APLICACION DE LOS SENSORES REMOTOS EN LA DETECCION DE ALUVIONES AURIFEROS EN LA COSTA PACIFICA COLOMBIANA

HUGO FORERO-ONOFRE[1], JORGE E. LOPEZ RENDON[2], WILLIAM MCCOURT[3]

1: INGEOMINAS, Avenida de la Asamblea No 26-95, Barrio Manga, Cartagena, COLOMBIA

2: Universidad EAFIT, Departamento de Geología, Apartado Aéreo 3300, Medellín, COLOMBIA

3: British Geological Survey, 4 Niker Hill Keyworth, Nottingham NG12 5GG, ENGLAND

RESUMEN: El INGEOMINAS (Servicio Geológico de Colombia) inició en 1986, en asociación con el Servicio Geológico Británico, la investigación sistemática de depósitos de oro aluvial que ocurren en paleocanales localizados en la Llanura Costera del Pacífico, al Suroccidente de Colombia. La zona específica de estudio (área Cheté-Coteje-San Pablo, Departamento del Cauca) está densamente cubierta por bosque tropical, tiene una precipitación pluvial anual promedio de 5 000 mm, y exhibe una densa cobertura de nubes durante la mayor parte del año. La carencia de mapas geográficos exactos y de fotos aéreas adecuadas, al igual que de vías de comunicación y acceso a los posibles sitios de interés geológico-económico hizo que, durante el desarrollo del proyecto, se involucraran los sensores remotos (imágenes satelitarias) como instrumento fundamental de exploración. En particular, se adquirió y procesó una imagen digital LANDSAT-TM del área de estudio, en las fases iniciales del proyecto, y la información derivada de esta imagen se complementó con la obtenida de una imagen digital SPOT-XS aportada por la Universidad EAFIT. En este artículo se presentan los resultados del análisis de las imágenes de satélite, evaluados en conjunto con el trabajo geológico de campo.

El basamento del área estudiada forma parte del Terreno geológico Atrato-San Juan-Tumaco, pero los materiales que constituyen los aluviones auríferos se originaron principalmente a partir de erosión, durante el levantamiento del Terciario tardío, de rocas mineralizadas del Terreno Dagua el cual forma, a su vez, parte de la Cordillera Occidental Colombiana. Los principales aluviones auríferos del área se localizan discordantemente sobre una secuencia sedimentaria del Terciario tardío constituída por una alternancia de conglomerados, arenitas y lodolitas, están cubiertos parcialmente por flujos de lodo, y se hallan localmente afectados por fallas que exhiben movimientos Cuaternarios. Estos paleocanales son usualmente difícilmente diferenciables en superficie y sus rasgos geomorfológicos característicos están generalmente enmascarados por la vegetación.

La aplicación de técnicas de procesamiento digital de imágenes de satélite, acoplada a observaciones de campo particularmente en aquellos sitios donde se adelanta actualmente

minería activa (sitios de prueba), permitió identificar prolongaciones de paleocanales, esto es, nuevos blancos de exploración, al igual que dimensionar los paleovalles y los depósitos de flujo de lodo, aparentemente genéticamente relacionados parcialmente a los aluviones auríferos. En la manipulación de estas técnicas de procesamiento de imágenes, tanto para la imagen LANDSAT-TM como para la imagen SPOT-XS, se hizo uso principalmente de un sistema Pericolor y se incluyeron: estudio de bandas individuales, determinación del Indice de Vegetación Normalizado (IVN), uso de relaciones entre bandas, sustracción y adición de bandas, técnicas de filtraje (Sobel, Laplace), y composiciones a color para diferentes combinaciones. Se encontró que, para casos como el investigado, es muy importante, para la aplicación de cualquiera de estas técnicas, la definición inicial de la dinámica a utilizar y el empleo de una adecuada expansión del contraste.

Los paleocanales auríferos y los paleovalles se destacan, en la imagen SPOT-XS, particularmente al usar el Indice de Vegetación Normalizado, la diferencia de bandas XS3-XS1, y composiciones a color, así: (a) XS3=Azul, XS3-XS1=Verde, IVN=Rojo; (b) XS3=Azul, IVN=Verde, XS2/XS3=Rojo. Además, XS3-XS1 contrasta los flujos de lodo y las zonas de aluviones recientes.

Por su parte, en la imagen LANDSAT-TM, los paleocanales se definen muy bien con los siguientes tratamientos: (a) Sustracción de bandas: TM5-TM7, TM4-TM5, TM4-TM7, TM5-TM2, TM4-TM2; (b) Composición a color: TM1=Azul, TM4-TM7=Verde, TM5-TM2=Rojo; (c) Composición a color: TM1=Azul, TM5-TM2=Verde, TM4-TM7=Rojo. Tanto paleocanales como paleovalles se realzan muy bien con: (a) Sustracción de bandas: TM5-TM2, TM4-TM2; (b) Composición a color: TM1=Azul, TM5=Verde, TM4=Rojo. Todos los resultados anteriores se explican con base en las diferentes condiciones de respuesta espectral de la vegetación, agua y suelos, a la radiación electromagnética.

ABSTRACT: INGEOMINAS (Colombian Geological Survey), jointly with the British Geological Survey, began in 1986 a systematic exploration of paleochannel alluvial gold deposits located in the Pacific Coastal plain, SW Colombia. The study area (Timbiqi and Napi Basins, Cauca department) has a heavy cover of tropical forest, a mean annual pluvial precipitation of 5 000 mm, and is currently covered by thick clouds during most of the year.

The lack of accurate geographic maps and appropriate aerial photographs, as well as the absence of roads and tracks to access the geological targets, motivated the application of remote sensing products (satellite images) as a principal exploration tool. In particular, a LANDSAT-TM digital image of the area was acquired and processed during the initial phase of the project; the information obtained from this image was complemented by data from a SPOT-XS digital image contributed by EAFIT University. In this paper, results of satellite images analysis, assessed jointly with geological field work are shown.

The study area basement makes part of the Atrato- San Juan- Tumaco geological terrain, but the constituents of the alluvial gold placers were originated from erosive events that affected the mineralized rocks of another geological terrain, the Dagua Terrain, during the late Tertiary orogeny of the Colombian Western Cordillera. The principal gold placers of the area are found in paleochannels and overlay unconformably an upper Tertiary sedimentary sequence conformed by an alternation of conglomerates, sandstones and mudstones; they are partially covered by mudflows and locally affected by Quaternary faults. These paleochannels are not

clearly recognized on the surface, and their geomorphologic features are generally masked by the vegetation.

The application of digital processing techniques on satellites images, together with the field observation in the areas of active mining (test sites) allowed the identification of paleochannel prolongations, i.e. new exploration targets, and to measure paleovalleys and mudflow deposits, which seem to be partially genetically related to alluvial gold placers.

Image processing technique for both LANDSAT-TM and SPOT-XS products were done using a Pericolor System. The process included: individual band analysis, normalized vegetation index (NVI), band ratioing, band subtraction, band addition, spatial filtering (using Sobel and Laplace Kernels), and generation of false colour composites for different bands and band combinations. It was found that the definition of the initial dynamics as well as an adequate contrast stretching for the band, are essential to obtain the best results using any of these techniques.

Paleovalleys and paleochannels with known gold content are enhanced in SPOT-XS images using normalized vegetation index, and band subtraction XS3-XS1, and in the following false colour composites: (a) XS3 = blue, XS3-XS1 = green, NVI = red, (b) XS3 = blue, NVI = green, XS2/XS3 = red. Additionally, XS3-XS1 contrasts mudflows and recent alluvial deposits.

On the other hand, paleochannels are very well defined in the LANDSAT-TM image using the following process: (a) band subtraction: TM5-TM7, TM4-TM5, TM4-TM7, TM5-TM2, TM4-TM2; (b) false colour composites: TM1 = blue, TM4-TM7 = green, TM5-TM2 = red; TM1 = blue, TM5 = green, TM4-TM7 = red. Both paleochannels and paleovalleys are well enhanced by: (a) band subtraction TM5-TM2, TM4-TM2; (b) false colour composite: TM1 = blue, TM5 = green, TM4 = red. All these results are because of different conditions of spectral answer of vegetation, water and soil, to electromagnetic radiation.

INTRODUCCION

Para disminuir y eventualmente detener la migración de la población rural a las ciudades, y para fortalecer las economías locales, el Gobierno Nacional diseñó, en la década de los años 80, diferentes planes de desarrollo para las regiones marginadas de Colombia. Uno de estos planes, el "Plan de Desarrollo Integral de la Costa Pacífica" (PLADEICOP), se enfocó hacia el desarrollo económico y social del suroccidente de Colombia e incluyó la pequeña minería de oro aluvial como una de las actividades económicas primarias de esta región, particularmente en la zona de la Llanura Costera Pacífica y del piedemonte occidental de la Cordillera Occidental. Al iniciar la implementación del plan se encontró, a nivel gubernamental, una gran carencia en el conocimiento geológico-minero de la región. Se comisionó entonces al INGEOMINAS (Servicio Geológico Nacional) para que diseñara y pusiera en marcha un plan de estudios geológico-mineros cuyos resultados soportaran una adecuada asesoría técnica a las comunidades dedicadas a la actividad minera.

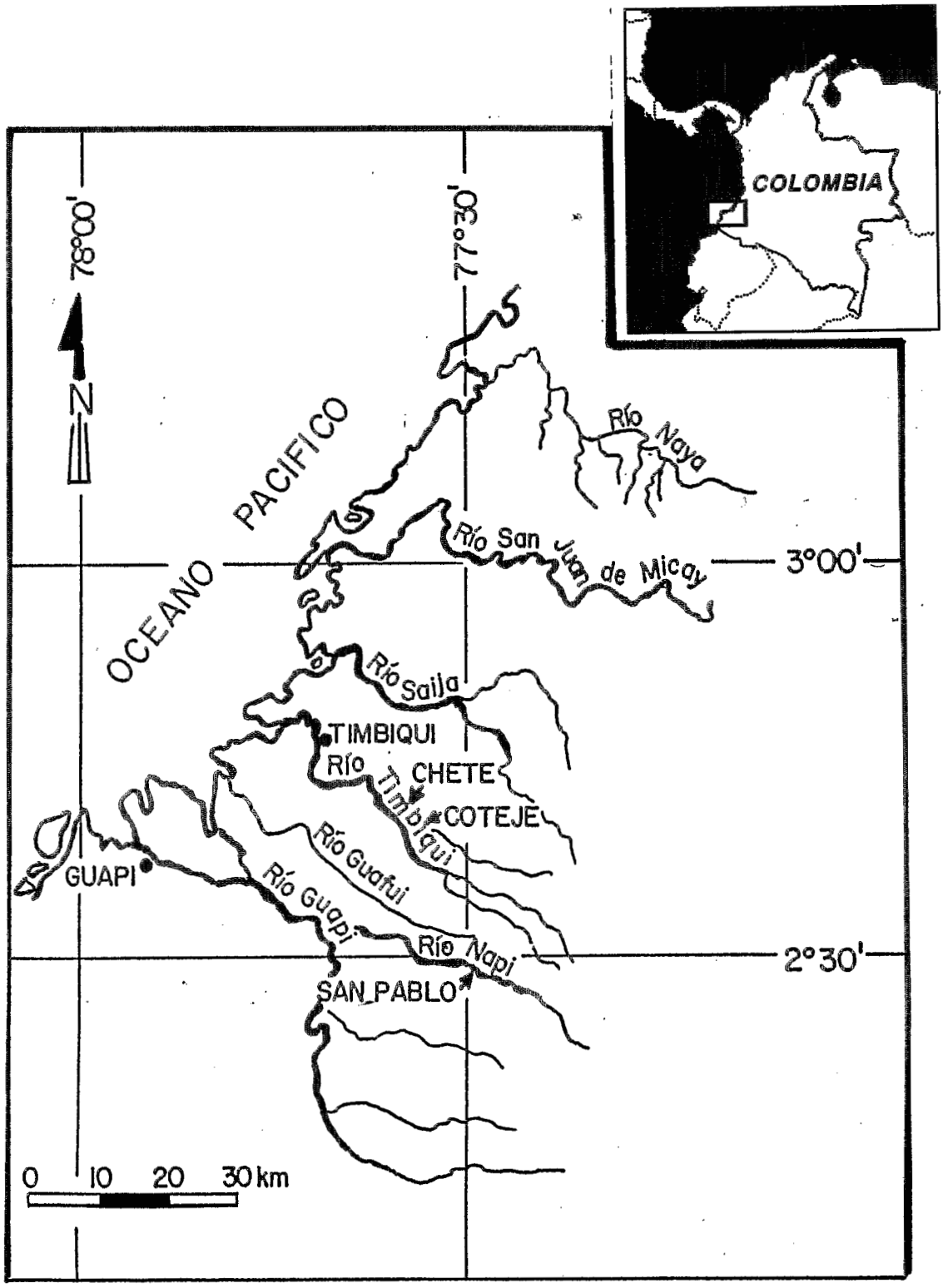


Fig. 1: Localización de la zona de estudio y de los sitios especificos Coteje, Cheté y San Pablo, referidos en el texto.

El INGEOMINAS orientó su plan hacia dos objetivos prioritarios: investigación detallada en áreas tradicionalmente mineras, y exploración regional geológico-minera. Para el primer objetivo, se escogieron las comunidades mineras de Cheté y Coteje, a lo largo del Río Timbiquí (fig. 1), cuya producción aurífera de aluvión había sido alta en el pasado, pero que había disminuído notoriamente en los últimos años. Se pretendía establecer si la disminución en la producción se debía a agotamiento real de los depósitos auríferos o a otros factores. De los trabajos de campo en el área Cheté-Coteje, incluyendo microsísmica de refracción y geoeléctrica, se evidenció que esta disminución en la producción se debía primordialmente a una deficiente asesoría técnica, particularmente en lo que tenía que ver con la selección de posibles sitios de explotación (Castro y Forero-Onofre, 1987). En el trabajo de Castro y Forero-Onofre (1987) se pudieron determinar, además, posibles prolongaciones de algunos de los aluviones auríferos, al igual que columnas estratigráficas preliminares.

Para el segundo objetivo se estableció un convenio de cooperación técnica con el Servicio Geológico Británico, dentro del marco del proyecto "Metales Preciosos del Pacífico" (MPP), para la cartografía geológica e inventario minero de las cuencas de los Ríos Timbiquí, Guafui y Guapi (fig. 1), así como para el planteamiento de posibles modelos acerca del origen del oro presente en los depósitos y sus mecanismos de acumulación.

Los resultados obtenidos en los trabajos geológicos iniciales permitieron una primera definición de rasgos geomorfológicos asociados con los placeres auríferos, el reconocimiento de lineamientos que parecen controlar las zonas mineralizadas de Cheté y Coteje, y el trazado de algunos paleovalles en Coteje y San Pablo, localidad esta última situada a lo largo del Río Napi, en la cuenca del Río Guapi (Castro y Forero-Onofre, 1987; Annells et al., 1988). Además se detectaron mesetas disectadas desarrolladas a partir de un flujo de lodo que también contiene valores de oro, y algunos paleocanales auríferos localizados tanto en valles actuales (Cheté) como en paleovalles (Coteje, San Pablo).

Estos aspectos están asociados a características tales como cambios en la topografía y variaciones en la vegetación y en la textura del suelo, que pueden detectarse y diferenciarse en las imágenes de satélite debido a su amplia resolución espectral y a la visión sinóptica que ofrecen de un área extensa. Lo anterior, junto con la carencia de una cartografía adecuada de la región y la limitada utilidad de las fotografías aéreas disponibles, condujo a la utilización de imágenes de satélite en esta investigación. Adicionalmente, el acceso muy difícil y costoso al área justificó esta utilización como complemento básico de la información adquirida en el terreno.

Durante el desarrollo de este proyecto de exploración regional, el Servicio Geológico Británico adquirió parte de una escena LANDSAT-TM de la zona de trabajo, correspondiente a un área de 90 km x 90 km. Posteriormente, el Departamento de Geología de la Universidad EAFIT (Medellín) ofreció al INGEOMINAS su participación en esta investigación por medio del procesamiento digital e interpretación geológica de una escena SPOT-XS del mismo sitio y que cubre un área de 60 km x 60 km.

El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo utilizando el sistema Pericolor del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Bogotá). En este artículo se presentan los diferentes tratamientos de las imágenes de satélite utilizadas, se evalúan los resultados de los análisis de las imágenes en conjunto con el trabajo de campo, y se seleccionan aquellos tratamientos que

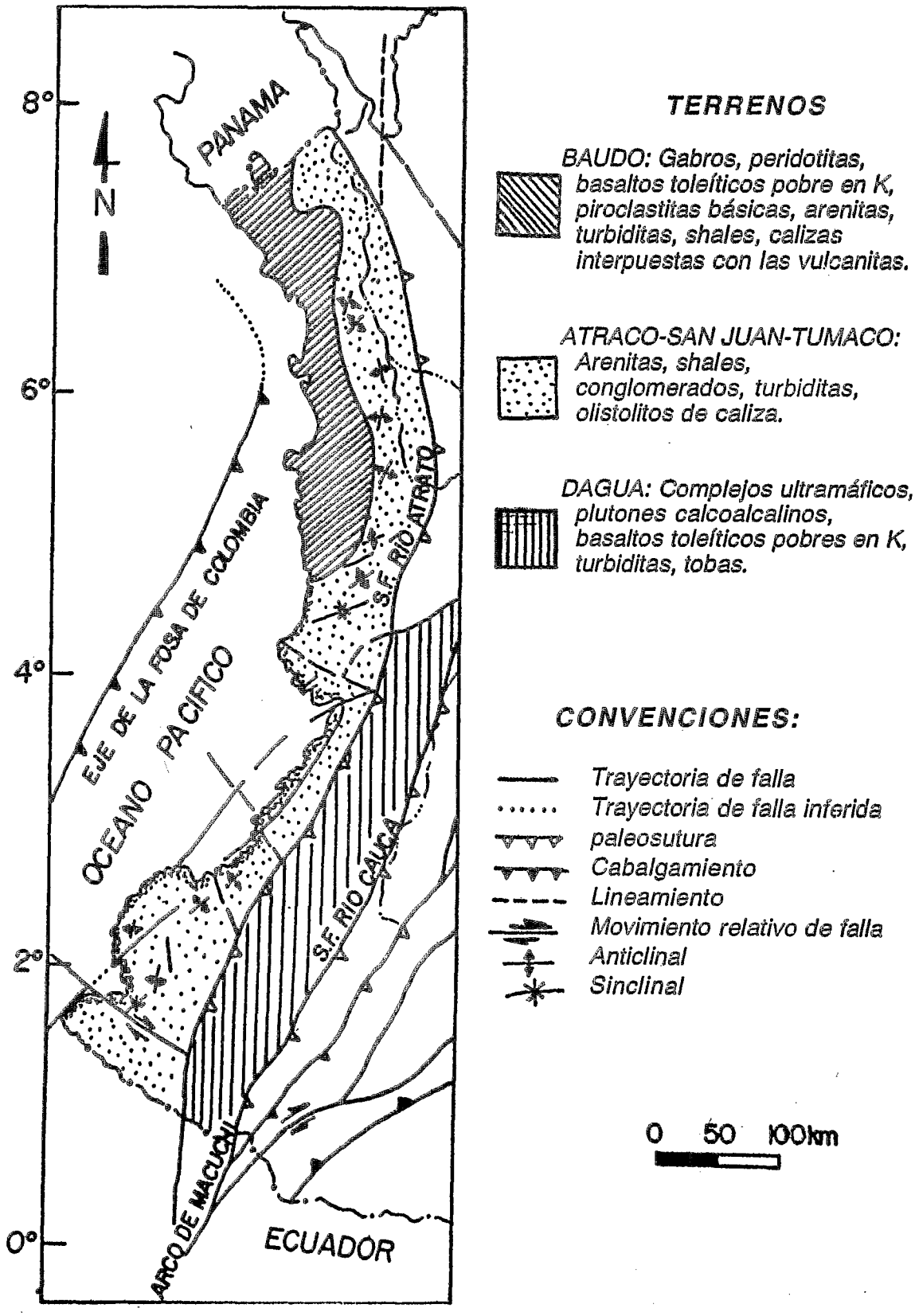


Fig. 2: Mapa geologico generalizado, Costa Pacifica de Colombia (modificado de Bueno y Govea, 1976, Etayo et al., 1986, Gomez, 1986).

resultaron más favorables para la identificación de paleocanales auríferos y paleovalles, esto es, de blancos para exploración detallada posterior.

LOCALIZACION GEOGRAFICA Y GEOLOGICA

La zona del presente proyecto está ubicada entre los 77°19' y 77°39' de longitud Oeste y 2°27' y 2°45' de latitud Norte, en la denominada Llanura Costera del Pacífico, al suroccidente de Colombia, en el Departamento del Cauca, y comprende específicamente las comunidades mineras de Coteje, Cheté y San Pablo, las dos primeras situadas a lo largo del Río Timbiquí y la última a lo largo del Río Napi (fig. 1). En esta selección se tuvo en cuenta la existencia de estudios geológicos previos relativamente detallados, para las áreas de Coteje y Cheté (Castro y Forero-Onofre, 1987), y de tan sólo un bosquejo geológico regional para el área de San Pablo (Annells et al., 1988).

En las tres áreas prevalece un clima tropical húmedo, con precipitación promedia anual del orden de 5000 mm. De oriente a occidente se diferencian tres zonas topográficas: (a) El flanco occidental de la Cordillera Occidental, caracterizado por un terreno montañoso profundamente disectado, con elevaciones que varían entre unos 400 m y 1500 sobre el nivel del mar; (b) El piedemonte, con relieve ligeramente ondulado y elevaciones entre 50 m y 400 m sobre el nivel del mar, es una zona donde es común encontrar terrazas elevadas por encima del nivel de los ríos actuales; y (c) La llanura costera, que es relativamente plana respecto a las dos zonas anteriores y que se desarrolló por peneplanación desde el Terciario tardío en respuesta a levantamiento regional (Annells et al., 1988).

Estas tres áreas pertenecen geológicamente al terreno suprayacente Atrato- San Juan-Tumaco (fig. 2), caracterizado por una secuencia volcano-sedimentaria de edad Terciario temprano a Cuaternario (Etayo et al., 1986). Por su parte, el terreno Dagua, que conforma gran parte de las estribaciones occidentales de la Cordillera Occidental, está dominado por unidades litológicas que varían en edad desde Cretáceo a Terciario y que incluyen complejos ultramáficos, basaltos toleíticos pobres en potasio, turbiditas y tobas acuógenas con metamorfismo penetrativo de bajo grado, y plutones calcoalcalinos. Ambos terrenos se originaron posiblemente en la zona de colisión Placa Oceánica-Placa Continental al occidente de Colombia, y el terreno Atrato- San Juan- Tumaco es probablemente resultado de la colmatación, desde el Eoceno tardío al Plioceno, de la cuenca formada durante la colisión (Pérez, 1980; Etayo et al., 1986).

Durante el trabajo de campo del Proyecto MPP se identificó, en el terreno Atrato-San Juan-Tumaco, una secuencia estratigráfica que incluye andesitas presumiblemente del Terciario temprano (Annells et al., 1988; McCourt et al., 1990) y una secuencia de rocas sedimentarias dominantemente clásticas, cuya unidad basal se dató en el Eoceno medio (Duque-Caro, en Annells et al., 1988) y cuya unidad superior (Formación Mayorquín) se ha datado como Plioceno.

Las unidades recientes están caracterizadas por paleovalles y paleocanales con yacimientos auríferos (unidades Q_0, Q_2 y Q_3 de Annells et al., 1988), flujos de lodo de posible origen volcánico (McCourt et al., 1990) donde también se detectó oro (unidad Q_1 de Annells et al., 1988), y otros depósitos de terrazas aluviales, coluviones y depósitos de ladera (unidad Q_4).

Parte de las unidades litológicas que constituyen el terreno Dagua, al oriente de la zona de estudio, presenta mineralizaciones reconocidas de metales preciosos de filón y de sulfuros de metales básicos, y se postula este sector oriental como la posible fuente de aporte de los materiales que constituyen los placeres auríferos objeto de la presente investigación.

PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN SPOT-XS

SELECCION DE VENTANAS Y DEL AREA DE ESTUDIO

Se seleccionaron tres ventanas de 5.12 km de lado en el terreno (256x256 pixeles), dos de ellas (Coteje, Cheté) localizadas en el área del Río Timbiquí y la tercera (San Pablo) en el área del Río Napi (fig. 1, 3 y 4). Como "Area de Estudio" se escogió la Ventana 1 (Coteje) ya que se disponía para esta área de resultados de estudios detallados de campo tanto geológicos como geofísicos (Castro y Forero-Onofre, 1987; Annells et al., 1988) que podrían ser correlacionados con la información derivada del análisis de las imágenes de satélite.

PROCESAMIENTO DIGITAL DEL AREA DE ESTUDIO

Expansión del contraste: Este procesamiento se aplicó para cada banda individual (XS1, XS2, XS3) y para las diferentes combinaciones de bandas, utilizándose la función de transformación lineal cuyos valores máximos y mínimos se indican en la Tabla 1, y que fueron seleccionados a partir de los histogramas de cada imagen. Se encontró que la banda XS3 adecuadamente contrastada permitía visualizar información relacionada con la localización de paleocanales auríferos.

Indice de Vegetación Normalizado (IVN): La aplicación de este algoritmo [IVN=(XS3-XS2)/(XS3+XS2)] realzó la localización de los paleocanales obtenida al contrastar la banda XS3. Efectivamente, se destacan todavía más los rasgos superficiales indicativos de presencia de paleocanales y que muy probablemente están asociados con cambios sutiles en la vegetación.

Relación de bandas XS2/XS3: Al efectuar esta relación se encuentra que el realce de los paleocanales es muy bajo. Sin embargo, aplicando una expansión del contraste a esta relación se obtuvo una mejor definición de los rasgos realzados, al igual que de los cuerpos de agua. Al intentar utilizar el índice invertido (XS3/XS2) se consiguió una anulación de la imagen, debido a la mayor reflectancia en la banda XS3 con respecto a XS2.

Sustracción de bandas XS1-XS2: Con esta sustracción no se realzan rasgos asociados a paleocanales. Sin embargo, XS1-XS2 permitió diferenciar zonas de cultivos ya que este intervalo corresponde al intervalo donde es visible la vegetación y donde son detectables variaciones en el contenido de clorofila de las plantas.

Sustracción de bandas XS3-XS1: El resultado de esta sustracción demostró ser muy útil ya que destacó notoriamente los rasgos superficiales asociados con los paleocanales y permitió detectar curvas adicionales en los paleocanales, no-detectadas en los tratamientos anteriores. Además, en el resultado visual obtenido, las zonas de aluviones recientes se mostraron

realzadas con pixeles claros y números digitales (ND) mayores de 70, en tanto que los cuerpos de agua quedaron anulados (ND=0, negro).

Tabla 1: Valores para la expansión del contraste en la Imagen SPOT-XS

Localidad	Banda/Combinación de banda	Valor Mínimo	Valor Máximo
Coteje	XS1	35	96
	XS2	19	85
	XS3	15	115
	(XS3-XS2)/(XS3+XS2)	120	154
	XS2/XS3	69	100
	XS1-XS2	10	29
	XS3-XS1	0	76
Cheté	XS1	35	72
	XS2	19	78
	XS3	76	116
	(XS3-XS2)/(XS3+XS2)	109	183
	XS2/XS3	48	112
	XS3-XS1	30	66
San Pablo	XS1	41	54
	XS2	15	39
	XS3	31	121
	(XS3-XS2)/(XS3+XS2)	95	155
	XS2/XS3	65	98
	XS3-XS1	20	65

Aplicación de filtros: Se utilizaron técnicas de filtrado para el realce de bordes y reducción de ruidos. Para el realce de bordes ("edge enhancement") se aplicaron kernels tales como el "Sobel" y "Laplace" en la banda XS3; se pretendía realzar los paleocanales, con base en la variación de los valores de los pixeles a lado y lado de los rasgos superficiales indicativos de presencia de paleocanales. Los resultados de la aplicación de "Sobel" y "Laplace" no fueron satisfactorios posiblemente debido a que la operación de filtrado es areal y nó de pixel-por-pixel y, además, porque el tamaño del paleocanal, en el caso estudiado, era menor de dos pixeles impidiendo así una adecuada resolución en el filtrado. Por ejemplo, en uno de los ensayos de filtrado se aplicó a la banda XS3 el filtro Laplaciano con un kernel de tamaño 3x3 (valores para el kernel: A=-1, B=+0, C=-1, D=+0, E=+4, F=+0, G=-1, H=+0, I=-1), y con el siguiente algoritmo de convolución: $[(2^{-P}\sum K*N)+T]$ donde se escogió P=0 y T=+128. El resultado obtenido fué un realce notable del curso del río actual, en tanto que los otros posibles bordes de paleocanales fueron totalmente enmascarados por este proceso.

Igualmente se aplicaron filtros para atenuar ruidos y mejorar la calidad de las imágenes. Usualmente cuando se efectúan combinaciones aritméticas de dos ó más bandas se presenta ruido, ocasionado por el efecto diferencial de la atmósfera en las diferentes bandas, el efecto diferencial del albedo, los ruidos del sensor y los resultados mismos de la operación aritmética en sí, especialmente en la división que es una operación no-lineal. En esta investigación se encontró que el filtro tipo "Median Filter", particularmente el filtro "Median C4" del programa Morphomat del sistema Pericolor, mejora levemente la calidad de las imágenes resultantes.

COMPOSICIONES DE COLOR PARA EL AREA DE ESTUDIO

Del estudio individual de las bandas y de las combinaciones de bandas descritas anteriormente, se seleccionaron imágenes para realizar las composiciones de color. Estas composiciones pretenden realzar las características buscadas, por medio de la manipulación del color, ya que el ojo humano es más sensitivo a variaciones en los colores que en los tonos de grises. El ojo humano discrimina diferencias mínimas de tonos en el azul, luégo en el rojo, y sólo diferencias muy notables en el verde. En cambio, el ojo humano es muy sensible en el verde a variaciones de intensidad. Por último, el rojo es usualmente un color que, junto con el blanco, atrae la atención del observador.

Para tratar de realzar rasgos superficiales asociados a los paleocanales auríferos, objetivo de la presente investigación, se realizaron composiciones de color que mostraran en tonos claros los sitios de interés. Las bandas y combinaciones de bandas seleccionadas fueron XS3, IVN, XS3-XS1 y XS2/XS3, y se fijaron en los canales Azul, Verde y Rojo. Además se utilizaron, junto con XS3, las bandas XS1 y XS2 para elaborar la composición de color convencional.

Composición de color (XS1=Azul, XS2=Verde, XS3=Rojo): Es la composición de color ofrecida comercialmente por SPOT. Predominan tonalidades rojas a pardo-rojizas debido a la localización de XS3 en el canal Rojo. Se perciben variaciones sutiles en el tono, pero resulta difícil señalar diferencias netas, por ejemplo en litología o depósitos sedimentarios, sin un conocimiento previo del terreno.

Composición (IVN=Azul, XS3-XS1=Verde, XS3=Rojo): Estas tres imágenes dejan ver, individualmente consideradas, contrastes de tono entre los rasgos superficiales asociados con los paleocanales y sus inmediatos alrededores. En las tres imágenes, los pixeles de los paleocanales tienen números digitales (ND) menores que las áreas aledañas, las cuales parecen corresponder a depósitos Cuaternarios de litología diferente a las rocas Terciarias. La composición de color resultante es una imagen en la cual los materiales no-consolidados (Cuaternario?) se presentan en tonos blancuzcos, los materiales consolidados (rocas Terciarias?) en tonos pardo-rojizos, y los paleocanales (que coinciden muy estrechamente con aquellos determinados en el estudio geofísico cuyos resultados se discuten en Castro y Forero-Onofre, 1987) se destacan por su tono más oscuro con respecto a un fondo blancuzco. El aspecto de la imagen es agradable a la vista (fig. 3).

Composición (XS3=Azul, XS2=Verde, IVN=Rojo): Al fijar la banda XS3 en el canal Azul, la imagen adquirió una tonalidad azul predominante, lo que permitió distinguir con mayor facilidad diferencias mínimas en los tonos, y establecer curvas (o meandros) adicionales en el paleocanal de Coteje que no habían sido detectadas en el trabajo referido anteriormente (Castro y Forero-Onofre, 1987).

Composición (XS3=Azul, IVN=Verde, XS2/XS3=Rojo): La sustitución de la sustracción XS3-XS1 por el índice XS2/XS3 no mejoró el contraste de los rasgos observados, pero la uniformización de los pixeles correlacionados entre sí produjo una clasificación no-supervisada donde se pudieron diferenciar unidades (materiales) no-consolidadas versus unidades consolidadas. Los rasgos de los paleocanales mantuvieron su claridad y contraste, en tanto que algunos cauces actuales perdieron totalmente su continuidad y también hubo pérdida sensible en los detalles.

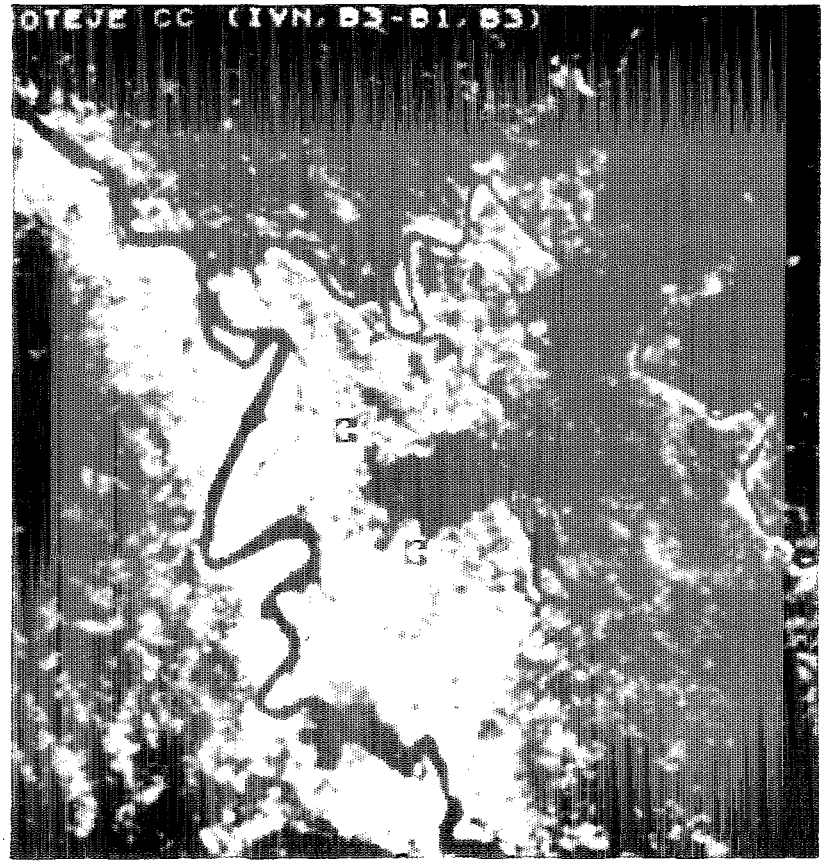
PROCESAMIENTO DIGITAL DE LAS OTRAS VENTANAS

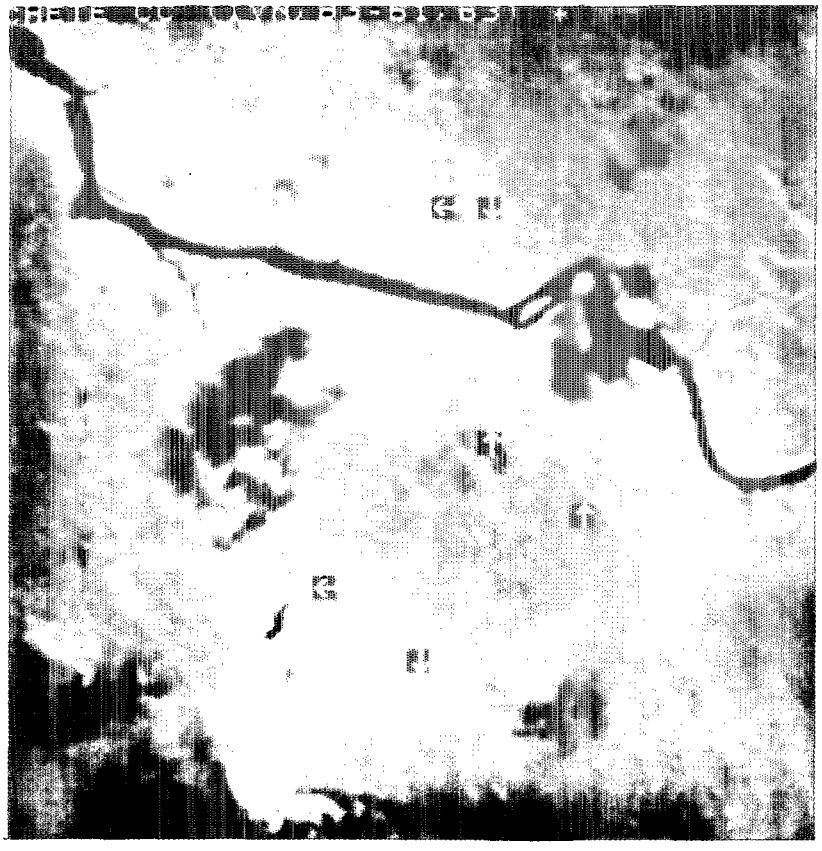
Ventana 2 (Cheté, Río Timbiquí): La aplicación de los procedimientos utilizados en la subescena Coteje permitió obtener resultados igualmente positivos para la subescena Cheté. La mejor discriminación visual de los rasgos se obtuvo con la composición de color XS3=Azul, XS3-XS1=Verde, IVN=Rojo. Además, con esta composición de color fué posible delimitar zonas con materiales consolidados (rocas Terciarias?) y no-consolidados (Cuaternario?), lo que parece ser una característica importante para la selección de blancos de exploración en el área. El contraste presentado por esta composición de color permitió detectar nuevos blancos de exploración en sectores de Cheté donde no ha habido tradición minera, por ejemplo en el área centro-oriental de la subescena, donde se reconoce un rasgo indicativo de un paleocauce (fig. 4).

La composición de color XS3=Azul, IVN=Verde, XS2/XS3=Rojo produce una imagen que prácticamente es una clasificación no-supervisada entre zonas con materiales consolidados y no-consolidados. El detalle dentro de cada una de estas zonas es mínimo, aunque la imagen obtenida puede considerarse como un buen mapa preliminar para selección de blancos regionales de exploración.

Ventana 3 (San Pablo, Río Napi): Los depósitos auríferos aluviales de esta región se encuentran muy influenciados por la presencia de un gran flujo de lodo asociado a volcanismo (McCourt et al., 1990), y cerca a los depósitos ocurre una gran meseta compuesta por este flujo de lodo al igual que una serie de remanentes disectados que corresponden a esta misma unidad. Esta situación ocasionó confusión inicial en la interpretación de las imágenes y de las composiciones de color. Sin embargo, el análisis espectral de los rasgos superficiales asociados a paleocanales permitió diferenciar zonas de explotación localizadas en paleovalles (donde actualmente no existe un cauce activo) de aquellas asociadas a cauces activos. En el primer caso, los pixeles de estas áreas presentan espectralmente valores relativamente altos en las imágenes (ND entre 40 y 50) y generalmente están rodeadas por zonas claras (ND entre 60 y 70). En el segundo caso, que corresponde esencialmente a meandros abandonados del río actual y donde existe minería importante de oro, los rasgos presentan usualmente números digitales bajos en las imágenes procesadas (ND < 30), en contraste con los valores altos detectados en los paleovalles.

Con el Indice de Vegetación Normalizado (IVN) se detectaron tramos del paleovalle de San Pablo y trazos muy cortos del posible paleocanal. Al efectuar sustracción de bandas XS3-XS1 se realzó el paleovalle y se pudo definir su continuidad hacia el norte y hacia el sur del área de explotación minera actual; igualmente se detectaron tramos adicionales del posible paleocanal y pudieron reconocerse meandros abandonados de los Ríos Guapi y Guafui, este último localizado en el extremo septentrional de la subescena.


OTEJE CC (IVN.03-01.03)



La composición de color IVN=Azul, XS3-XS1=Verde, XS3=Rojo permitió destacar claramente el paleovalle de San Pablo y su continuidad a través de toda la subescena. También se destacaron los tramos del paleocanal, aunque no tan nítidamente como en las subescenas de Coteje y Cheté (fig. 5).

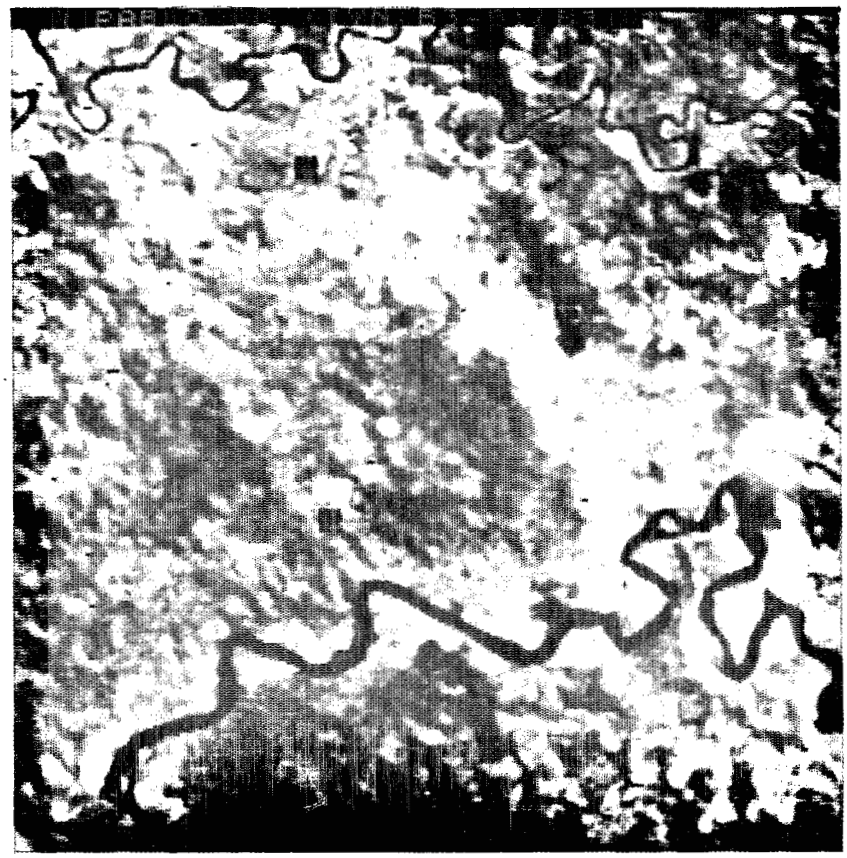


Fig. 5: SAN PABLO CC (IVN, B3-B1, B3): Ventana de la imagen SPOT-XS, que cubre el área de San Pablo, Río Napi, en un cuadrado de 5,12 km de lado sobre el terreno. La mejor resolución espacial del sistema SPOT-XS permite el refinamiento geométrico de los rasgos geomorfológicos. La menor expansión de contraste para el IVN y la banda 3 produjo la tonalidad lila (*gris oscuro en la foto*) de la vegetación.

←

Fig. 3: COTEJE CC (IVN, B3-B1, B3): Ventana de 256 x 256 pixeles de la imagen SPOT-XS de estudio, equivalente a un cuadrado de 5,12 km de lado sobre el terreno, que cubre el área de Coteje, río Timbiquí. Composición de falso color de varias combinaciones de bandas, en la cual se destacan claramente las áreas con materiales no consolidados -tonos blacuzcos- de aquellas con material consolidado -tonos pardo-rojizos- (*gris oscuro en la foto*). las áreas blacuzcas se interpretaron como depósitos cuaternarios, que son los más importantes para la prospección aurífera de la región. Las flechas indican tramos de paleocanales -en tonos más oscuros-, que fueron comprobados mediante geofísica.

Fig. 4: CHETE CC (IVN, B3-B1, B3): Ventana de la imagen SPOT-XS, que cubre el área de Cheté, Río Timbiquí, en un cuadrado de 5,12 km de lado sobre el terreno. Esta composición ilustra la sensibilidad de la expansión del contraste en las bandas: a pesar de que se utilizó la misma combinación de la composición anterior, se aplicó una expansión de contraste más intensa para la banda 3, lo que atenuó notablemente el tono rojizo de la vegetación. Esto dió realce al color azul, (*gris en la foto*) facilitando así la identificación de rasgos sutiles como tramos de paleocanales. Las áreas de interés (depósitos no consolidados) aparecen en tonos blancuzcos.

La composición de color XS3=Azul, IVN=Verde, XS2/XS3=Rojo produjo una clasificación no-supervisada confusa, donde no se pudieron detectar los rasgos característicos de los aspectos objeto de esta investigación.

PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN LANDSAT-TM

SELECCION DE VENTANAS Y DEL AREA DE ESTUDIO

Se seleccionaron dos ventanas de 7,7 km de lado en el terreno, así: Ventana 1 = Area de Coteje y Cheté, Río Timbiquí; Ventana 2 = Area de San Pablo, Río Napi. Se escogió la ventana 1 como Area de Estudio para la imagen LANDSAT-TM para incluír así la misma área de estudio seleccionada en el análisis de la imagen SPOT-XS.

PROCESAMIENTO DIGITAL DEL AREA DE ESTUDIO

Aprovechando los buenos resultados obtenidos con el procesamiento digital de la imagen SPOT-XS, para el cual se utilizó el intervalo visible e infrarrojo próximo del espectro electromagnético, se decidió que, con el objetivo de hacer uso de la amplia resolución espectral de la imagen LANDSAT-TM, se haría énfasis en el intervalo infrarrojo próximo y medio (bandas TM4, TM5 y TM7) y que se analizarían las posibilidades del intervalo termal (banda TM6). Adicionalmente se consideró que la banda TM1, localizada en el espectro azul del intervalo visible, podría ser importante para la determinación de rasgos sutiles asociados a los paleocanales. El manejo de la información de esta imagen LANDSAT-TM se concentró en tres procesamientos: expansión del contraste, combinación de bandas por sustracción, y elaboración de composiciones de color.

Expansión del contraste: Este proceso se aplicó a cada banda individual y combinación de bandas; los valores de las dinámicas empleadas para esta expansión se resumen en la Tabla 2. Para la banda TM1 se contrarrestó la dispersión atmosférica por medio de una expansión acentuada del contraste (mínimo=64, máximo=110), y en la imagen resultante se pudieron definir particularmente aspectos relacionados con la presencia de cuerpos de agua.

Las bandas TM4 y TM5 muestran con mucha nitidez la mayoría de los rasgos superficiales indicativos de la presencia de paleocanales. El mejor efecto se logró utilizando valores muy cercanos al mínimo y al máximo en sus histogramas respectivos; cuando se intentó una expansión muy acentuada del contraste, se perdió información por el efecto denominado recorte ("clipping"). Debe observarse que el procesamiento de la información contenida en estas bandas resultó muy útil en el realce de paleovalles y paleocauces.

La banda TM7 exhibió bandeamiento intenso, o ruido instrumental sistemático, denominado "stripping" y común en el sensor LANDSAT, que consiste en la presencia de franjas de interferencia horizontales, espaciadas regularmente, que reflejan el número de sensores utilizados por el instrumento (16 para el LANDSAT-TM). Por las limitaciones técnicas del sistema Pericolor utilizado en esta investigación, no fué posible aplicar métodos para remover o atenuar este ruido. Sin embargo, se decidió utilizar la banda TM7 en las combinaciones de bandas, como un posible neutralizador de los efectos espectrales debidos a la vegetación.

Tabla 2: Valores para la expansión del contraste en la imagen LANDSAT-TM

Localidad	Banda/Combinación de banda	Valor Mínimo	Valor Máximo
Cheté-Coteje	TM1	64	110
	TM2	22	96
	TM3	18	96
	TM4	25	144
	TM5	16	116
	TM6	114	136
	TM7	0	64
	TM5-TM7	20	170
	TM4-TM7	55	145
	TM4-TM5	10	60
	TM5-TM2	28	86
	TM4-TM2	10	150
San Pablo	TM1	60	110
	TM2	0	60
	TM3	4	56
	TM4	16	150
	TM5	10	110
	TM7	5	50
	TM5-TM7	10	138
	TM4-TM7	50	170
	TM5-TM2	2	80

Por otra parte, la baja resolución espacial (120 m por pixel) de la banda TM6 (intervalo termal) y el hecho de que se trataba de una imagen termal diurna afectaron negativamente la utilidad de esta banda. Luego de una acentuada expansión del contraste (mínimo=114, máximo=136) se pudieron distinguir algunas zonas con emisión diferencial. Sin embargo, y en función de la escala de trabajo, no fué posible establecer una relación entre los objetivos de observación de esta investigación y tales zonas de emisión diferencial, y por lo tanto la banda TM6 no se tuvo en cuenta para procesamientos posteriores.

Sustracción de bandas TM5-TM7: Teóricamente es de esperar que haya reflexión espectral relativamente alta para la vegetación tanto en la banda TM5 como en TM7 (quizás mayor para TM5 que para TM7), y que la sustracción TM5-TM7 disminuya notablemente el efecto de la vegetación en la imagen resultante. Por otra parte, en TM5 hay reflexión fuerte de los materiales rocosos (incluyendo arcillas) en tanto que TM7 se caracteriza por la absorción debida a hidroxilos y otros materiales rocosos. Por tanto, se postuló también que TM5-TM7 realzaría sitios con material rocoso.

La imagen resultante muestra que disminuye efectivamente el efecto de la vegetación y que se atenúan las franjas ("stripping") de la banda TM7. Los pixeles resultantes indicativos de paleovalles tienen números digitales relativamente altos (ND > 60), en contraste con los pixeles de los paleocauces (ND ≈ 40), lo que permite el realce de estos últimos. Aunque esta sustracción no satisfizo todas las expectativas teóricas, se consideró como una alternativa para las subsiguientes composiciones de color.

Sustracción de bandas TM4-TM7: Esta combinación atenuó nuevamente las franjas ("stripping") de la banda TM7. Además, la banda TM7 reguló el efecto de la vegetación, permitiendo el realce de paleovalles y paleocauces. Los paleocauces son más fácilmente reconocibles en TM4-TM7 que en la sustracción TM5-TM7, ya que son más destacables en la banda TM4 que en la banda TM5. La información contenida en esta combinación resultó ser de más utilidad para una posible composición de color que la de la sustracción TM5-TM7.

Sustracción de bandas TM4-TM5: Teóricamente la vegetación presenta una reflexión semejante en estas dos bandas, aunque la respuesta es un poco mayor en TM4, y la sustracción TM4-TM5 permite atenuar el efecto de la vegetación acentuando el efecto de rocas y suelos. La imagen resultante mostró con nitidez ligeramente mayor los rasgos observados en la Banda TM4 contrastada. Por esta razón se seleccionó esta combinación para una posible composición de color.

Sustracción de bandas TM5-TM2: Con esta combinación se intentaba nuevamente atenuar el efecto de la vegetación (la banda TM2 presenta la máxima reflexión de la vegetación en el intervalo visible) y destacar características del intervalo visible importantes para la detección de los paleovalles y paleocauces (áreas de oxidación?). La imagen resultante realzó los paleocauces y mostró los paleovalles en tonos claros. Aparentemente esta combinación logró extraer la información útil (para los objetivos de esta investigación) de ambas bandas.

Sustracción de bandas TM4-TM2: Como resultado de esta combinación se logró un buen realce del paleocanal de Coteje y de los valles aluviales de Coteje y Cheté. Sin embargo, el efecto de la vegetación no se atenuó tanto como con la combinación TM5-TM2 y por esta razón se prefirió esta última combinación para las composiciones de color.

Además de las anteriores, se realizaron otras combinaciones de bandas, probando índices, adiciones y sustracciones en diferentes ordenamientos. En las relaciones donde se involucró la banda TM7, las franjas ("stripping") se realzaron notablemente, por lo que se consideró poco útil este tipo de procesamiento. Por otra parte, el grado de reflectancia de la banda TM4 fué muy alto comparado con el de las bandas TM5 y TM7, de tal manera que combinaciones como TM7-TM4 y TM5-TM4 no mostraron resultados aplicables al objetivo propuesto.

COMPOSICIONES DE COLOR DEL AREA DE ESTUDIO

Composición (TM1=Azul, TM2=Verde, TM3=Rojo): Es equivalente a una fotografía convencional a color. Esta composición de color se elaboró únicamente con el objetivo de verificar la poca visualización de aspectos en el intervalo visible del espectro electromagnético. Para esta zona específica, la tonalidad verde y el poco realce de los rasgos indicativos de los posibles depósitos auríferos impiden que esta imagen sea una buena alternativa en comparación con fotografías aéreas pancromáticas.

Composición (TM2=Azul, TM3=Verde, TM4=Rojo): Es la composición de falso color convencional. La presencia de la banda TM4 en el canal rojo dá a esta composición el tono rojizo a pardo-rojizo característico. La información sobre paleocanales es difícilmente diferenciable, posiblemente porque se presenta de color rojo sobre un fondo también rojo, ligeramente más claro. La definición de las nubes es buena, lo que permite delimitar claramente su efecto sobre la imagen. Esta composición resultó excelente para trazar el curso del Río Timbiquí.

Composición (TM1=Azul, TM5=Verde, TM4=Rojo): La presencia de dos bandas del intervalo infrarrojo permitió que en algunos sitios con nubosidades tenues se pudieran distinguir rasgos superficiales, como en el caso del Río Coteje, en el extremo centro-oriental de la imagen. Sin embargo, el color blanco de las nubes densas se confundió con las zonas no-consolidadas indicativas de paleovalles, lo que restó precisión en la definición de la imagen. No obstante, en la zona minera de Coteje fué posible delimitar varios tramos del paleocanal productivo.

Composición (TM1=Azul, TM5=Verde, TM4-TM5=Rojo): Al reemplazar la banda TM4 por la sustracción TM4-TM5 se obtuvo un mejoramiento en los detalles con respecto a la composición de color anterior. El color de las nubes varió a un tono azul, distinguiéndose así de las áreas indicativas de paleovalles, los que se presentaron en tonos blancos. Esta composición también realzó varios tramos del paleocauce de Cheté. En síntesis, esta imagen mostró información que no se había percibido en las anteriores composiciones de color.

Composición (TM1=Azul, TM5-TM2=Verde, TM4-TM7=Rojo): Las áreas indicativas de paleovalles se delimitan muy nítidamente en esta composición. El contraste entre paleovalles y nubes mejora notablemente, lo que permite una distinción precisa entre estos dos aspectos. Dentro de los paleovalles se pueden reconocer varios tramos de paleocauces, tanto en Coteje como en Cheté. La sombra producida por las nubes se disipó muchísimo con estas combinaciones. Esta imagen realza los rasgos superficiales más significativos para labores de prospección de aluviones auríferos de las subescenas investigadas.

PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA VENTANA SAN PABLO

Al igual que en la imagen SPOT-XS, en esta subescena no se aprecian los aspectos investigados en gran detalle, por la proximidad del flujo de lodo antes mencionado. No obstante, diferentes tratamientos permitieron obtener imágenes satisfactorias en cuanto a definición de paleovalles y paleocauces. Además, la escasez de nubes ayudó a su resolución.

Con la composición de falso color convencional (TM2=Azul, TM3=Verde, TM4=Rojo) fué posible trazar el curso del Río Napi y delimitar los frentes del flujo de lodo. Las mesetas formadas por este flujo presentan superficies con texturas uniformes, de color rojizo. Las zonas de valles y paleovalles se muestran con una tonalidad roja más pálida; con un trabajo cuidadoso es posible delimitarlas, si bien las otras composiciones de color permiten hacerlo más fácilmente.

Con la composición de color TM1=Azul, TM5=Verde, TM4=Rojo se obtuvo una imagen de tono verde con la cual fué posible definir netamente los rasgos superficiales más importantes de esta subescena: mesetas constituídas por flujo de lodo, valles y paleovalles, tramos de paleocauces, cauces actuales (Ríos Napi y Guafui), y lineamientos.

Esta información fué refinada y complementada con la información realzada en la composicón de color TM1=Azul, TM5-TM2=Verde, TM4-TM7=Rojo la cual, debido a sus tonalidades azules, permitió separar rasgos finos. Finalmente, al intercambiar los canales verde y rojo de esta composición de color se obtuvo una nueva composición de color donde la superficie exhibió una tonalidad violeta, en contraste con un azul intenso del agua, un azul pálido para las nubes, y un blanco para los valles y paleovalles.
La integración de las anteriores composiciones de color permitió producir un bosquejo geológico del área, muy apropiado para iniciar una campaña de exploración.

RESULTADOS PARA EXPLORACION GEOLOGICA

En el planteamiento del problema se definieron los rasgos superficiales susceptibles de ser reconocidos en las imágenes de satélite. El procesamiento digital se orientó a realzar estos rasgos, objetivo que se cumplió ampliamente, particularmente en las composiciones de color obtenidas. Con los resultados de esta investigación, anteriormente discutidos, se prepararon los dos esquemas geológicos de las zonas de estudio, esto es, Coteje-Cheté (Río Timbiquí) y San Pablo (Río Napi) (fig. 6 y 7). La información espectral de las imágenes permite reconocer tres unidades, desde el punto de vista geológico:

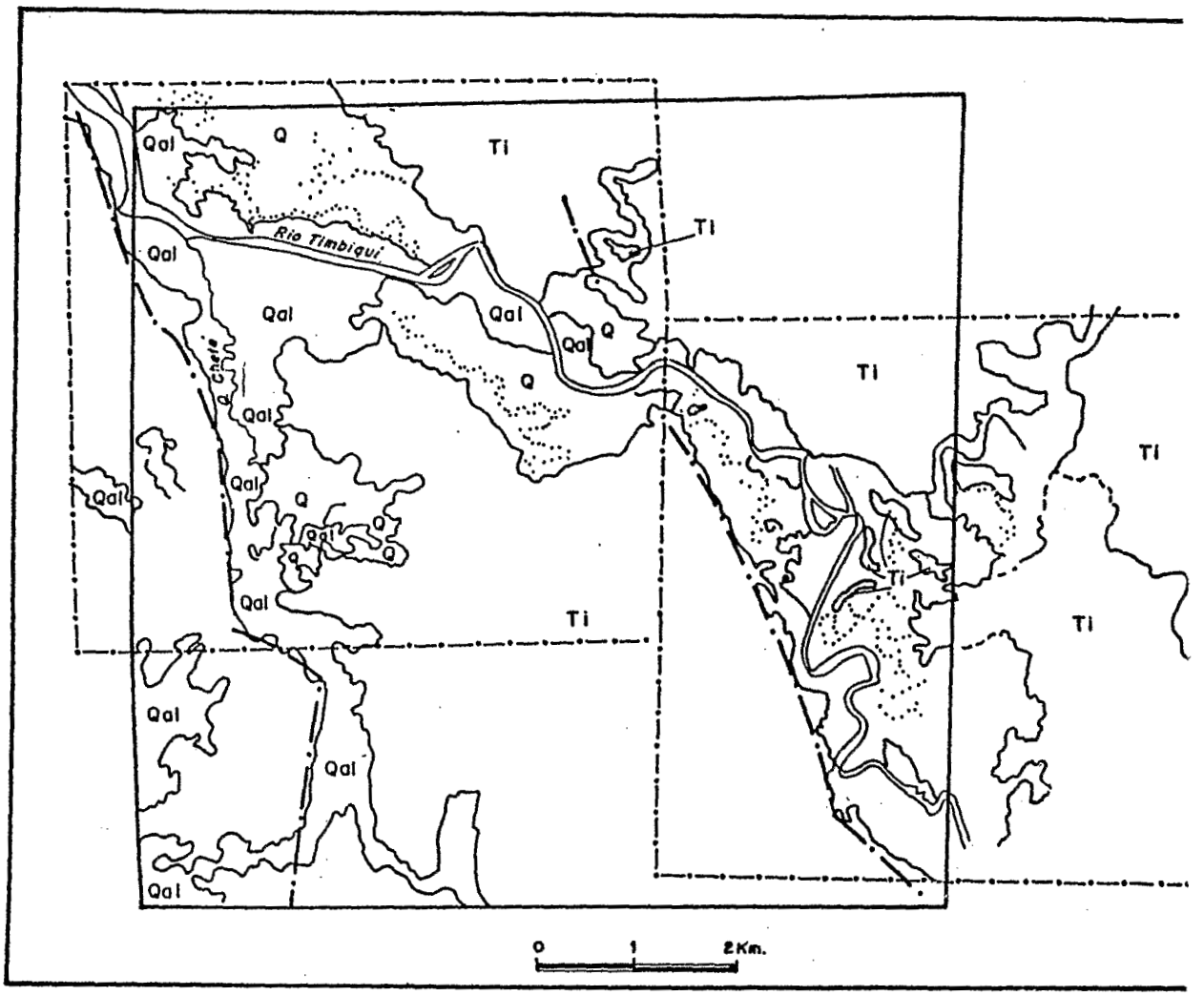
a) **Q, Qal**: Depósitos Cuaternarios, sin consolidar, que indican los valles actuales y los paleovalles. En la imagen de Coteje y Cheté fué posible diferenciar los valles de los paleovalles, mientras que en San Pablo no se pudo hacer esta diferenciación;

b) **Ti**: Depósitos Terciarios no-diferenciados, consolidados. En estas áreas de estudio se trata de rocas sedimentarias detríticas constituídas principalmente por lodolitas con intercalaciones de arenitas y conglomerados. En las imágenes sólo es posible separarlos de los depósitos no-consolidados;

c) **Fl**: Flujos de lodo, constituídos por una matriz arcillosa-lodosa, con fragmentos de roca de redondez variable y con tamaños entre 5 cm y más de 1 m. En los mapas de las figuras 3 y 4, se denominó **Fl** a la superficie de las mesetas que tenía esta composición, situación que sólo se presenta en el área de San Pablo. Es muy probable que muchos de los cuerpos denominados como **Q**, tanto en el mapa de Coteje-Cheté como en el de San Pablo, sean en realidad remanentes del flujo de lodo, o flujo de lodo retrabajado, tal como se describe en los estudios geológicos previos (Castro y Forero-Onofre, 1987; Annells et al., 1988; McCourt et al., 1990).

Por otra parte, con base en la textura de las imágenes se pudieron reconocer los siguientes aspectos estructurales:

Lineamientos: Se presentan como alineaciones de los ríos actuales, de los valles o de los paleovalles. La vista sinóptica que ofrecen las imágenes permitió relacionar varios de estos lineamientos, que en principio aparecían fragmentados. Junto con los lineamientos se observan



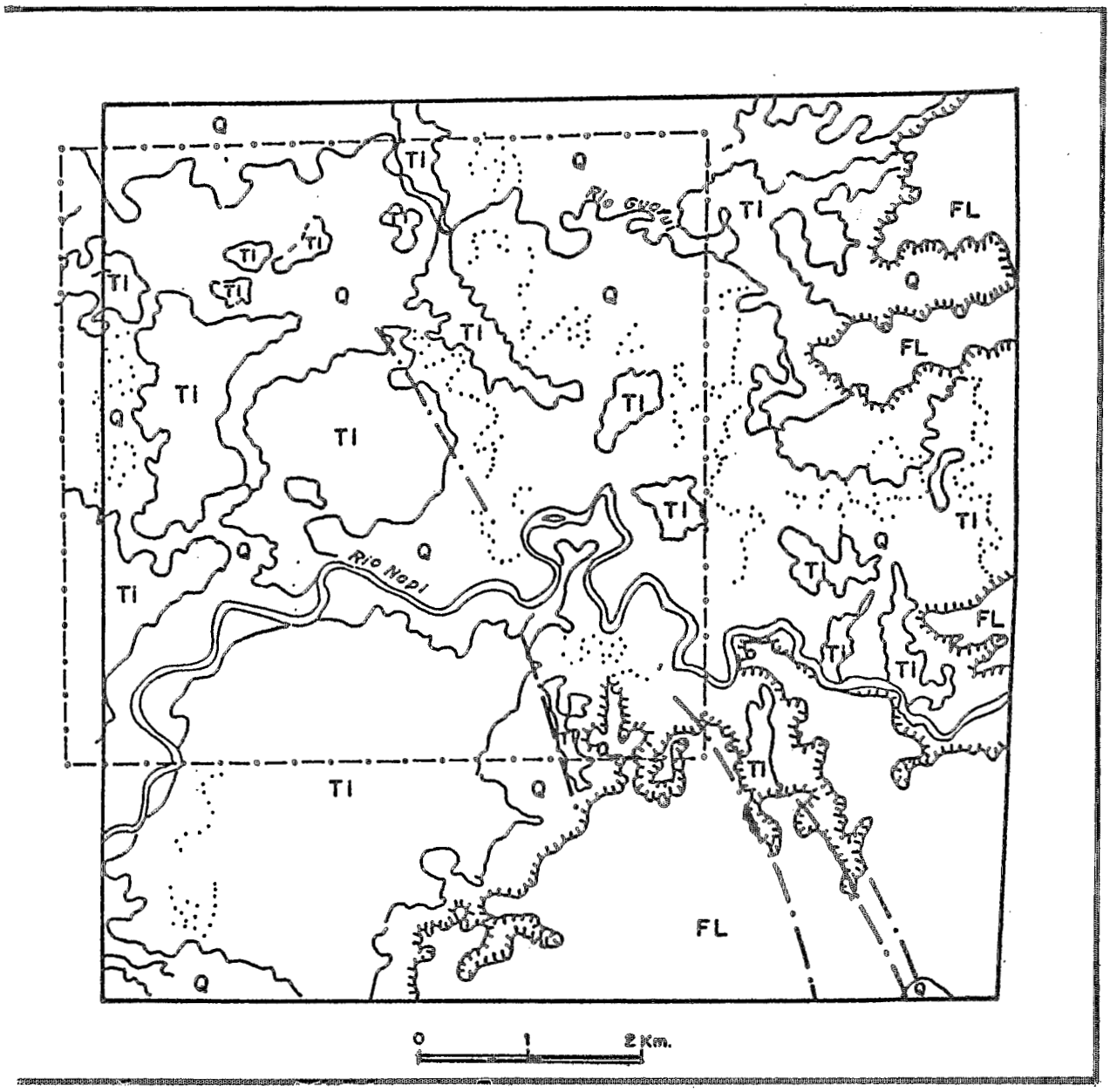
CONVENCIONES :

- Subescena de imagen SPOT-XS, 256 x 256 pixels
- Subescena de imagen LANDSAT-TM, 256 x 256 pixels
- Paleocauce
- Contacto geológico
- Contacto geológico inferido cubierto por nubes
- Lineamiento

LEYENDA :

Qal/Q	Depósitos cuaternarios no-consolidados. Qal - recientes. Q - paleovalles
Ti	Rocas sedimentarias terciarias, consolidadas

Fig. 6: Esquema geologico a partir de las imagenes de satelite SPOT-XS y LANDSAT-TM para el área de Chete y Coteje, Rio Timbiquí.



CONVENCIONES :

- Subescéna de imagen SPOT-XS, 256 x 256 pixels
- Subescena de imagen LANDSAT-TM, 256 x 256 pixels
- Paleocauce
- Contacto geológico
- Contacto geológico inferido cubierto por nubes
- Lineamiento
- Borde de meseta

LEYENDA:

- Q — Depositos cuaternarios no-consolidados.
- TI — Rocas sedimentarias terciarias, consolidadas
- FL — Flujo de lodo de probable origen volcanico

Fig. 7 Esquema geologico a partir de las imagenes de satelite SPOT-XS y LANDSAT-TM para el área de San Pablo, Rio Napi.

algunas características acompañantes: los depósitos Q se amplían; los ríos presentan deflexiones antes de alcanzar los lineamientos; la imagen SPOT deja ver algunas lagunas paralelas al lineamiento del valle de San Pablo.

Bordes de las mesetas disectadas: Este aspecto se observó netamente en la subescena LANDSAT-TM de San Pablo, corresponde a un borde muy bien definido, y no fueron necesarios procesamientos adicionales (p.e. realce de bordes mediante filtrado) para su diferenciación. Estos bordes de mesetas disectadas se pudieron trazar con bastante precisión a partir de las composiciones de color resultantes.

Finalmente, utilizando la textura y las características espectrales de las imágenes fué posible trazar varios tramos de paleocanales en las tres localidades investigadas. Algunos tramos de los paleocanales reconocidos en Coteje corresponden muy cercanamente con los paleocanales encontrados durante la prospección geofísica adelantada previamente y en la que se emplearon métodos de microsísmica de refracción y geoeléctricos (Castro y Forero-Onofre, 1987). Esto conduce a pensar que los otros aspectos identificados como tramos de posibles paleocanales, tanto en Coteje como en Cheté y San Pablo, son sitios favorables para adelantar exploración detallada.

CONCLUSIONES

El procesamiento de las imágenes SPOT-XS y LANDSAT-TM correspondientes a una zona de la Llanura Costera Pacífica, al suroccidente de Colombia, donde ocurren depósitos de oro aluvial, y la confrontación de los resultados obtenidos con aquellos de estudios geológicos previos permiten establecer:

1. Las imágenes satelitarias adecuadamente procesadas son de gran utilidad en las fases iniciales de una campaña de exploración mineral, aún en zonas que presentan dificultades desde el punto de vista de obtención de información por medio de sensores remotos y que estén caracterizadas, por ejemplo, por presentar una densa vegetación y condiciones meteorológicas adversas;

2. Se comprueba la eficacia de la utilización de imágenes de satélite como una de las herramientas de prospección de aluviones auríferos, tal como queda demostrado por la detección de rasgos geomorfológicos relacionados a aluviones auríferos potenciales (incluyendo rasgos tan finos como tramos de paleocanales que pudieron verificarse en el campo);

3. Las composiciones de color, conformadas por bandas o combinaciones de bandas a las cuales se ha realzado la información útil, son los mejores productos del procesamiento de información de sensores remotos, para la exploración de recursos minerales tales como placeres auríferos;

4. El análisis de la información contenida en cada banda permite definir con muy buena aproximación cuáles bandas y cuáles combinaciones de bandas son las más adecuadas para lograr las mejores composiciones de color, de acuerdo con los objetivos de la investigación específica de que se trate;

5. En el caso de la imagen SPOT-XS, el Indice de Vegetación Normalizado demostró ser un procedimiento muy adecuado para realzar los paleocanales de Coteje y Cheté, lo que sugiere que, en el intervalo VNIR (visible-infrarrojo próximo) del espectro electromagnético, los paleocanales están relacionados a cambios sutiles en la vegetación;

6. La amplia resolución espectral de la imagen LANDSAT-TM permitió ensayar combinaciones de bandas del intervalo infrarrojo próximo y medio del espectro electromagnético. Los resultados obtenidos por medio de la extracción de la información de cada una de estas bandas mediante combinaciones adecuadas muestra la importancia de los rasgos espectrales presentes en una imagen de satélite, para un trabajo de exploración geológica.

AGRADECIMIENTOS: Los autores expresan sus agradecimientos a los Directores de las diferentes entidades a las cuales pertenecen, por el soporte logístico y económico para la realización de esta investigación y por la autorización para la presentación de este trabajo en el Simposio Internacional sobre Yacimientos Aluviales de Oro (La Paz, Bolivia, Junio 3-5, 1991). Igualmente al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Bogotá) cuyas instalaciones fueron utilizadas en la fase de procesamiento de las imágenes, y en particular a Jean Sioneau y Jack Khobzi por su ayuda en la etapa de entrenamiento en el procesamiento digital de imágenes y por los valiosos comentarios y sugerencias que permitieron refinar los resultados finales. El Bureau Régional de Coopération Scientifique et Technique, de la República de Francia, soportó económicamente una buena parte de la fase final de esta investigación.

REFERENCIAS

ANNELLS, R.N., FORERO-ONOFRE, H. & RODRIGUEZ, C.A., 1988, Geology and gold potential of the Timbiquí and Napi River basins, Cauca Department, Colombia: British Geological Survey (Nottingham), Technical Report WC/88/45, Valley and Cauca Pacific Coast, Precious Metal Project-MPP, Preliminary Report No.1, 99 p.

CASTRO, H. & FORERO-ONOFRE, H., 1987, Prospección aurífera en las comunidades de Cheté y Coteje, Río Timbiquí, Departamento del Cauca: INGEOMINAS (Cali), Informe PROGOG, 58 p.

ETAYO, F., et al., 1986, Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia: Publicaciones Geológicas Especiales del INGEOMINAS, Bogotá, No.14-I, p. 1-253.

MCCOURT, W., MUÑOZ, C.A. & VILLEGAS, H., 1990, Regional geology and gold potential of the Guapi-Napi drainage basin and upper Timbiquí River, Cauca Department, SW Colombia: British Geological Survey (Nottingham), Technical Report WC/90/34, Valley and Cauca Pacific Coast, Precious Metal Project-MPP, Phase II.

PÉREZ, G., 1980, Evolución geológica de la cuenca Pacífica (Geosinclinal de Bolívar), sector noroccidental de Suramérica: Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander, v. 14, No. 28, p. 24-44.