosa*, *J. amplistipula*, *J. floribunda*.

CES409.059

PAJONAL ARBUSTIVO ALTOANDINO Y ALTIMONTANO PLUVIESTACIONAL DE YUNGAS



Sistema ecológico dominado por pajonales amacollados densos con variable densidad de arbustos y a menudo en mosaico con vegetación boscosa. Distribuidos de forma irregular por la zona central y sur-este/sur-oeste del SHM, específicamente, por la parte alta de las quebradas Lulluchapampa, Mesada, Sayaqmarka y Pacaymayo; toda la quebrada Matara; parte media de la zona Palkay y, por la margen izquierda del río Urubamba entre los km. 88 y 100 sobre el bosque montano u áreas intervenidas.

Ocurre en laderas montañosas con suelos bien drenados más o menos erosionados. Ombroclima supratropical húmedo y subhúmedo. Rango altitudinal: 2 900-3 100 a 3 700 msnm.

Los siguientes especies son diagnósticas para el sistema: *Festuca casapaltensis* (e), *F. dichoclada* (e), *F. dolichophylla*, *Uncinia hamata*, *Baccharis latifolia* (e), *B. nitida*, *B. peruviana*, *Barnadesia polyacantha*, *B. horrida*, *Berberis carinata* (e), *B. humbertiana*, *B. saxicola*, *Ribes incarnatum*, *R. cuneifolium*, *Siphocampylus actinothrix* (e), *S. corynoides*, *S. stenolobus*, *Gynoxys nitida*, *G. infralanata*, *G. longifolia*, *Lepechinia codon*, *L. lamifolia*, *Rubus acanthophyllus*, *R. megalococcus*, *Blechnum cordatum*, *B. caracasana*, *B. arborescens*, *Ageratina sternbergiana*, *A. glechonophylla*, *A. gilbertii*, *Kaunia longepetiolata*, *K. uber*, *Senna vargasii*, *S. mandonii*, *S. multiglandulosa*, *Mutisia acuminata*, *M. venusta*, *Opuntia subulata*, *Corryocactus scuarrosus*.

CES409.058

PAJONAL ARBUSTIVOS ALTOANDINO Y ALTIMONTANO PLUVIAL DE YUNGAS



Incluye pajonales amacollados densos, así como diversos tipos de matorrales y arbustales. Las asociaciones arbustivas a menudo se encuentran limitando con el límite superior del bosque altimontano conformando una especie de zona ecotonal. Se ubica únicamente en la parte central de la zona norte, en un área de difícil acceso y está rodeada de pequeños a medianos cuerpos de agua.

Presente en laderas altas montañosas de diversa inclinación. Termoclima supratropical y orotropical inferior, con ombroclima húmedo a hiperhúmedo. Rango altitudinal: 2 900-3 700 (altimontano) y 3 700-4 200 msnm (altoandino).

Las siguientes especies son diagnósticas para el sistema: *Cortaderia bifida*, *C. nitida*, *Neurolepis aristata*, *Calamagrostis cuzcoensis*, *C. rigida*, *Gentiana sedifolia*, *Gentianella ericoides*, *G. sacarlatifolia*, *Festuca rigidifolia*, *F. dichoclada*, *F. casapaltensis*, *Stipa ichu*, *S. hansmeyeri*, *S. vargasi*, *Huperzia spp.*, *Jamesonia spp.*, *Blechnum buchtienii*, *B. spp.*, *Pernettya prostrata*, *Gaultheria buxifolia*, *G. vaccinioides*, *Miconia alpina*, *M. herrerae*, *M. spp.*, *Diplostegium lechleri*, *D. haenkei*, *Arcytophyllum peruvianum*, *A. setosum*, *A. thimifolium*, *Brachyotum grisebachii*, *B. rostratum*, *Aulonemia queko*, *A. haenkei*, *Vaccinium floribundum*.

CES409.084

PAJONALES ALTOANDINOS DE LA PUNA HÚMEDA



Sistema Ecológico ampliamente distribuido en la zona sur del Santuario, con cierta ocurrencia en la parte nor-este. Está ubicado debajo de los sistemas nivales (Salkantay, Chuyunku y Verónica). Se hallan ampliamente afectados por el uso ganadero, principalmente camélidos andinos y bovinos, dando lugar a numerosos aspectos de los pajonales que están estructural y florísticamente condicionados por el pastoreo.

Presente en ambientes con laderas montañosas con suelos bien drenados. Ombroclima orotropical y criorotropical húmedo y subhúmedo. Rango altitudinal: > 3 900-4 100 msnm.

Las siguientes especies son diagnósticas para el sistema: *Festuca dolichophylla*, *F. rigidifolia*, *F. casapaltensis*, *Festuca spp.*, *Azorella crenata*, *A. biloba*, *A. multifida*, *Stipa hans-meyeri*, *S. vargasii*, *S. ichu*, *Baccharis latifolia*, *Baccharis spp.*, *Erigeron pusillus*, *Poa annua*, *P. candamoana*, *P. pratensis*, *Cyperus spp.*, *Carex spp.*, *Paranephelium ovatus*, *P. uniflorus*, *Gomphrena elegans*.

CES409.087

PAJONALES Y MATORRALES ALTIMONTANOS DE LA PUNA HÚMEDA



Vegetación secundaria de origen principalmente antrópico a partir de la degradación de los bosques y arbustales, que se instalan sobre suelos degradados después de la deforestación, cultivo e impacto del fuego y el ganado. Sólo presente entre el sector de Piscacucho y Qoriwayrachina. Entre el Bosque Montano y lo Pajonales Altoandinos.

Ocurre en laderas y crestas montañosas con suelos bien drenados y erosionados o degradados. Ombroclima supratropical y orotropical

inferior subhúmedo a húmedo. Rango altitudinal: 3 100-3 200 a 3 900-4 100 msnm.

Las siguientes especies son diagnósticas para el sistema: *Stipa obtusa*, *S. ichu*, *Poa horridula*, *Festuca dolichophylla*, *F. dichoclada*, *Baccharis latifolia*, *Baccharis spp.*, *Satureja boliviana*, *Mutisia lanata*, *M. acuminata*.

NIVAL



Piso ecológico de las cumbres de las montañas, situándose en los Andes, aproximadamente por encima de los 5 100-5 300 m de altitud. Con bioclimas pluviales y pluviestacionales.

Este piso suele estar cubierto de nieve y hielo todo el año o la mayor parte de él. Sin embargo, en algunos casos la cubierta de nieve o hielo es temporal o inexistente. Corresponde con el piso bioclimático gélido tropical.

ÁREAS INTERVENIDAS



Paisajes que están altamente influenciados por las diversas actividades humanas que han modelado la vegetación natural durante varios años. Estos patrones de ocupación y uso del suelo han generado un mosaico de paisajes agrícolas, ganaderos y fragmentos de vegetación natural y artificial (plantaciones forestales). También se incluyen los centros urbanos.

ANEXO 9

FOTOGRAFÍAS DE LOS SISTEMAS ECOLÓGICOS DEL SHM



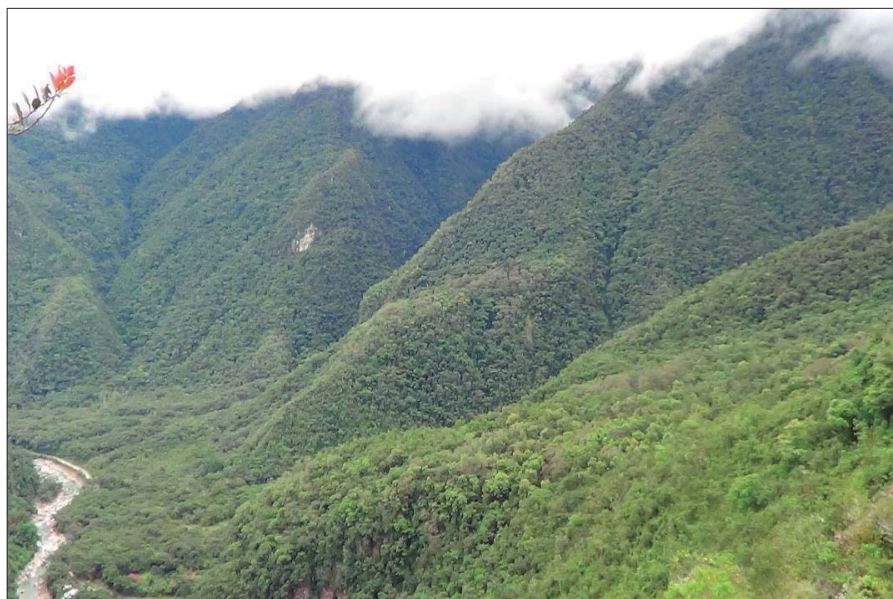
CES409.043 Bosque altimontano pluvial de Yungas



CES409.044 Bosque altimontano pluviestacional de Yungas



CES409.054 Bosque basimontano pluviestacional húmedo de Yungas



CES409.051 Bosque montano pluviestacional húmedo de Yungas



CES409.921 Bosque montano pluviestacional subhúmedo de Yungas



CES409.046 Bosque de Polylepis altimontano pluviestacional de Yungas



CES409.059 Pajonal arbustivo altoandino y altimontano pluviestacional de Yungas



CES409.058 Pajonal arbustivo altoandino y altimontano pluvial de Yungas



CES409.084 Pajonal altoandino de la Puna húmeda



CES409.087 Pajonales y matorrales altimontanos de la Puna húmeda



Nival



Áreas intervenidas