

ESTUDIO COMPARATIVO DE INDICES DE VEGETACIÓN DERIVADOS DE IMÁGENES SATELITALES DE MEDIANA RESOLUCIÓN Y SENSORES TERRESTRES. SU APLICACIÓN EN VITICULTURA DE PRECISIÓN

S. Balbarani, D. Comes, K. Langer

Universidad Juan Agustín Maza

Resumen

El trabajo de investigación evalúa una metodología para generar productos de la geomática que aporten valor agregado al ciclo de viticultura de precisión para arribar a una zonificación de la calidad de los viñedos. En particular, mediante procesamiento de datos satelitales de mediana resolución Landsat-8 y Spot-5 se obtuvieron índices de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y SAVI (*Soil- Adjusted Vegetation Index*) sobre una zona de Mendoza, Argentina. Luego se llevó a cabo un estudio y análisis empírico de dichos índices, que fueron contrastados con datos adquiridos por un sensor terrestre de proximidad como “verdad de campo”.

Los valores de Índices de Vegetación derivados de los datos satelitales muestran baja correlación con los índices de vegetación terrestres. Si bien se consideraron las diferencias entre ambas técnicas de captura de datos (satelital y por detección próxima), en cuanto a geometría de adquisición, densidad de muestreo y características instrumentales, se ha demostrado que utilizando este tipo de datos satelitales, la metodología aplicada no alcanza para suplantar o predecir la información recolectada por una tecnología tradicional como el sensoramiento terrestre mediante detección próxima.

Palabras clave: Viticultura de Precisión, SIG, GreenSeeker, NDVI, SAVI.

Abstract

We evaluated a methodology to generate products of the geomatics that add value to the cycle of precision viticulture to arrive at a zoning of the quality of the vineyards. In particular, through medium resolution Landsat-8 and Spot-5 satellite data processing, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) and SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*) vegetation indices were obtained over an area of Mendoza, Argentina. Then an empirical study and analysis of these indices were carried out, which were contrasted with data acquired by a terrestrial sensor of proximity like "truth of field".

The vegetation index values derived from satellite data show a low correlation with the terrestrial index. Although the differences between the two techniques of data collection (satellite and near detection) were considered, in terms of acquisition geometry, sampling density and instrumental characteristics, it is demonstrated that the applied methodology is not enough to impersonate or predict the captured information by a traditional technology such as the terrestrial proximity sensor.

Keywords: Precision Viticulture, SIG, GreenSeeker, NDVI, SAVI

Recibido: 16/03/2017 Aceptado: 17/11/2017

INTRODUCCIÓN

La vitivinicultura argentina se encuentra principalmente distribuida en el cordón Oeste del país, siendo Mendoza y San Juan las provincias que concentran el 92% del total de la superficie implantada. La región integrada por ambas provincias posee características agroeconómicas relativamente homogéneas formando lo que se denomina Eco-Región Cuyo (Vallone, 2005). Dentro de la región, incluso, existe una amplia gama de condiciones ambientales, económicas y sociales que posibilitan el desarrollo de diversos sistemas productivos (Van den Bosch, 2008).

Los cambios tecnológicos producidos en los últimos años, especialmente en los campos de la electrónica y de la informática, ocasionaron un salto cualitativo generando una verdadera revolución tecnológica. Uno de los campos de mayor impacto de estas tecnologías de la información fue la agricultura y en particular, la viticultura (viticultura de precisión) (Proffitt et al., 2006).

Diversas experiencias han demostrado recientemente que la variabilidad del vigor del cultivo se relaciona con la cantidad de superficie foliar o LAI (Leafareaindex), el rendimiento y la concentración de azúcares, antocianos y polifenoles (Cortellet al., 2007; Proffitt y Malcolm, 2005). La detección del vigor de la canopia de la viña previo a la cosecha permite la zonificación de la variabilidad intra-parcelaria y el posterior manejo diferencial del cultivo (Proffitt et al., 2006).

La detección remota es la disciplina más utilizada en viticultura de precisión. Entre los métodos y herramientas para la observación del vigor del cultivo de vid antes de la cosecha se destacan: 1) los sensores de proximidad, por ejemplo, GreenSeeker (NTech Industries), 2) las imágenes multiespectrales de alta resolución (IKONOS, QuickBird, WorldView), y 3) los instrumentos montados sobre sistemas aéreos no tripulados (SARPs) como mecanismos confiables para la determinación de variabilidad espacial en las parcelas con plantaciones de vid.

El elevado costo y complejidad que tienen estas nuevas geotecnologías ha sido la motivación para evaluar una alternativa económica utilizando imágenes adquiridas por sensores de libre acceso, como es el caso de las escenas correspondientes a la misión Landsat (*Land Remote-Sensing Satellite*) y algunas de la misión Spot (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*)

Los instrumentos de observación de la Tierra de las plataformas satelitales Landsat y Spot poseen características espectrales, radiométricas y tiempo de revisitas diferentes. Sin embargo, aportan la información necesaria para la estimación de índices de vegetación, tales como NDVI (Rouse, J., et al 1973) o SAVI (Huete, 1988). En ambos casos, la resolución espacial de estos sensores es de 10, 15 o 30 metros, dependiendo de la banda espectral.

Si partimos de la hipótesis de que se trata de áreas con cultivos de cobertura homogénea, podemos pensar en la posibilidad de plantear una metodología de trabajo que sea un aporte para la viticultura de precisión (VP) utilizando software y geotecnologías más económicas y accesibles. Las preguntas que deseamos responder son: 1-¿cuál es el potencial aporte de este tipo de datos de sensores en el ciclo VP?; 2-¿es posible identificar las variaciones de vigorosidad dentro de la unidad parcelaria basándonos en los índices de reflectancia satelitales generados a partir de estos instrumentos de mediana resolución?; 3-¿Es posible implementar una metodología confiable y precisa para detectar variabilidad espacial en viñedos de la provincia de Mendoza con un bajo costo?

Para responder estos interrogantes se comparan los resultados del índice de vegetación NDVI y SAVI calculados a partir de imágenes multispectrales aplicados sobre una finca de la región de Valle de Uco en la provincia de Mendoza.

UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio definida correspondió a la finca Alluvia de la bodega Doña Paula en Gualtallary, una microrregión al sur de Tupungato, conocida como el Alto Valle de Uco, Mendoza, Argentina. El área comprende una superficie de casi 160 hectáreas ubicada geográficamente entre los paralelos $33^{\circ} 22' 09''$ y $33^{\circ} 23' 17''$ latitud Sur, y entre los meridianos $69^{\circ} 12' 48''$ y $69^{\circ} 13' 55''$ longitud Oeste.

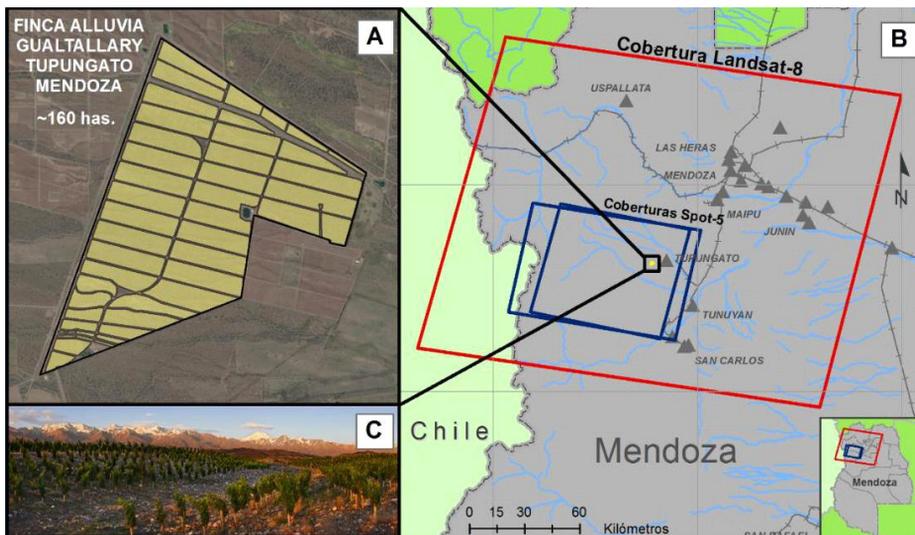


Figura 1: Área de estudio. A) contorno de la finca con imagen satelital de alta resolución de fondo (fuente: Bing Map) B) ubicación geográfica del área de estudio en la provincia de Mendoza. Se ha demarcado la huella de cobertura de la imagen Landsat-8 y de las dos escenas Spot-5 utilizadas, en color rojo y azul, respectivamente. C) fotografía panorámica de las parcelas de la finca, al pie de la pre-cordillera.

El suelo de la región se caracteriza por ser muy arenoso y pedregoso, calcáreo, poco fértil e inorgánico. Se ubica a 1.350 metros sobre el nivel del mar, con plantaciones de vid (varietal malbec) y riego integral por goteo.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo consistió esencialmente en contrastar datos procedentes de dos tipos de sensores, terrestres y satelitales. Los datos obtenidos a partir de un sensor terrestre de proximidad constituyeron la información de referencia (la verdad de campo) y los obtenidos a partir del procesamiento de las imágenes satelitales multiespectrales fueron los datos de estudio. Para el proceso se utilizaron softwares de procesamiento digital de imágenes y sistemas de información geográfica.

Datos de Referencia:

Estos datos, adquiridos el día 06 de diciembre de 2014 con un sensor terrestre de proximidad GreenSeeker® (cortesía de Agro Praxes S.A.), fueron utilizados para evaluar los resultados del proceso. “Greenseeker” Es un sensor activo que emite energía electromagnética en las longitudes de onda del rojo e infrarrojo cercano, y simultáneamente mide la energía que reflejan las hojas calculando y reportando directamente el NDVI como indicador de la salud y vigor de los cultivos. La detección próxima no depende de condicionamientos atmosféricos o de horario para realizar este tipo de mapeos. El sensor y un receptor GPS van montados sobre un cuatriciclo observando la canopia lateralmente (figura 2).



Figura 2: Modo de Relevamiento de Datos NDVI con Greenseeker. Sobre la imagen se indica con transparencia roja el haz de energía emitida por el sensor.

De esta manera no hay influencia del suelo y sus condiciones (tipo de suelo, grado de humedad, cobertura de malezas) que interfieran o influyan en las lecturas, y como resultado se obtiene un mapa georreferenciado con gran densidad de puntos con atributos de NDVI en tiempo real.

Datos de Estudio

Los Datos de Estudio correspondieron a las misiones satelitales de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de EEUU (NASA), Landsat-8; y del Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia (CNES), Spot-5. El primero de ellos continúa actualmente orbitando y observando la superficie terrestre, en tanto que el segundo ha quedado fuera de órbita el 31 de marzo de 2015. Se accedió a una escena adquirida por el instrumento OLI (*Operational Land Imager*) de Landsat-8 y dos escenas tomadas por el sensor HRG (*High Resolution Geometrical*) de Spot-5. Las fechas disponibles más cercanas a la fecha de captura de los datos de referencia y que pudieron ser utilizadas fueron 04/12/2014 para Landsat-8; y; 04/11/2014 y 01/01/2015 para Spot-5. La imagen Landsat-8 fue descargada gratuitamente desde el catálogo web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). En tanto, las dos escenas Spot-5 se obtuvieron mediante convenio con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) de la Argentina. La Tabla 1 muestra un resumen de las características técnicas principales de ambos conjuntos de datos.

Tabla 1. Características de los Productos Landsat-8 y Spot-5 Plataforma

	Landsat-8	Spot-5
Instrumento	OLI	HRG-1
Identificación	232/083	675/417
Nivel de Procesamiento	L1T-Terrain Correction	L1B-Level Processing
Bandas Multi-espectrales	1-7, 9	1-4
Tamaño de Pixel	30m	10m
Formato	Geotiff	DIMAP
Proyección / Datum	UTM / WGS84	'Pseudo' Lat/Lon WGS84
Precisión Horizontal	±12m (90% de confianza)	< 30m (68% de confianza)
Resolución Radiométrica	16bits	8bits

Existen variables que afectan el sensoramiento satelital y que no intervienen en el sensoramiento terrestre. Por esta razón, se aplicaron los procesos necesarios y posibles para convertir la información satelital en información comparable con la procedente de GreenSeeker. Para ello, se llevó a cabo la calibración radiométrica mediante conversión de los niveles digitales a valores de radiancia y reflectancia aparente y se aplicó corrección geométrica. La corrección geométrica fue necesaria para Spot-5 y se realizó utilizando puntos de control de terreno y aplicando el método de vecino más cercano para el remuestreo. En el caso de Landsat-8, el proceso de georreferenciación no fue necesario dado que la versión gratuita ya tiene aplicado este proceso usando el método de convolución cúbica para el remuestreo¹.

La radiancia calculada a partir de los niveles digitales (ND) de las imágenes satelitales fue estimada con los valores de los coeficientes de calibrado del sensor de cada banda, disponible en los respectivos archivos de metadatos (Ec. 1):

$$L_b = G_b \cdot ND_b + S_b \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

G_b: Factor de Ganancia del sensor [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$]

S_b: Sesgo del sensor [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$]

ND_b: Nivel Digital en cada pixel de la imagen para la banda “b”

L_b: Radiancia espectral en el instrumento para la banda “b” [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$]

Posteriormente, los valores de radiancia ***L_b*** en el sensor fueron convertidos a reflectividad aparente en el techo de la atmósfera (TOA - *Top Of Atmosphere*). Este procedimiento de conversión a variables físicas (entre 0 y 1) es necesario para poder realizar comparaciones entre distintos sensores y entre fechas diferentes:

$$\rho_{ap,b} = \pi \cdot L_b \cdot d^2 \cdot E_b \cdot \text{sen}(\theta) \quad (\text{Ec. 2})$$

¹ No es conveniente el uso de convolución cúbica cuando se desea generar productos temáticos resultantes de una clasificación pues este proceso degrada la información al promediarla. Sin embargo, no fue posible, hasta la fecha, obtener gratuitamente este tipo de productos satelitales con un nivel de procesamiento menor.

Donde:

d: Factor corrector de la distancia Tierra-Sol, en unidades astronómicas.

Eb: Irradiancia solar en el techo de la atmosfera para la banda “b” [$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$]

θ : Ángulo de elevación solar [grados sexagesimales]

ρ_{ap}, b Reflectividad Aparente en la banda espectral “b”

En este punto debemos remarcar que dada la ubicación y la limitada extensión espacial de nuestra área de interés (160 has de la finca) no hay efectos topográficos que afecten la información.

Finalmente, se estimaron los índices de vegetación NDVI y SAVI como indican las ecuaciones 3 y 4.

$$NDVI_i = \frac{\rho_{ap,IR_i} - \rho_{ap,R_i}}{\rho_{ap,IR_i} + \rho_{ap,R_i}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

ρ_{ap,IR_i} : Reflectividad aparente en la banda del infrarrojo cercano para el pixel “i”

ρ_{ap,R_i} : Reflectividad aparente en la banda del rojo para el pixel “i”

$$SAVI_i = (1 + L) \cdot \frac{\rho_{ap,IR_i} - \rho_{ap,R_i}}{\rho_{ap,IR_i} + \rho_{ap,R_i} + L} \quad (\text{Ec. 4})$$

El índice de vegetación ajustado al suelo SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) reduce la influencia del suelo en relación con el NDVI al utilizar el factor de ajuste experimental L; dicho factor de ajuste está relacionado con la línea vegetación-suelo y comúnmente es igual a 0.5. Tanto NDVI como SAVI varían entre -1 y 1, siendo 1 (uno) un indicador de vegetación vigorosa.

El cálculo de estos dos índices utilizando las 3 (tres) imágenes mencionadas dio como resultados 6 paquetes de datos a analizar en contraste con los datos de referencia GreenSeeker.

Análisis Espacial y Estadístico Preliminar

Los índices de vegetación satelitales fueron mapeados en una plataforma SIG en vista de efectuar un análisis preliminar. La figura 3 muestra los mapas de NDVI obtenidos. El área piloto común entre los datos de referencia y de estudio se redujo a unas 110 has. Los valores NDVI de referencia, un total de 75.860 puntos relevados en campo, fueron llevados a formato ráster de 30m y de 10m de tamaño de celda, atribuyendo a cada celda un único valor igual al promedio de los valores individuales coexistentes en el área representada por ella. De esta manera pudo establecerse una comparación basada en el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson con los índices de vegetación correspondientes a Landsat-8 y Spot-5 cuyas resoluciones espaciales son precisamente de 30m y 10m, respectivamente.

Dadas las características del área de estudio: coberturas de plantaciones de vid semi-fronosas sobre espaldero con hileras espaciadas, existe una componente de la señal procedente del suelo calcáreo que modifica la reflectividad espectral y afecta al NDVI.

Se efectuaron pruebas con el índice de vegetación SAVI, que utiliza un factor de corrección debido a la respuesta del suelo, minimizando el efecto de reflectividad del mismo. Siendo L un factor experimental, se estimó su valor con L variando entre 0.1 y 0.9 en pasos de 0.1 y observando la correlación con los NDVI de GreenSeeker; siendo L= 0.5 el valor para el cual se obtuvo la mejor correlación entre ambos conjuntos de datos (satelitales y terrestres).

La Figura 4 muestra un diagrama de flujo de la cadena de procesamiento aplicada sobre las imágenes satelitales Landsat-8 y Spot-5.

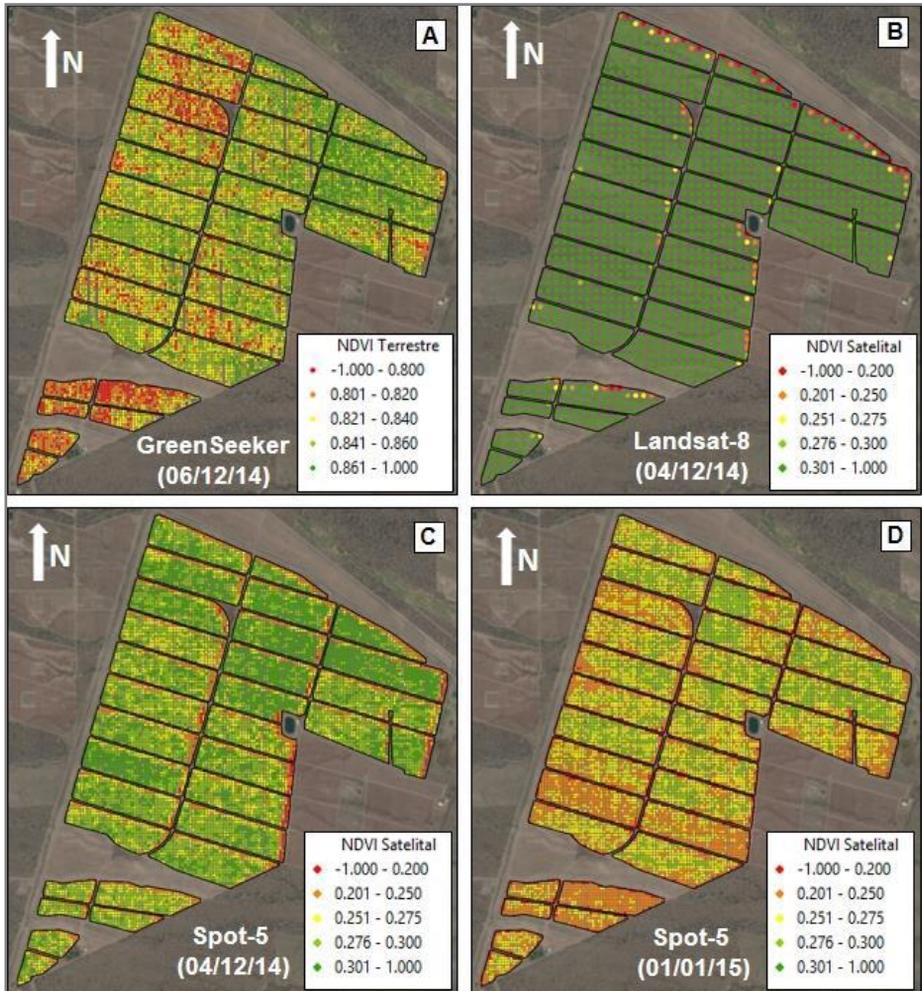
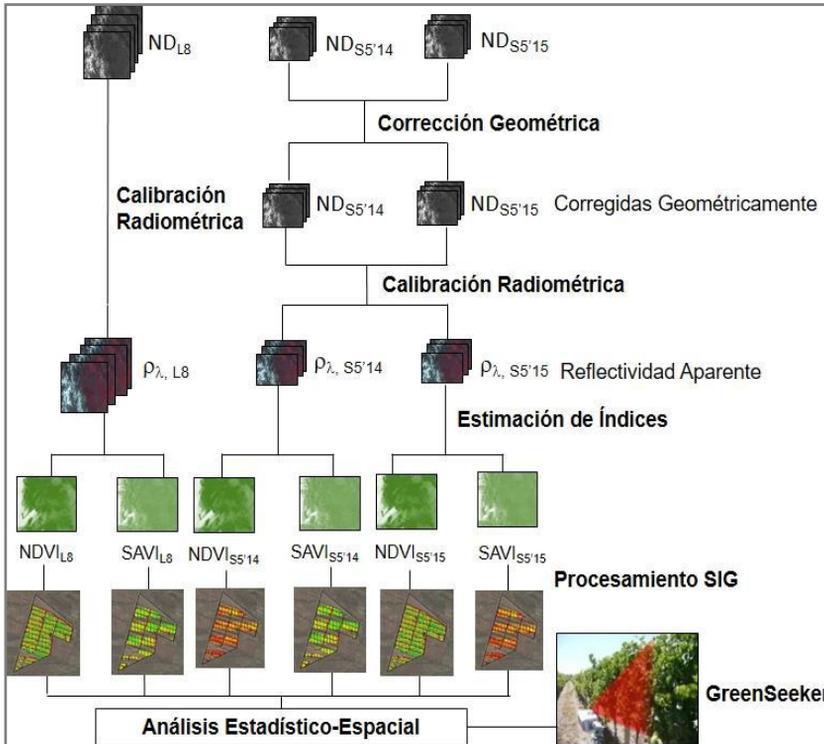


Figura 3: Mapas de NDVI Terrestre y Satelital: A) NDVI terrestre GreenSeeker (06/12/2014), B) NDVI Landsat-8 (04/12/2014), C) NDVI Spot-5 (04/11/2014) y D) Spot-5 (01/01/2015).

Figura 4. Diagrama de Flujo de la Cadena de Procesamiento



Resultados Preliminares

Los NDVI satelitales presentan discrepancias entre ellos. Se puede observar a priori que los NDVI Landsat-8 (04/12) son los más elevados y que Spot-5 (01/01) es notablemente inferior a los otros dos.

La tabla 2, muestra los valores estadísticos básicos que describen los índices NDVI y SAVI satelitales y los NDVI terrestres, calculados con software InfoStat de la Universidad Nacional de Córdoba (Di Rienzo J.A., et al. 2016).

El NDVI terrestre promedio es considerablemente superior a las medias de los NDVI y SAVI satelitales. Los respectivos histogramas muestran distribuciones cuasi-normales, con presencia de sesgos por izquierda.

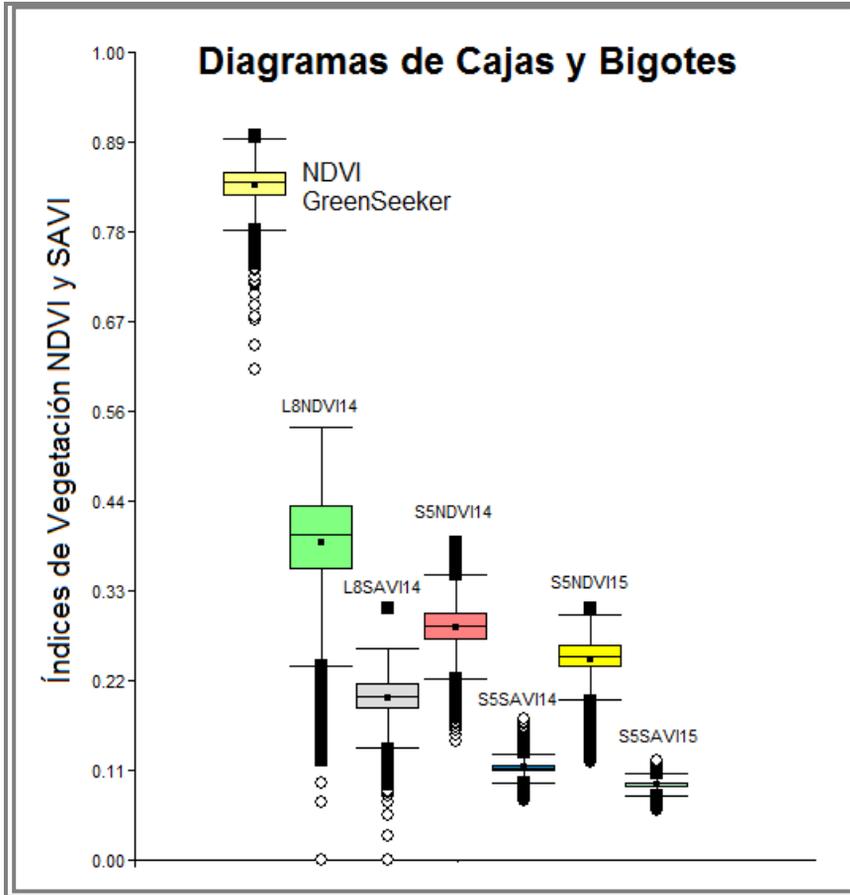
Tabla 2. Estadísticas de los índices NDVI y SAVI para el Área de Estudio (n = 11012)

Estadístico	GreenSeeker	NDVI			SAVI (L = 0.5)		
		L8 '14	S5 '14	S5 '15	L8 '14	S5 '14	S5 '15
e	75860	11012	11012	11012	11012	11012	11012
Mínimo	0.608	-0.00016	0.147	0.121	-0.00008	0.073	0.062
Máximo	0.896	0.535	0.393	0.311	0.311	0.174	0.124
Media	0.835	0.393	0.287	0.249	0.200	0.114	0.093
Desv. Estandard	± 0.022	± 0.064	± 0.027	± 0.028	± 0.028	± 0.009	± 0.006
Asimetría	-1.029	-1.115	-0.605	-1.591	-1.199	1.069	0.024
Curtosis	3.100	2.112	1.165	3.670	3.082	4.128	2.741
1er. Cuartil	0.822	0.359	0.272	0.238	0.186	0.109	0.089
Mediana	0.839	0.403	0.290	0.252	0.203	0.114	0.092
3er. Cuartil	0.851	0.439	0.305	0.265	0.218	0.118	0.096

La Figura 5 muestra los diagramas de cajas y bigotes de cada variable estudiada, sintetizando todos los estadísticos.

Con el objeto de analizar el grado de asociación o covariación lineal entre las variables medidas, se realizó un análisis de correlación multi-variado. Se estimaron los coeficientes de correlación de Pearson entre el NDVI terrestre y los índices satelitales. Los resultados se extraen de la matriz de correlación (tabla 3), donde también se puede observar la relación entre los índices satelitales. En la Figura 6 se muestra la matriz de diagramas de dispersión.

Figura 5: Diagramas de Cajas y Bigotes

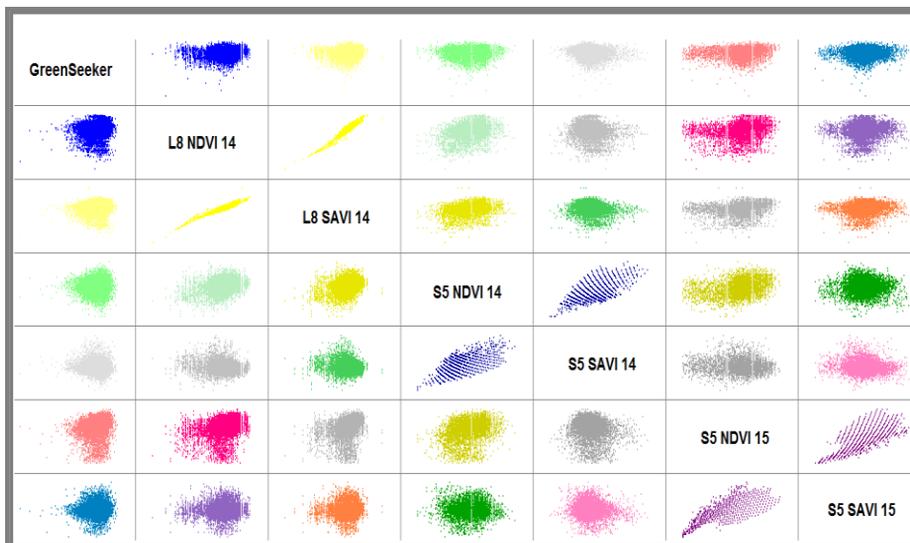


Los resultados indican una muy baja correlación entre el índice de vegetación terrestre NDVI GreenSeeker y los índices NDVI y SAVI satelitales, Landsat-8 y Spot-5. El mayor nivel de correlación lineal positiva se da con el NDVI Spot-5 (01/01/2015) con 0.20, lo cual resulta aún insignificante teniendo en cuenta la diferencia temporal entre las observaciones.

Tabla 3. Matriz de Correlación Total

Coeficiente de Correlación	Green Seeker	Landsat 8 – 2014		Spot 5 – 2014		Spot 5 – 2015	
		NDVI	SAVI	NDVI	SAVI	NDVI	SAVI
GreenSeeker	1.00	0.14	0.16	0.07	-0.14	0.20	0.04
L8 NDVI 14	0.14	1.00	0.96	0.36	-0.14	0.31	0.08
L8 SAVI 14	0.16	0.96	1.00	0.35	-0.12	0.33	0.11
S5 NDVI 14	0.07	0.36	0.35	1.00	0.38	0.36	0.003
S5 SAVI 14	-0.14	-0.14	-0.12	0.38	1.00	-0.14	-0.07
S5 NDVI 15	0.20	0.31	0.33	0.36	-0.14	1.00	0.55
S5 SAVI 15	0.04	0.08	0.11	0.003	-0.07	0.55	1.00

En cuanto a las relaciones entre SAVI y NDVI de datos de igual fecha, Landsat-8 muestra un elevado coeficiente de correlación de Pearson (0.96), no así, Spot-5 (2014) y Spot-5 (2015) que muestran, un coeficiente un poco menor al anterior, de 0.38 y 0.55, respectivamente.

Figura 6. Matriz de Diagramas de Dispersión

Desde un lugar menos significativo, se aprecia una mínima correlación entre los índices de vegetación NDVI Landsat-8 y Spot-5 de la misma fecha con coeficiente de correlación lineal de 0.36.

Análisis Estadístico considerando Píxeles Mixtos

Los resultados preliminares muestran resultados satisfactorios pues no nos permitieron vislumbrar una aplicación directa de este tipo de datos satelitales para propósitos de diagnóstico de cultivos de vid. Se continuó entonces el análisis a partir del uso de las imágenes Spot-5 de enero/2015 que por su resolución espacial y fecha son más apropiadas ya que es la época de más densidad de follaje.

Partimos de la hipótesis de que estos ambientes vitícolas son de cobertura homogénea con sólo dos tipos de clases componentes: suelo y espalderos. De acuerdo con esto, la reflectividad de cada pixel será la integración de reflectividades correspondientes a cada clase en proporciones iguales a su porcentaje de cobertura.

Sabemos que la distancia entre espalderos es de 2 metros aproximadamente lo cual nos permite calcular los porcentajes de cobertura de cada clase. Considerando que la copa oscila en unos 0.5 metros de ancho en tiempos de buen follaje, podemos estimar que existe un 80% de suelo y un 20% de cobertura vegetal dentro del área correspondiente a cada pixel que es de 10mx10m con lo cual la señal reflejada correspondiente la podemos expresar de la siguiente manera:

$$IR_i = 0.8 * IR^S + 0.2 * IR_i^V \quad \text{Ec. 5}$$

$$R_i = 0.8 * R^S + 0.2 * R_i^V \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

IR_i y R_i : Reflectancia del pixel i en el infrarrojo cercano y en el rojo respectivamente

IR^S y R^S : Reflectancia del suelo en el infrarrojo cercano y en el rojo respectivamente

IR_i^V y R_i^V : Reflectancia de la vid en el pixel " i " en el infrarrojo cercano y en el rojo respectivamente

Despejando la componente procedente de la vegetación, nos queda:

$$IR_i^V = \frac{IR_i - 0.8 * IR^S}{0.2} \quad \text{Ec. 7}$$

$$R_i^V = \frac{R_i - 0.8 * R^S}{0.2} \quad \text{Ec. 8}$$

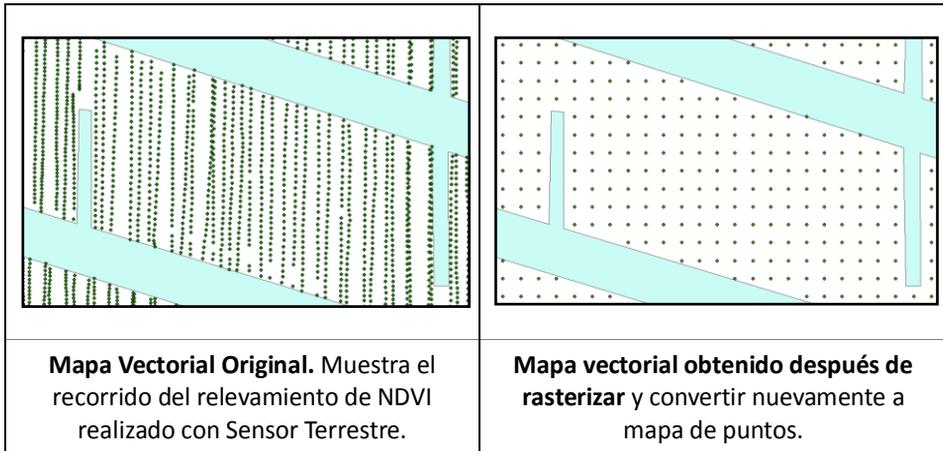
Obsérvese que IR^S y R^S no tienen subíndice relacionado a los pixeles dado que partimos de la hipótesis de que el área se caracteriza por un solo tipo de suelo cuyas características son homogéneas en cuanto a composición y textura. Por lo tanto su contribución será la misma en todos los pixeles y las variaciones pixel a pixel deberían estar relacionadas solamente con variaciones en el estado fenológico de la vid. Para conocer el aporte del suelo, se identificaron por interpretación visual de las imágenes *Google Earth* los sectores donde solo aparece esta componente y se promediaron los niveles de reflectancia aparente de los pixeles correspondientes, obteniéndose los siguientes valores promedio:

	Infrarrojo Cercano	Rojo
Suelos desnudos	0.203	0.144
Reflectancia aparente estimada para suelos desnudos dentro del área de estudio a partir de la imagen Spot5 de enero/2015.		

Si reemplazamos dichos valores en las ecuaciones 7 y 8 calculamos los niveles de reflectancia correspondientes a la vegetación en cada pixel y el correspondiente NDVI.

Para poder comparar con los datos de referencia rasterizamos la información vectorial de origen (GreenSeeker) a una imagen de celdas de 10m tal que a cada celda se le asignó el promedio de los NDVI contenidos por la misma, como se ejemplifica en la figura 7 para luego comparar mediante el coeficiente de correlación de Pearson.

Figura 7: Visualización de los datos de referencia antes y después del proceso que se aplicó sobre ellos para posibilitar su comparación con los datos de estudio



El coeficiente de correlación obtenido fue de: -0.01

Si observamos la imagen que nos provee *Google Earth* (figura 8), se identificó la presencia de flujos de humedad que atraviesan el área desde el oeste. Este es un factor atenuante de la reflectividad del suelo que debe participar en la estimación de las contribuciones de la vid planteadas en las ecuaciones 7 y 8 pues modifica los valores de IR_s y RS . Estamos entonces considerando un tercer componente, modificador del componente suelo, identificado como “ k ” en las ecuaciones 9 y 10:

$$IR_i^V = \frac{IR_i - 0.8 * IR^S * k}{0.2} R_i^V \quad \text{Ec. 9}$$

$$= \frac{R_i - 0.8 * R^S * k}{0.2}$$

$$IR_i^V = \frac{IR_i - 0.8 * IR^S * k}{0.2} R_i^V \quad \text{Ec. 10}$$

$$= \frac{R_i - 0.8 * R^S * k}{0.2}$$

Figura 8: Imagen Google Earth de un Sector del área de estudio. Se ve la organización de los cultivos de vid en cuarteles y la presencia de flujos de humedad atravesando el área



El valor de “k” se encontró empíricamente, asignándole valores y calculando el coeficiente de correlación con respecto a los datos de referencia. La mejor respuesta fue obtenida para $k= 0.45$; esto significa un 45% de atenuación de la señal del suelo por efecto de humedad. Debemos hacer la salvedad de que estamos haciendo una estimación muy simplificada de un factor muy complejo por su variabilidad en el espacio. Se aplicó idéntico procedimiento pero considerando cada cuartel por separado. El mejor resultado fue de 0.75 lo cual es muy bueno; pero sólo se dio en un cuartel. Los datos fueron mapeados utilizando el módulo de geoestadística de ArcGis v10.2 (*GeoestadisticalAnalyst*) aplicando el método de Kriging a los efectos de visualizar los resultados. Las figuras 9 y 10 muestran los mapas de predicción obtenidos.

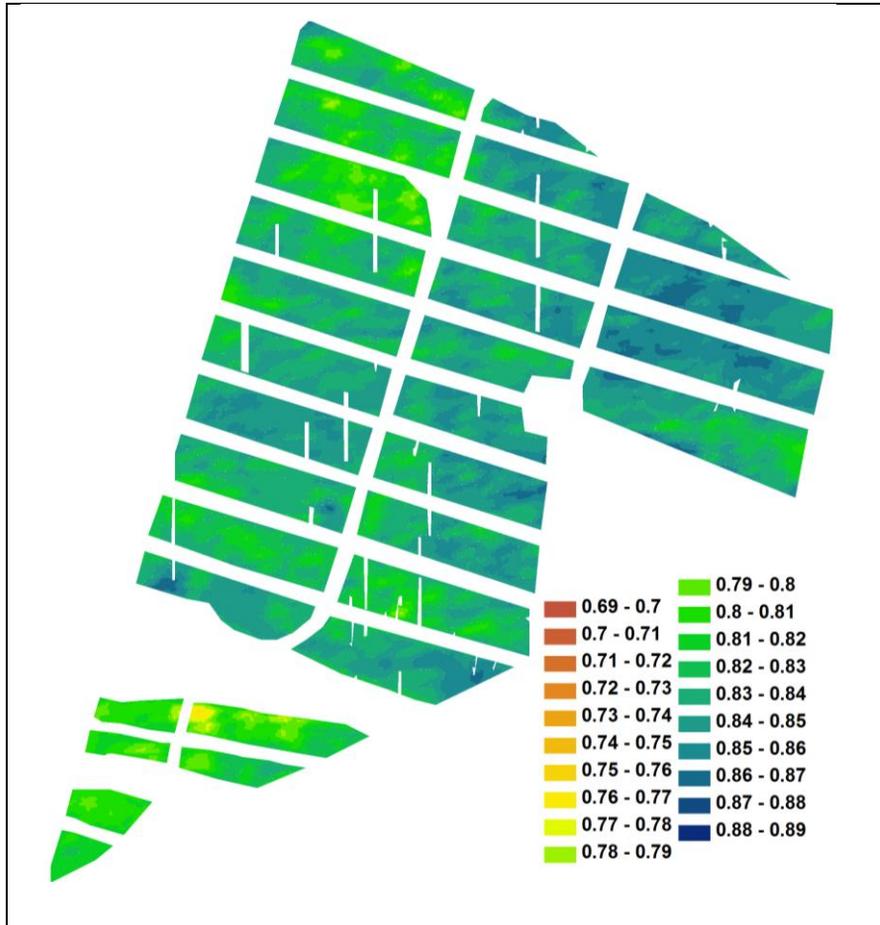
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El propósito del trabajo fue establecer una metodología simple, económica y eficiente para generar productos que aporten al monitoreo en la viticultura de precisión. Los resultados obtenidos a partir de este estudio plantean una restricción en el uso de imágenes multiespectrales de media resolución para la generación de índices con propósitos de diagnóstico de los viñedos de tipo espaldero, donde la variación del vigor en estas viñas tiende a expresarse mucho más en el plano vertical que en el horizontal. Aunque no descartamos la posibilidad de que existan otras aplicaciones concretas para viticultura de precisión.

Dado que el sensor terrestre de proximidad GreenSeeker permite un muestreo espacial cuasi-continuo enfocado en una cobertura “pura” en relación con una imagen satelital, es lógico esperar valores más elevados de NDVI respecto a los respectivos índices satelitales; no así cuando se trata de niveles de correlación. Los resultados muestran una baja correlación entre los datos de referencia y los de estudio; correlaciones que mejoraron al analizar sectores más pequeños (cuarteles)

Consideramos que los distintos niveles de humedad en el suelo han incidido fuertemente en los resultados, afectándolos.

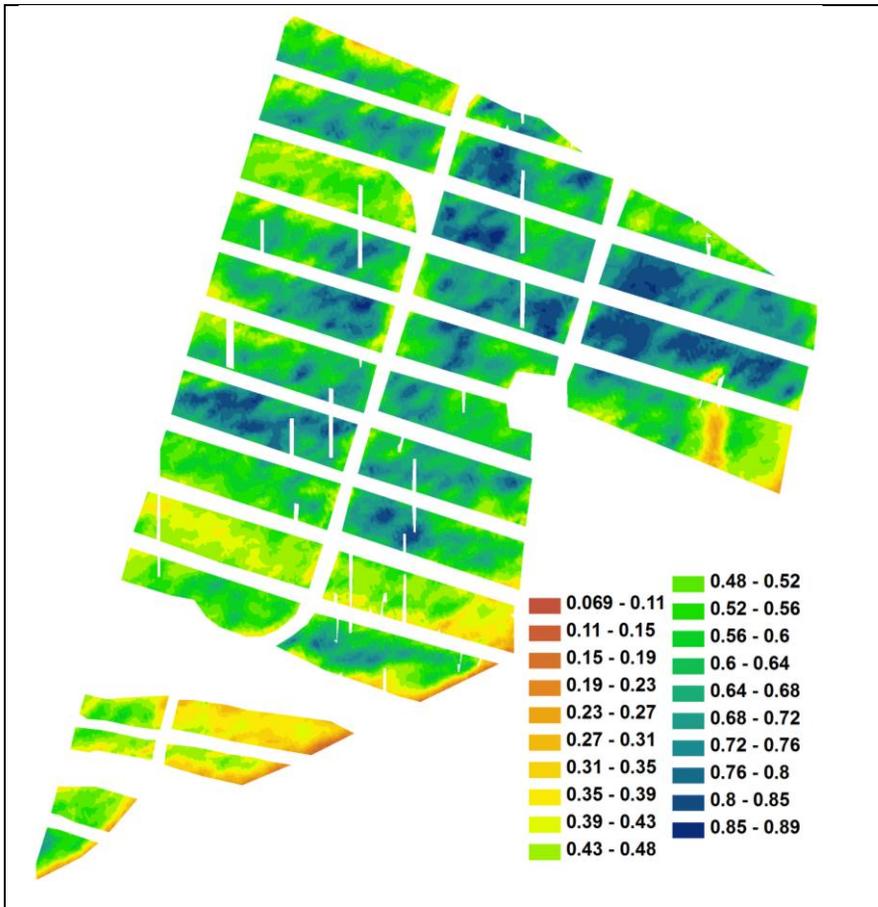
Figura 9: Mapa de Predicción calculado con el método de Kriging aplicado sobre los datos de Referencia



Por su geometría lineal, las plantaciones tipo espaldero cubren ralmente el terreno y esto significa que la señal es relativamente débil comparada con el aporte del suelo en el área representada por un pixel, esto limita la época de estudio que debe ser cuando la planta está con una superficie foliar óptima.

La metodología aplicada al área de estudio no alcanza para suplantar o predecir los resultados de una tecnología de avanzada como es el sensor terrestre de proximidad GreenSeeker.

Figura 10: Mapa de Predicción calculado con el método de Kriging aplicado sobre los datos de Estudio de la imagen Spot5 de Enero/2015



Agradecimiento: Los autores del presente trabajo de investigación queremos agradecer a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) por el acceso a los datos Spot-5 mediante un convenio marco firmado con la Universidad Juan Agustín Maza.

BIBLIOGRAFÍA

Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agraria (AACREA) y otros (2011) "Plan Estratégico Vitivinícola Argentina 2020"

BRAMLEY, R. G. V. & PROFFITT, A. P. B. (1999). Managing variability in viticultural production. *Grapegrower and Winemaker*, 427, 11–16.

BRAMLEY, R. G. V & WILLIAMS, S. K. (2001). A protocol for the construction of yield maps from data collected using commercially available grape yield monitors. *Cooperative Research Centre for Viticulture, Adelaide*.

COOK, S. E. & BRAMLEY, R. G. V. (1998). Precision Agriculture - Opportunities, Benefits and Pitfalls. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38, 753-763.

DI RIENZO J.A., CASANOVES F., BALZARINI M.G., GONZALEZ L., TABLADA M., ROBLEDO C.W. *InfoStatversión 2016*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>

HUETE, A. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.

PIERCE, F. J. & NOWAK, P. (1999). Aspects of Precision Agriculture. *Advances in Agronomy*, 67, 1–85.

PROFFITT, T., BRAMLEY, R., LAMB, D., WINTER, E., DUNN, G., ROBINSON, S. (2006). *Promoting the adoption of precision viticulture. Proceedings of the 6th International Cool Climate Symposium for Viticulture and Oenology*, Christchurch.

PROFFITT, T.; MALCOLM, A. (2005). *Zonal vineyard management through airborne remote sensing. The Australian & New Zealand Grapegrower & Winemaker*, 502, 22-27.

ROUSE, J., R. HAAS, J. SCHELL, AND D. DEERING (1973). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*, NASA, 309-317.

VALLONE, R. (2005). *Matriz Institucional INTA. Documento Eco-región Zona Cuyo*.

VAN DEN BOSCH, M. E. (2008). *Zonas Agroecológicas Homogéneas - San Juan y Mendoza*. Ed. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

Tutorial Módulo GestadististicalAnalyst - ArcGis 10.2- ESRI

Los autores

Sebastián Balbarani es Ingeniero Agrimensor graduado en la Universidad Nacional de Rosario (U.N.R) en el año 2007. Entre los años 2005 y 2010 se desarrolló en el área de geoservicios de la empresa Geoagro by TEK brindando soluciones integrales para la Agricultura de Precisión. Entre 2006 y 2010 fue auxiliar de cátedra de las asignaturas Geodesia II y Cálculo de Compensaciones en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la U.N.R. Entre 2010 y 2015, llevó a cabo el Doctorado en Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, especializándose en procesamiento de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) para la detección, medición y caracterización de la deformación de la superficie terrestre. A su vez, en ese mismo período, fue docente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Juan Agustín Maza de la ciudad de Mendoza, Argentina. Actualmente, el Dr. Ing. Sebastián BALBARANI se desempeña como analista de ciencia e innovación en el área de aplicaciones geoespaciales de la empresa SUR Emprendimientos Tecnológicos S.R.L., y es docente en el Departamento de Agrimensura de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (U.B.A.).
sbstbalbarani@gmail.com

Daniel Comes es Ingeniero Agrimensor. Actualmente es profesor Titular de las Cátedras de “Sistemas de Información Geográfica” y de “Técnicas de Cartografía Digital” y ejerce el cargo de profesor Titular en las cátedra de “Fotogrametría y Fotointerpretación”. Ha participado como investigador asociado en los proyectos “Aplicación y utilización de Imágenes Satelitales para la Planificación Hídrica y Territorial de la Provincia de Mendoza”. Departamento General de Irrigación (2004), “Propuesta de desarrollo y potencialidad de las Microrregiones en la República Argentina”. Universidad Juan Agustín Maza (2007), “Microrregiones de Mendoza para el Desarrollo Sustentable”. Universidad Juan Agustín Maza (2009), “Evaluación de los alcances y limitaciones de las Geotecnologías en Estudios de desertificación. Caso de estudio: noreste de la provincia de Mendoza, Argentina.” Universidad Juan Agustín Maza (proyecto asistido por Planet Action e IPGH-2012). Ha participado como expositor en diferentes congresos nacionales e internacionales y como integrante de equipos en diferentes publicaciones. Actualmente se desempeña como Consultor Internacional en GIS para el PROSAP y Banco Mundial en diferentes proyectos de alcance nacional. Es director de Prácticas Profesionales Supervisadas de alumnos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Juan Agustín Maza y Profesional estable del Área de Planeamiento de La Dirección Provincial de Vialidad.

dcomes_2103@hotmail.com

Karen Úrsula Langer G. es Licenciada en Geofísica y Diplomada en Ordenamiento Territorial (Eje Territorial). Actualmente es docente en la Universidad Maza en la cátedra de Teledetección e Interpretación de Imágenes e integra grupos de investigación en temáticas de Geo-tecnologías. Ha trabajado en ámbitos académicos, públicos y privados. En el ámbito público se desempeñó como Asistente Técnica Especialista en Sensoramiento Remoto y SIG para el proyecto de Evaluación de las cuencas hídricas de la Provincia de Mendoza a través de la FAO –ONU en el periodo 2002-2004. En el ámbito académico ha sido docente en la Universidad Nacional de San Juan en temáticas relativas a la Geofísica y en la Universidad Nacional de Cuyo en temáticas relacionadas con sensoramiento remoto. En el ámbito privado, ha trabajado como consultora Geofísica Senior en proyectos de exploración geofísica para distintas empresas mineras.

karenursulalangerg@gmail.com