

Centro de Investigacion Cientifica y de Educacion Superior de Ensenada

IMPLICACIONES TECTONICAS DE LA DEFORMACION EN EL
PLIOCUATERNARIO DE LAS TERRAZAS MARINAS AL NORTE DE
PUERTECITOS, NE DE BAJA CALIFORNIA.

TESIS
MAESTRIA EN CIENCIAS

MARIO REBOLLEDO VIEYRA

Ensenada, Baja California, Mexico. Diciembre, 1994.



CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE EDUCACION SUPERIOR DE
ENSENADA.

DIVISION DE CIENCIAS DE LA TIERRA.

DEPARTAMENTO DE SISMOLOGIA.

IMPLICACIONES TECTONICAS DE LA DEFORMACION EN EL PLIO-
CUATERNARIO DE LAS TERRAZAS MARINAS AL NORTE DE PUERTECITOS, NE
DE BAJA CALIFORNIA.

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA presenta:

MARIO REBOLLEDO VIEYRA.

Ensenada, Baja California, México. Diciembre de 1994.

RESUMEN de la Tesis de Mario Rebolledo Vleyra presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA con opción en SISMOLOGIA. Ensenada, Baja California, México. Diciembre de 1994.

IMPLICACIONES TECTONICAS DE LA DEFORMACION PLIO-CUATERNARIA DE LAS TERRAZAS MARIÑAS AL NORTE DE PUERTECITOS,

En el flanco Este de la Sierra San Fermín en la margen NE de la Península de Baja California, aflora una secuencia marina del Plioceno que comprende dos miembros: el miembro inferior que consiste en una alternancia de lodolitas amarillas y areniscas, con conglomerados marinos en la base, y subyace en discordancia al miembro superior. El miembro superior consiste en una alternancia de lodolitas y areniscas rojizas de grano fino, con conglomerados aluviales interestratificados. Dos tobos vítricas retrabajadas (Pap y Pte) están interestratificadas en el miembro superior y debido a su amplia distribución en el área de estudio, fueron utilizadas como horizontes de referencia para las correlaciones estratigráficas. La secuencia marina aflora en cinco terrazas marinas, de sur a norte: Playa Cristina, El Coloradito Sur, El Coloradito, El Coloradito Norte y Santa Catarina, éstas se ubican aproximadamente 50 km al sur de San Felipe, B.C.. Como resultado de este estudio, se estableció: 1) La secuencia está afectada en dos periodos de deformación; el primero produjo fallamiento normal en dos direcciones predominantes, NNO y NNE, posiblemente sinsedimentario ya que no afecta al aluvión Plio-Cuaternario. El segundo evento produjo, una serie de fallas de desplazamiento lateral izquierdo orientadas NNE, delimitando bloques discretos en las terrazas El Coloradito y Playa Cristina, en donde la secuencia marina está deformada por pliegues suaves cuyos ejes se orientan ENE. Se deduce que este evento es posterior al fallamiento normal, ya que estas estructuras si afectan al aluvión Plio-Cuaternario en El Coloradito. 2) El miembro superior se depositó en el período comprendido entre el evento Kaena y el evento Reunión, que abarca aproximadamente 910,000 años. La correlación magnetoestratigráfica se hizo correlacionando al horizonte Pap con una unidad (Ptf) cuya edad $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (en hornblenda) es 2.5 ± 0.05 Ma (Stock, 1992; comunicación escrita). Pap tiene polaridad normal y lo ubica cerca del límite Gauss-Matuyama en la escala geomagnética del tiempo de Mankinen y Dalrymple (1979). Con los datos paleomagnéticos se calculó una rotación promedio de $\sim 10^\circ \pm 7^\circ$ en sentido de las manecillas del reloj en la zona de estudio. Para explicar esta deformación y la rotación de bloques, se propone un modelo de deformación basado en el modelo de rotación uniforme de Ron et al. (1984). La deformación de la secuencia marina y de los depósitos aluviales es consistente con un sistema antitético al sistema regional de fallamiento lateral derecho que caracteriza al sistema transforme del Golfo de California. Lo cual sugiere que el movimiento transcurrente generado en el Golfo de California se transmite al continente a través de zonas deformadas por rotaciones de bloques y no sólo en forma de estructuras discretas.

Abstract.

A sequence of Pliocene marine sediments crops out along the eastern flank of Sierra San Fermín in the NE margin of the Baja California peninsula. The sequence is divided in two members: the lower member is formed by yellowish mudstone and sandstone, with marine conglomerate at the base of the sequence. The upper member is formed by reddish mudstone and sandstone with interstratified alluvial conglomerate. Two reworked vitric tuffs (Pap and Pte) are interstratified in the upper member and based upon their spatial distribution within the area they were used as stratigraphic markers. Five marine terraces developed on the marine sequence located 30 miles south of San Felipe, B.C.. They are from south to north: Playa Cristina, El Coloradito Sur, El Coloradito, El Coloradito Norte y Santa Catarina. As a result of this study, I establish: 1) The sequence is affected by two different deformation events, the first event produced NNW and NNE striking normal faulting and was probably synsedimentary because it does not affect the Plio-Quaternary alluvium. The second event produced a series of ENE striking left lateral strike-slip faults in El Coloradito and Playa Cristina area, bounding an internally deformed block. This deformation developed gentle folds trending ENE. I assume that this event is the most recent because these structures affect the Plio-Quaternary alluvium.

The magnetostratigraphy of the upper member was done using Pap as the reference since it is equivalent to a unit (Ptf) with an $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (hornblende) age of 2.5 ± 0.05 Ma, (Stock, 1992; written communication). Pap has normal polarity and lies near the Gauss-Matuyama boundary in the geomagnetic time scale of Mankinen and Dalrymple (1979). The upper member lies between the Reunion event (2.01 Ma) and the Kaena event (2.92 Ma). Paleomagnetic data of these rocks suggest clockwise rotations of $\sim 10^\circ \pm 7^\circ$ in the Playa Cristina and El Coloradito blocks. I propose a deformation model based on the uniform sense block rotation of Ron et al (1984), which predicts rotation of blocks as a consequence of lateral strike-slip faulting. From this study I concluded that the deformation due to the transform boundary between the Northamerica Plate and the Pacific Plate is transmitted to the peninsula along an antithetic fault system to the regional right lateral strike-slip faulting of the Gulf of California transform system. This evidence suggests that the deformation associated with the opening of the Gulf of California affects the continental crust, not only as discrete structures, but as block rotations as well.

DEDICATORIA.

A mi padre, Biol. Mario Rebolledo González. Por su inmenso amor y confianza en mí, por mostrarme la ciencia.

A mi madre, Gloria Vieyra de Rebolledo. No tengo palabras para agradecerle su amor y cariño. Gracias por enseñarme a quererme a mí mismo.

A mis hermanas, Lina y Mónica. Gracias por su cariño, aunque siempre he sido parco, mi cariño por ustedes no es tal.

A mis abuelos, Soledad, Rafael y Aurelita (q.e.p.d.).

A mis hermanos, Dr. Salvador Bueno V., Dra. María Eugenia Zarazúa de Bueno, Ing. Federico Cervantes D. y Lic. Ana Olivia Galindo de Cervantes. Porque nos une el lazo más fuerte que existe en el Universo.

A la familia Cervantes Guzmán, mi familia adoptiva. Gracias por abrirme las puertas de su hogar.

Finalmente, a mis críticos y detractores. **“...los perros ladran Sancho, señal de que cabalgamos...”** (“El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha”; Miguel de Cervantes Saavedra).

Agradecimientos.

A mi maestro y director de tesis, M. en C. Francisco Suárez V. que siempre estuvo dispuesto a escuchar “mis penas” y siempre tuvo una palabra de aliento. En todo momento del proyecto me apoyó incondicionalmente, además de ser el único que siempre creyó en mí. Gracias Profe.

A mi director de tesis, Dr. Arturo Martín B., por invitarme a participar en su proyecto: “Estratigrafía volcánica, sedimentología y tectónica del Neógeno, de la Provincia Volcánica de Puertecitos, NE, de Baja California”, del cual mi tesis forma parte.

Al M. en C. Vicente Ferreira B. y al M. en C. Luis A. Delgado A. por aceptar formar parte del comité de tesis, por sus críticas y comentarios a la misma.

A la Dra. Joann M. Stock por sus comentarios a la tesis, por facilitarnos el acceso a las instalaciones de Caltech y por su apoyo en el campo para llevar a cabo el estudio paleomagnético.

A la Dra. Claudia J. Lewis, por su apoyo en la campaña de campo, sus comentarios a lo largo del proyecto y su hospitalidad durante mis visitas a Pasadena.

Al Dr. Joe Kirschvink del California Institute of Technology, porque amablemente me permitió utilizar su laboratorio de paleomagnetismo y por sus comentarios en el análisis de los datos.

Un agradecimiento muy especial a John y Liz Holt, cuya hospitalidad, ayuda en el uso del equipo del laboratorio y análisis de los datos, fue clave para llevar a feliz término el proyecto (Thank you, dudesters!!).

Al Departamento de Geología de la Div. de Ciencias de la Tierra, por las facilidades otorgadas para realizar esta tesis. En especial a los Tecs., Víctor Frías C. por su paciencia en la elaboración y edición de los mapas geológicos y al Ocean. Gabriel Rendón M. porque no solo elaboró las láminas delgadas utilizadas en el estudio, sino que me acompañó al campo en varias ocasiones.

A todas las personas que me acompañaron en las campañas de campo: Ronald Spelz, Guillermo Díaz, Claudia Ruiz, Scarlett Batalla, Alfonso Cuevas, Ericka Castañón, Mariano Cerca, Gabriel Rendón, Claudia J. Lewis; pues con su compañía y plática, el trabajo era menos pesado, los días menos largos y sabían mejor las cervezas.

A todos mis cuates de parranda (o sea todos) de antes y ahora: Uehara, Ricky, Quero, Mario González, Juan Carlos Montalvo, Ulises y en especial: al Dr. Treyes (Tonatiuh), Juan

Ramírez y Elizabeth Esquivel, quienes fueron en realidad mis asesores cuando recién ingresé a la maestría.

A mis cuates de toda la vida y del alma: Teto (García), Mike (Cervantes), Pablo (Piña), Ramón (Mendoza) y por supuesto mi gran cuate el Baúl.

Un agradecimiento a todo el personal del C.I.C.E.S.E., en especial a Maru García y Bárbara Uribe que siempre me echaron la mano con los trámites burocráticos y me daban "raite" a la hora de la comida!!!.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca crédito y la extensión de la beca crédito otorgados bajo el contrato número 80409.

Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, por la beca otorgada para finalizar la tesis.

CONTENIDO

	Página
I INTRODUCCION.	1
I.1 Objetivos	4
I.1.1 Objetivo general.	4
I.1.2 Objetivos específicos	4
II MARCO GEOLOGICO.	5
III MATERIALES Y METODOS.	7
III.1 Cartografía geológica.	7
III.2 Petrografía.	8
III.3 Análisis estructural.	8
III.4 Paleomagnetismo.	9
IV RESULTADOS.	12
IV.1. Unidades litoestratigráficas.	12
IV.1.1 Descripción de litofacies	18
IV.2 Características estratigráficas y sedimentológicas de las terrazas marinas.	22
IV.2.1 Características estratigráficas y sedimentológicas de la terraza Santa Catarina.	22
IV.2.2 Características estratigráficas y sedimentológicas de las terrazas en la zona de El Coloradito.	25
IV.2.2.1 El Coloradito Norte.	27

Contenido (Continuación).

	Página
IV.2.2.2 El Coloradito.	29
IV.2.2.3 El Coloradito Sur.	30
IV.2.3 Características estratigráficas y sedimentológicas en la terraza Playa Cristina.	31
IV.2.4 Correlación estratigráfica.	37
IV.3 Geología estructural.	39
IV.3.1 Características estructurales de Terraza Santa Catarina	41
IV.3.2 Características estructurales de Terrazas en la zona de El Coloradito.	46
IV.3.3 Características estructurales de Terraza Playa Cristina.	49
IV.4 Paleomagnetismo.	53
IV.4.1 El Coloradito.	54
IV.4.2 Playa Cristina.	66
IV.4.3 Magnetoestratigrafía.	77
IV.4.4 Cálculo de los errores.	78
V DISCUSION.	82
V.1 Estratigrafía y paleoambientes.	82
V.1.1 Interpretación paleoambiental de la secuencia marina.	82
V.1.2 Condiciones paleoambientales de Pms.	84
V.2 Geología estructural.	87
V.2.1 Terraza Santa Catarina.	88

CONTENIDO (continuación).

	Página
V.2.2 Terrazas de la zona de El Coloradito.	89
V.2.3 Terraza Playa Cristina.	89
V.3 Paleomagnetismo.	90
V.3.1 Magnetoestratigrafía de Playa Cristina.	91
V.3.2 Cálculo del paleopolo.	92
V.4 Modelo estructural.	94
VI CONCLUSION.	100
LITERATURA CITADA.	102

APENDICES

		Página
APENDICE 1	Análisis de normalidad, cálculo de polos, errores y rotaciones.	105
APENDICE 2	Programa para calcular la posición de un sitio promediando la variación secular del campo magnético.	111
APENDICE 3	Dirección característica del componente magnético primario En las muestras analizadas, ajustados por mínimos cuadrados. Las muestras corresponden a toda la zona de estudio	113
APENDICE 4	Datos de dirección característica, y coordenadas del polo virtual en Playa Cristina sección compuesta, con los datos de ajuste por mínimos cuadrados, para cada muestra.	116
APENDICE 5	Datos de dirección característica, y coordenadas del polo virtual en El Coloradito sección compuesta, con los datos de ajuste por mínimos cuadrados para cada muestra.	118

LISTA DE TABLAS.

Tabla		Página
I	Unidades estratigráficas y litofacies asociadas.	17
II	Posición del paleopolo para la localidad El Coloradito	62
III	Rotación de bloques estimados con mediciones paleomagnéticas en la terraza El Coloradito.	65
IV	Posición del paleopolo en la localidad Playa Cristina.	75
V	Rotación de bloques estimadas con mediciones paleomagnéticas en la terraza Playa Cristina.	76
VI	Distribución mineralógica de Pap y Ptf.	77

LISTA DE FIGURAS.

Figura		Página
1	Marco tectónico del noreste de la Península de Baja California y con la ubicación de los depósitos marinos del Neógeno alrededor del Golfo de California. La provincia volcánica de Puertecitos se indica con una P. La zona de estudio (figura 3) se indica con un cuadro abierto. Tomado de Stock y Hodges (1989). ST, Depresión de Salton; SF, San Felipe; IT, Isla Tiburón; SR, Santa Rosalía; L, Loreto; ITM, Islas Tres Marías; PM, Punta Mita.	3
2	Mapa geológico generalizado de la zona de estudio y zonas adyacentes. FSPM: Falla San Pedro Mártir, FSF: Falla San Felipe. (Modificado de Gastil <i>et al</i> , 1975).	6
3	Mapa geológico simplificado de las terrazas marinas en el flanco Este de la Sierra San Fermín.	13
4	Mapa geológico de detalle de la terraza Santa Catarina.	23
5	Columna estratigráfica compuesta de la secuencia marina que aflora en la terraza Santa Catarina.	24
6	Mapa geológico de detalle de las terrazas en la zona de El Coloradito. El Coloradito Norte (E.C.N.); El Coloradito (E.C); El Coloradito Sur (E.C.S.).	26
7	Columna estratigráfica compuesta de las terrazas en la zona de El Coloradito. En la margen izquierda de la columna se indica la posición estratigráfica de las muestras de paleomagnetismo, en la figura 29 se muestra la polaridad, declinación, inclinación y máxima desviación angular de estas muestras. La ubicación de las columnas se muestra en la figura 6.	28
8	Diagrama de rosa con las orientaciones de las crestas de rizaduras en El Coloradito Sur.	32
9	Mapa geológico de detalle de la terraza Playa Cristina.	33
10	Columna estratigráfica compuesta de Playa Cristina. En la margen izquierda de la columna se indica la posición estratigráfica de las muestras de paleomagnetismo, en la figura 36 se muestra la polaridad, declinación, inclinación y máxima desviación angular de estas muestras. La ubicación de las columnas se muestra en la figura 9.	35
11	Diagrama de rosa con las orientaciones de las crestas de las rizaduras en Playa Cristina.	36
12	Correlación estratigráfica entre las columnas compuestas de las terrazas: El Coloradito y Playa Cristina.	38

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
13	Estimación de la orientación de los vectores de máxima compresión y extensión. a) Planos de la familia de fallas normales conjugadas con rumbo NW. b) Planos de la familia de fallas normales conjugadas con rumbo NE. c) Planos de la familia de fallas normales conjugadas de echados altos con rumbo NW. d) Planos de la familia de fallas normales conjugadas de echados altos con rumbo NE. En los diagramas se indica la dirección estimada de los vectores de compresión, considerando que: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.	40
14	Datos estructurales de las fallas normales en la zona de estudio con indicadores cinemáticos a) Diagrama de rosa mostrando las orientaciones preferenciales de las fallas. b) Red estereográfica con los planos de fallas normales. Las flechas indican la dirección y ángulo de inclinación de las estrías.	42
15	Datos estructurales de las fallas con desplazamiento lateral con indicadores cinemáticos en la zona de estudio a) Diagrama de rosa con las orientaciones del fallamiento la zona de estudio. b) Red estereográfica con los planos de falla.	43
16	Datos estructurales del fallamiento en la terraza Santa Catarina. a) Diagrama de rosa con las orientaciones de la fallas normales. b) Red estereográfica que muestra el comportamiento de los planos de falla en la terraza.	44
17	Sección transversal A-A' en la terraza Santa Catarina. Pmi = Miembro inferior, Pms = Miembro superior, Tv = Basamento volcánico del Terciario, PQal = Aluvión Plio-Cuaternario, Qal = Aluvión del Cuaternario.	45
18	Datos estructurales del fallamiento en la terraza Santa Catarina con echados bajos. a) Diagrama de rosa, mostrando las orientaciones del fallamiento. b) Red estereográfica mostrando el comportamiento de los planos de falla.	47
19	Datos estructurales del fallamiento en la terraza El Coloradito. a) Diagrama de rosa con las orientaciones de la fallas normales. b) Red estereográfica que muestra el comportamiento de los planos de falla en la terraza.	48
20	Sección transversal B-B' en la terraza El Coloradito (figura 6), con orientación SO-NE, mostrando las principales estructuras en la terraza. Pms=Miembro superior, Pmi=miembro inferior, PQal=Aluvión Plio-Cuaternario, Qal=Aluvión Cuaternario.	50

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
21	Datos estructurales del fallamiento en la terraza Playa Cristina. a) Diagrama de rosa con las orientaciones de las fallas normales. b) Red estereográfica que muestra el comportamiento de los planos de falla en la terraza.	51
22	Sección transversal en la terraza Playa Cristina (figura 9). Sección C-C' con orientación O-E, mostrando las principales estructuras en la terraza. Pms=Miembro superior, Pmi=Miembro inferior, PQal=Aluvión Plio-Cuaternario, Qal=Aluvión Cuaternario.	52
23	Diagrama ortogonal de Zijderveld, con la trayectoria de desmagnetización de la muestra ec-39. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Este diagrama corresponde a un evento normal, con una trayectoria estable entre los pasos AF 0 a TT 300. Puntos negros = declinación, puntos blancos = inclinación.	55
24	Diagrama ortogonal de Zijderveld, con la trayectoria de desmagnetización de la muestra ec-41. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Este diagrama corresponde a un evento normal con una trayectoria estable entre los pasos TT 300 a TT 550. Puntos negros = declinación, puntos blancos = inclinación.	56
25	Hemisferio inferior de una red estereográfica mostrando la trayectoria de desmagnetización de la muestra ec-39. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Puntos negros = hemisferio inferior, puntos blancos = hemisferio superior. La posición del polo actual se representa con un círculo achurado.	57
26	Hemisferio inferior de una red estereográfica mostrando la trayectoria de desmagnetización de la muestra ec-41. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Puntos negros = hemisferio inferior, puntos blancos = hemisferio superior. La posición del polo magnético actual en la localidad se representa con un círculo achurado	58

LISTA DE FIGURAS (continuación).

Figura		Página
27	Diagrama ortogonal de Zijderveld, con la trayectoria de desmagnetización de la muestra Ptec. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. La trayectoria de desmagnetización se considera inestable ya que no tiene un comportamiento rectilíneo. Puntos negros = declinación, puntos blancos = inclinación.	59
28	Hemisferio inferior de una red estereográfica mostrando la trayectoria de desmagnetización de la muestra Ptec = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Puntos negros = hemisferio inferior, puntos blancos = hemisferio superior. La posición del polo magnético actual se representa con un círculo achurado.	60
29	Columna magnetoestratigráfica de El Coloradito. Sitios EC y EC8. Su ubicación se indica en la figura 6. VGP = pologeomagnético virtual, MAD=Desviación angular máxima. Puntos negros = polaridad normal, puntos blancos = polaridad inversa.	61
30	Posición del polo virtual en El Coloradito, declinación e inclinación, mostrando las elipses del 95% de confianza y parámetros estadísticos, mostrando las distribuciones de Fisher y Bingham (citados en Butler, 1992), utilizando 40 datos. Ver texto para explicación.	63
31	Posición del polo virtual en El Coloradito, declinación e inclinación, mostrando las elipses del 95% de confianza y parámetros estadísticos, mostrando las distribuciones de Fisher y Bingham (citados en Butler, 1992), utilizando 11 datos. Ver texto para explicación.	64
32	Diagrama ortogonal de Zijderveld, con la trayectoria de desmagnetización de la muestra pca-2.1a. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Este corresponde a un evento normal. Puntos negros = declinación, puntos blancos = inclinación.	67

LISTA DE FIGURAS (continuación).

Figura		Página
33	Diagrama ortogonal de Zijderveld, con la trayectoria de desmagnetización de la muestra pca-2.1c. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Este corresponde a un evento normal. Puntos negros = declinación, puntos blancos = inclinación.	68
34	Hemisferio inferior de una red estereográfica mostrando la trayectoria de desmagnetización de la muestra pca-2.1a AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Puntos negros = hemisferio inferior, puntos blancos = hemisferio superior.	69
35	Hemisferio inferior de una red estereográfica mostrando la trayectoria de desmagnetización de la muestra pca-2.1c AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Puntos negros = hemisferio inferior, puntos blancos = hemisferio superior.	70
36	Columna magnetoestratigráfica de Playa Cristina. Sitios PC, PCA, PCD y PCE, su ubicación se muestra en la figura 9. VGP = pogeomagnético virtual, MAD=Desviación angular máxima. Puntos negros = polaridad normal, puntos blancos = polaridad inversa.	72
37	Declinación e inclinación en Playa Cristina, mostrando las elipses del 95% de confianza y parámetros estadísticos, mostrando las distribuciones de Fisher y Bingham (citados en Butler, 1992), utilizando 48 datos. Ver texto para explicación..	73
38	Declinación e inclinación en Playa Cristina, mostrando las elipses del 95% de confianza y parámetros estadísticos, mostrando las distribuciones de Fisher y Bingham (citados en Butler, 1992), utilizando 21 datos. Ver texto para explicación.	74
39	Correlación estratigráfica y magnetoestratigráfica de las localidades El Coloradito (E.C.) y Playa Cristina (P.C.), con la escala geomagnética del tiempo, corregida por Mankinen y Dalrymple (1979). Ver texto para explicación.	80
40	Correlación estratigráfica y magnetoestratigráfica de las localidades El Coloradito (E.C.) y Playa Cristina (P.C.), con la escala geomagnética del tiempo, corregida por Harland y colaboradores (1989). Ver texto para explicación.	81

LISTA DE FIGURAS (continuación).

Figura		Página
41	Modelo de depositación para una plataforma somera dominada por mareas. (Tomada de Reineck y Singh, 1975)	85
42	Elipse de deformación, para un sistema derecho. El fallamiento izquierdo en la zona de estudio se interpreta como resultado del fallamiento antitético que el modelo predice. (Traducido de Harding, 1974).	96
43	Modelo tridimensional que ilustra la actividad simultánea del desplazamiento lateral y rotación de los bloques afallados. a) Configuración inicial. b) Después de la deformación. Fallas izquierdas generan rotación en el sentido de las manecillas del reloj. Fallas derechas generan rotación en el sentido contrario de las manecillas del reloj. (Tomado de Ron et al. 1984).	97

IMPLICACIONES TECTONICAS DE LA DEFORMACION PLIO-CUATERNARIA DE LAS TERRAZAS MARINAS AL NORTE DE PUERTECITOS, NE DE BAJA CALIFORNIA.

I INTRODUCCION.

La deformación asociada al movimiento relativo de la placa del Pacífico con respecto a la placa de Norteamérica, se reparte a lo largo del Sistema Transforme del Golfo de California, y en el continente, a lo largo del Sistema Transforme de San Andrés. Sin embargo, poco se sabe acerca de cómo la deformación asociada a este desplazamiento se manifiesta en las márgenes continentales que rodean al Golfo de California.

Para lograr un panorama más claro de como la deformación se distribuye en la margen continental, es indispensable realizar un estudio integral de la deformación en rocas pertenecientes al Terciario Superior distribuidas en la margen continental. El estudio de la deformación de esta región resulta clave para poder entender la manera en que el movimiento en el Golfo de California se transmite al continente.

Las secuencias sedimentarias del Terciario Superior, en la provincia Extensional del Golfo de California, afloran principalmente en la margen oriental de la península de Baja California y al sur de California, EE.UU.. Las localidades del Mioceno Tardío-Plioceno que han sido o están siendo estudiadas en esta provincia son: en el área de Vallecito-Fish Creek Johnson *et al.* (1983) y Kerr (1984) han descrito una secuencia que consiste en de depósitos intracontinentales de río entrelazado que varían lateralmente a depósitos marinos someros); Al NW de San Felipe, Boehm (1984) estudió una secuencia formada por depósitos batiales del Mioceno medio depositados en condiciones anóxicas en una cuenca cerrada; en la región de Puertecitos Martín-Barajas *et al.* (1993) reportan depósitos de plataforma somera dominada por mareas. En Santa Rosalía Wilson (1948) y en Loreto McLean (1989), describen la secuencia que está constituida por depósitos de abanico aluvial, deltaicos, playa y arrecifales.

En este trabajo se presentan la estratigrafía y los ambientes de depósito de una secuencia de sedimentos marinos del Plioceno que afloran en el flanco oriental de la Sierra de San Fermín, al norte de Puertecitos, Baja California (Figura 1). En esa zona se realizó un estudio paleomagnético y estructural para caracterizar el estilo y tiempo de la deformación en las terrazas marinas durante el Plioceno Tardío y Pleistoceno.

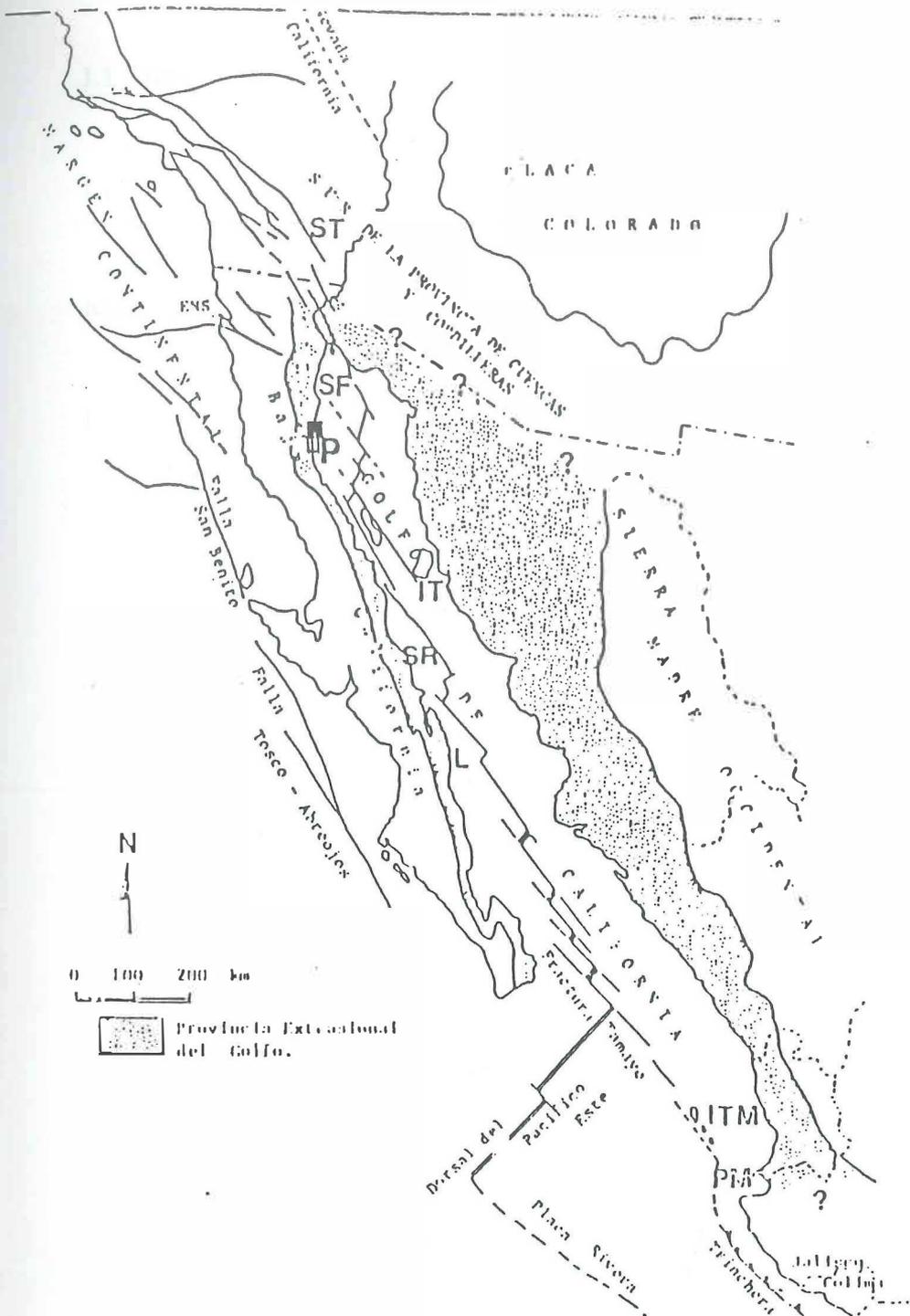


Figura 1. Marco tectónico del noreste de la Península de Baja California y con la ubicación de depósitos marinos del Neogeno alrededor del Golfo de California. La provincia volcánica de Puertecitos se indica con una P. La zona de estudio (figura 3) se indica con un cuadro abierto. ST, Depresión de Salton; SF, San Felipe; IT, Isla Tiburón; SR, Santa Rosalía; L, Loreto; ITM, Islas Tres Marias; PM, Punta Mita. (Modificado de Stock y Hodges (1989)).

I.1 Objetivos.

I.1.1 Objetivo General.

Establecer las características estructurales de la deformación de la secuencia en las terrazas marinas en el flanco oriental de la Sierra de San Fermín, B.C..

I.1.2 Objetivos específicos.

- 1) Realizar la cartografía geológica y la estratigrafía de las terrazas marinas.
- 2) Establecer el medio ambiente de depósito de las unidades en la secuencia marina.
- 3) Estimar la tasa de sedimentación y edad de la secuencia marina.
- 4) Caracterizar el estilo de deformación de las terrazas.

II Marco Geológico.

La zona de estudio se encuentra en la costa oriental de la península de Baja California, a aproximadamente 300 km. al SE de Ensenada, B.C. y a 200 km. al sur de Mexicali, B.C. (Figura 2).

La secuencia marina que aflora en el flanco oriental de Sierra San Fermín sobreyace a rocas volcánicas del Mioceno (21 a 6 Ma.) y es contemporánea con unidades del Plioceno (3 Ma) (Lewis, 1994). A su vez, las rocas volcánicas descansan sobre basamento granítico del Cretácico, que aflora en algunas zonas del área de estudio.

Estructuralmente la Sierra San Fermín forma parte del bloque de "techo" de la falla normal "Sierra San Felipe" (Lewis, 1994), que buza hacia el este y se encuentra aproximadamente 20 km. al este del escarpe principal del Golfo de California. Hacia el Este la zona de estudio está delimitada por el Golfo de California.

Hacia el sur de la Sierra San Fermín, Rendón-Márquez (1992) describió una secuencia compuesta por lodolitas marinas depositadas a profundidades por debajo del nivel base de ola de tormenta. En esta secuencia Rendón-Márquez (1992) reporta un evento regresivo ya que grada de lodolitas en la base a conglomerados en la cima. En la zona al NW de Puertecitos la secuencia sobreyace a domos riolíticos e ignimbritas fechadas entre 6.4 y 5.8 Ma (Martín-Barajas et al., 1994).

Martín-Barajas y Stock (1993), reportan que el principal patrón de fallamiento que afecta rocas de aproximadamente 6.0 a 3.0 Ma incluyendo la secuencia marina, es de tipo normal con dirección NNW, y la dirección de extensión es ENE. El patrón de fallamiento en Sierra San Fermín en la porción norte de la provincia volcánica de Puertecitos (P.V.P.) indica que la deformación está asociada a un sistema dextral con rumbo NNW (Lewis, 1994), que produce fallas orientadas al ENE.

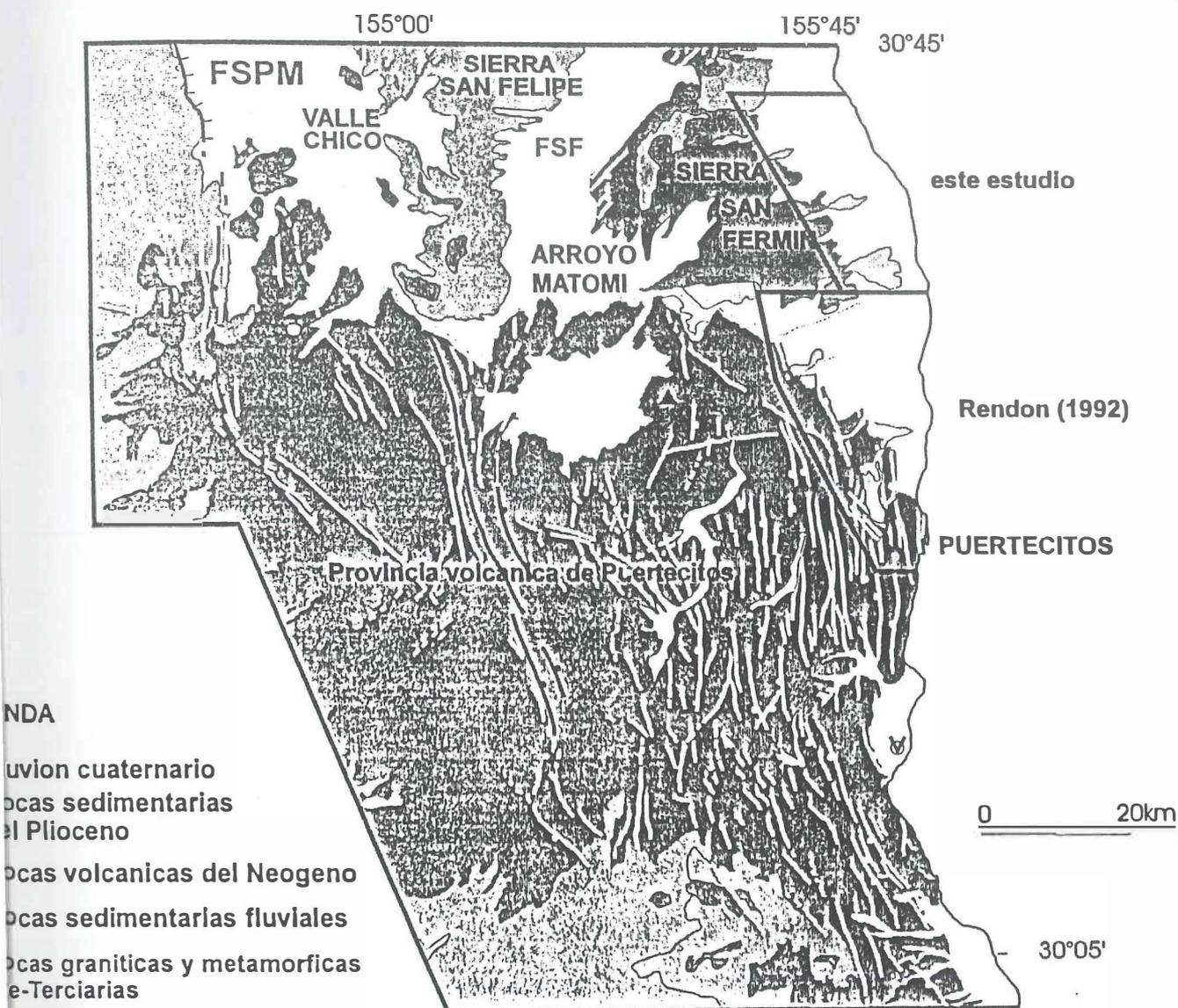


Figura 2. Mapa geológico generalizado de la zona de estudio y zonas adyacentes. FSPM: Falla San Pedro Mártir, FSF: Falla San Felipe. (Modificado de Gastil *et al*, 1975).

III Materiales y Métodos.

III.1 Cartografía geológica.

La cartografía de la zona de estudio se inició con la fotointerpretación del área utilizando fotografías aéreas (pares estereográficos) del I.N.E.G.I. a escala 1:25,000 (fotos tomadas en Noviembre de 1973). La finalidad fue identificar estructuras mayores y delimitar la zona de interés.

La cartografía a detalle se realizó utilizando mapas topográficos base a escala 1:25,000 obtenidos de la carta topográfica escala 1:50,000 (Hoja Bahía Santa María HIIB67 del I.N.E.G.I.). En el campo se levantaron columnas estratigráficas en diferentes terrazas con fines de realizar la correlación estratigráfica entre las terrazas marinas. La correlación de algunas unidades, se basó en algunos horizontes volcánicos y en las características de las facies sedimentarias, considerando estructura, composición mineralógica, características texturales y posición estratigráfica.

Los datos de campo, se compilaron en columnas estratigráficas, secciones transversales y en mapas geológicos escala 1:12,50.

III.2 Petrografía.

Uno de los criterios para definir las litofacies fue su composición mineralógica. Se realizaron análisis petrográficos en muestras de mano no consolidadas utilizando muestras de mano y un microscopio estereográfico marca Zeiss con luz directa.

En muestras bien consolidadas se hicieron láminas delgadas y se analizaron al microscopio petrográfico marca Olympus con luz polarizada, para identificar la mineralogía, textura y características petrográficas entre horizontes tentativamente correlacionables.

III.3 Análisis estructural.

Del análisis de los datos de falla obtenidos en campo, se estimó la orientación del tensor de esfuerzos. El graficado de planos en red estereográfica, rosas de viento y análisis de fallas con datos de estría, se realizó con los programas Fault Kinematics (v. 3.2a 1989) y Stereonet (4.3, 1989) (R.W. Allmendinger et al. © 1989) para McIntosh. El primero utiliza el algoritmo de Bingham para calcular la orientación del tensor de esfuerzos. El segundo se utilizó para graficar las fallas que fueron separadas por familias con rumbos iguales y echados contrarios para tratar de identificar pares conjugados, y estimar la dirección de compresión.

Para calcular el porcentaje de extensión en una sección transversal se utilizó el algoritmo propuesto por Wernicke y Burchfiel (1982).

$$\%ext. = \frac{[[\text{Sen}(\phi + \Theta)]]}{[[\text{Sen}\phi] - l]} \times 100 \quad (1)$$

donde

l = longitud del bloque.

ϕ = echado de la unidad.

Θ = echado del plano de falla.

siempre y cuando $\Theta + \phi < 90^\circ$.

III.4 Paleomagnetismo.

Debido a que la información estructural obtenida en el trabajo de campo no fue suficiente para establecer un modelo estructural, se decidió realizar un estudio paleomagnético que brindara una herramienta alternativa para apoyar las interpretaciones y proponer un modelo de deformación.

Del muestreo paleomagnético se obtuvieron 240 núcleos orientados de las terrazas de Playa Cristina, Playa Cristina Norte y El Coloradito.

El muestreo para el estudio paleomagnético se realizó con una perforadora de gasolina con barreno con punta de diamante de 2.54 cm de diámetro, enfriado a base de aire. La orientación de los núcleos se tomó *in situ*, con una guía de bronce y una brújula azimutal sin declinación, la orientación de los núcleos tuvo 2° de precisión.

Debido a que la secuencia de lodolitas y areniscas no están consolidadas, se dificultó la obtención de muestras. Se muestreó a razón de 1 núcleo por metro en Playa Cristina, Playa Cristina Norte y en El Coloradito. El alto contenido de esmectita en las lodolitas también dificultó el muestreo ya que al calentarse el núcleo, la arcilla se expande y provoca que se

atasque el barreno con la consiguiente destrucción del núcleo. En las unidades donde las condiciones litológicas lo permitieron se obtuvieron hasta 8 núcleos.

Los núcleos fueron sometidos a un proceso de preparación para ser analizados en el magnetómetro. La preparación consiste en cortar todos los núcleos a un tamaño estándar (2.5 cm de largo), ya que el sistema asume un volumen estándar por muestra de 1 pulgada cúbica. Las muestras fueron etiquetadas con una pintura no magnética y resistente a altas temperaturas marca Zircar®. Los núcleos que estaban rotos, fueron "pegados" con esta misma pintura.

Las muestras se analizaron en el Laboratorio de Paleomagnetismo del *California Institute of Technology* en Pasadena, California, en un magnetómetro con interface computarizada con sistema superconductor criogénico SQUID (Superconducting Quantum Interference device), con ruido ambiental de $5 \times 10^{-12} \text{ A}\cdot\text{m}^2$, en un cuarto con un campo magnético ambiental $< 10 \text{ nT}$, donde se almacenaron las muestras durante el análisis.

Una vez listos los núcleos, se midió el magnetismo remanente natural (MRN) en dos direcciones: primero el núcleo orientado hacia arriba y posteriormente el núcleo orientado hacia abajo, esto con el fin de obtener el rango de error en la ubicación del núcleo y así evitar que el núcleo medido experimente rotaciones producto de un error en su colocación durante las mediciones.

Los núcleos se sometieron a un análisis de desmagnetización por campos alternantes, desde 12.5 hasta 200 Gauss, con incrementos de 12.5 Gauss. Este método consiste en desmagnetizar paulatinamente los núcleos, sometiéndolos a campos magnéticos de

diferente intensidad y orientación alternante con el fin de eliminar cualquier tipo de magnetismo secundario que pudiera haber adquirido la roca por procesos diagenéticos.

Dado que el método de desmagnetización por campos alternantes no es muy sensible a magnetizaciones secundarias pequeñas, fue necesario someter los núcleos a desmagnetización térmica en un horno con revestimiento antimagnético, desde 100°C hasta 625°C, con incrementos de 50°C hasta los 450°C y de 25°C en adelante.

Los cálculos estadísticos de los datos paleomagnéticos se hicieron utilizando el programa *Paleomag v2.3* (Craig Jones y Joe Kirschvink, *California Institute of Technology* ©1991). Este programa calcula distribuciones de Fisher para los datos utilizados, promediando las direcciones promedio de la declinación e inclinación. En el apéndice 1 se incluyen los algoritmos que utiliza el programa.

El cálculo de rotaciones y los errores se calcularon de acuerdo a Demarest (1983). En el apéndice 2, se incluye el programa diseñado para hacer los cálculos.

IV Resultados.

Durante el período de diciembre de 1992 a marzo de 1993 se realizó la cartografía de detalle a escala 1:12,500 de las terrazas marinas y se definió la estratigrafía que sirvió de base para el estudio de paleomagnetismo. Con base en la cartografía se decidió dividir la zona de estudio en 5 terrazas: Santa Catarina (S.C.), El Coloradito (E.C.), El Coloradito Norte (E.C.N.), El Coloradito Sur (E.C.S.) y Playa Cristina (P.C.) (Fig. 3), esta separación obedece a que la secuencia marina presenta variaciones laterales de facies entre terraza y terraza y es necesario describir las secuencias litoestratigráficas a nivel del sitio.

IV.1 Unidades litoestratigráficas.

La secuencia marina al oriente de Sierra San Fermín está compuesta por dos miembros informales: el miembro inferior (Pmi) y el miembro superior (Pms). Esta división sigue la división de la secuencia marina que aflora en el área de Puertecitos al sur de la Sierra de San Fermín (Rendón-Márquez, 1992). En este trabajo, el miembro inferior (Pmi) incluye tres unidades: una unidad basal de conglomerados (Pcv) que subyace concordantemente a una unidad de arenisca gris fosilífera que grada, a su vez, a una unidad de lodolitas amarillas (Pla) (Tabla I). El miembro superior incluye cinco unidades, en la base, Pms presenta una unidad de lodolita roja (Plr) que subyace a una unidad de lodolita café (Plc). Estas unidades pasan lateralmente a una unidad de conglomerado (Pc) en la parte sur y occidental del área de estudio. En la cima la secuencia marina subyace a un conglomerado aluvial. El contacto entre la secuencia marina y este depósito subáereo es en

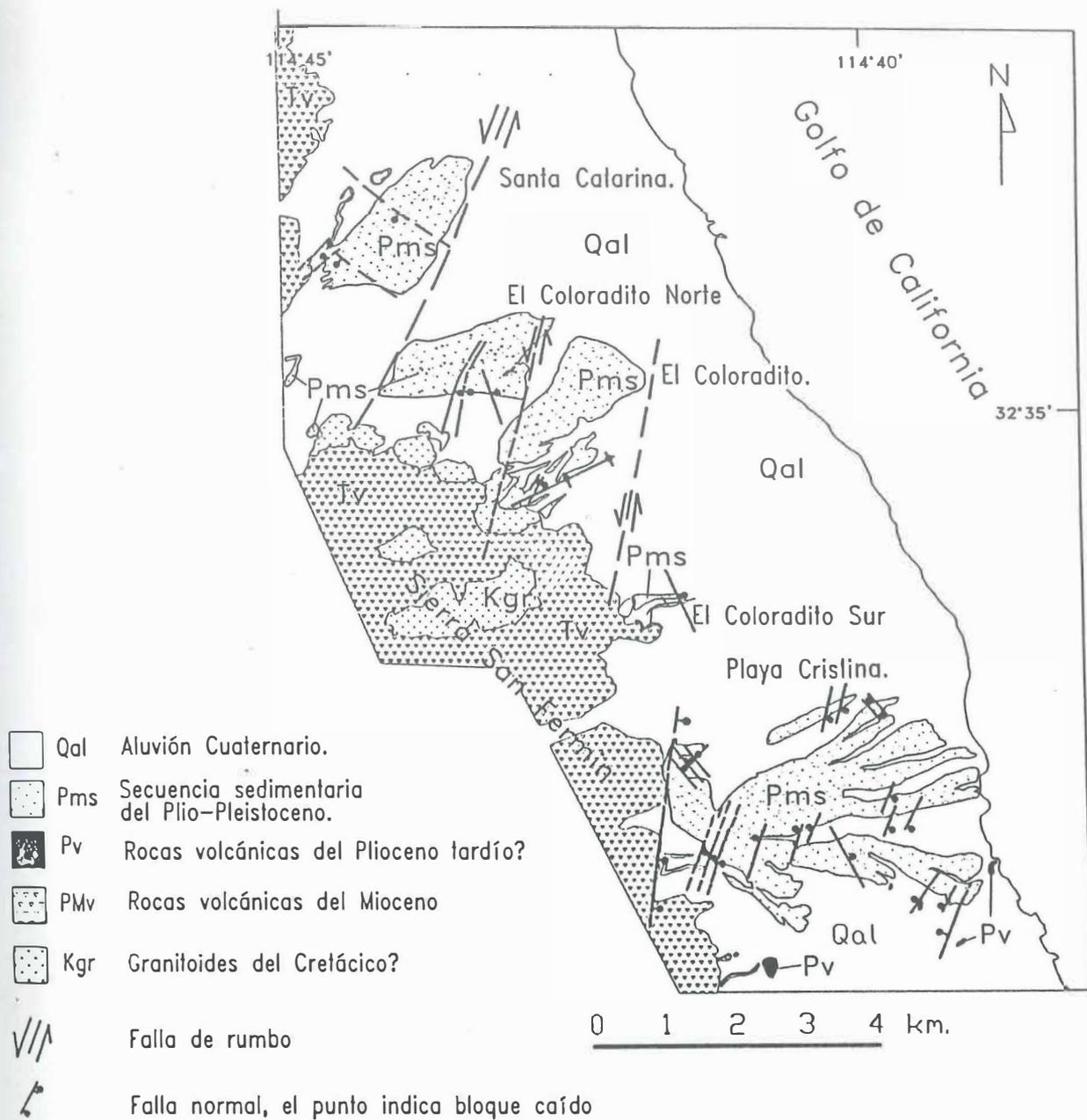


Figura 3. Mapa geológico simplificado de las terrazas marinas en el flanco Este de la Sierra San Fermín.

general discordante, aunque en la terraza El Coloradito la unidad de lodolita café grada a areniscas conglomeráticas y a conglomerados cuaternarios (PQal) (Tabla I).

En el miembro superior se identificaron dos unidades volcanoclásticas interestratificadas que se utilizaron como horizontes de referencia para las correlaciones estratigráficas entre las terrazas. Estos horizontes, denominados Pap y Pte (Tabla I), se encuentran en la parte media y hacia la cima de Pms, respectivamente, y presentan una amplia distribución en el área de estudio.

Las características generales de las unidades litoestratigráficas que comprenden la secuencia sedimentaria en la Sierra San Fermín son:

Unidad 1. Conglomerado volcánico marino (Pcv). Consiste en un estrato de un conglomerado soportado por clastos, de 3 a 4 m de espesor máximo, que sobreyace a rocas volcánicas cuya edad se reporta en 6.5 Ma (Lewis, 1994). Los clastos son subredondeados a subangulosos y varían de tamaño desde bloques (~ 1 m de diámetro máximo) hasta guijarros. El estrato de conglomerado es masivo, presenta algo de imbricación y está compuesto únicamente de clastos de roca volcánica. Hacia la cima presenta gradación normal y grada a una arenisca gris, lodosa y muy fosilífera que tiene un espesor de 2 a 3 m. En algunos sitios, la arenisca gris es menos fosilífera y presenta concreciones de yeso.

Unidad 2. Lodolitas amarillas (Pla). Es la unidad más representativa del miembro inferior en el área de estudio. Consiste en una lodolita de color amarillo ocre a amarillo verdoso, generalmente masiva y/o con estratificación laminar. Localmente presenta estratos delgados de arenisca fina. Subyace concordantemente a la arenisca fosilífera,

aunque generalmente aflora en contacto de falla con las rocas volcánicas del Mioceno Tardío. El máximo espesor observado de esta unidad es de unos 30 m, aunque solo en algunos sitios aflora la base y sobreyace en contacto gradacional a la arenisca fosilífera. Esta unidad representa la cima del miembro inferior.

Unidad 3. Lodolitas rojas (Plr). Esta unidad representa la base del miembro superior. Consiste en una alternancia de capas delgadas de lodolita y arenisca de grano muy fino. Contiene lentes arenosos que presentan una coloración rojiza a ocre característica. Esta unidad aflora con un espesor de 1 a 2 m sobreyaciendo en discordancia erosional a la unidad de lodolita amarilla del miembro inferior.

Unidad 4. Arenisca pumicítica del Plioceno (Pap). Es una toba vítrea de ceniza y lapilli pumicítico retrabajados, de color gris claro a blanco. Presenta estratificación planar tabular y cruzada de bajo ángulo, así como estructuras de carga (flamas). Incluye lentes de gravilla con pómez y fragmentos líticos de riolita soportados por matriz. La matriz de cenizas es de color café claro (con luz directa), la forma de las esquirlas de vidrio es vesicular tubular. Contiene aproximadamente el 75% de vidrio y el 25% de cristales. La composición de los cristales es: piroxenos ~8%; anfíboles ~1.5%; biotita ~5.5% y plagioclasas ~85%. El espesor de la unidad disminuye hacia el norte, de aproximadamente 10 m como máximo en Playa Cristina, a menos de 1 m en El Coloradito.

Unidad 5. Lodolita café (Plc). Es la unidad más representativa del miembro superior. Consiste en una alternancia de estratos delgados (1-3 cm) a gruesos de lodolitas y estratos muy delgados (1-2 cm) de arenisca de grano fino. Contiene también 3 o 4 horizontes

bentoníticos color verdoso de 50 a 100 cm de espesor y localmente contiene a las dos unidades volcanoclásticas de referencia (Pap y Pte). El máximo espesor de la unidad de lodolita café es de unos 50 m en la terraza Playa Cristina, hacia el sur, en donde en la base presenta interdigitaciones con estratos y lentes de arenisca conglomerática hacia la parte occidental de la terraza. En la terraza El Coloradito, Plc pasa lateralmente a depósitos de arenisca y a depósitos de brecha sedimentaria que representan cambios laterales de facies. Estos depósitos de grano grueso fueron considerados como una unidad diferente aunque son, en parte, equivalentes a la unidad de lodolita café.

La unidad de lodolita café sobreyace concordantemente a la unidad de lodolita roja (Plr), y en algunos sitios sobreyace en discordancia a las lodolitas amarillas del miembro inferior. Hacia la cima esta unidad subyace discordantemente a un conglomerado soportado por clastos, aunque en El Coloradito este contacto es gradacional y en él se ubica el horizonte de referencia toba E del Plioceno (Pte).

Unidad 6. Conglomerados (Pc). Consiste en una sucesión de conglomerados y areniscas conglomeráticas con estratificación planar tabular y gradación normal, que sobreyacen en contacto erosional a las lodolitas cafés. Los clastos varían en tamaño desde grava hasta cantos rodados subredondeados. En Playa Cristina, subyace de manera gradacional a las mismas lodolitas cafés.

Unidad 7. Toba E del Plioceno (Pte). Consiste en una toba vítrica retrabajada, de color verde oscuro, con espesores variables de 1.5 m a 20 cm de espesor entre Playa Cristina y El Coloradito respectivamente. Presenta estratificación planar, no bien definida, con

horizontes arenosos de aproximadamente 5 cm de espesor y horizontes de material escoriáceo, con fragmentos de hasta 15 cm de diámetro que presentan gradación inversa. Mineralógicamente está compuesta por biotita, piroxenos y bajo contenido de plagioclasas; localmente contiene como cementante carbonato de calcio diagenético.

Unidad 8. Aluvión del Plio-Cuaternario (PQal). Consiste en un depósito conglomerático de composición principalmente volcánica, aun cuando existen clastos de origen granítico. Los clastos son angulosos y están soportados por arena de grano medio de la misma composición. Sobreyace en contacto erosional a la secuencia marina. En Playa Cristina este contacto presenta una discordancia angular de hasta 30°.

La relación de las unidades estratigráficas con las litofacies a que están asociadas se presentan en la tabla I.

Tabla I. Unidades estratigráficas y litofacies asociadas.

Unidad	Clave	litofacies característica	Litofacies asociadas
8) Aluvión plio-cuaternario	PQal	aluvión plio-cuaternario	
7) Toba E del Plioceno	Pte	Pte	
6) Conglomerados	Pc	conglomerados	
5) Lodolitas cafés	Plc	Lodolitas cafés	areniscas cuarzo-feldespáticas
4) Arenisca pumicítica del Plioceno	Pap	Pap	
3) Lodolitas rojas	Plr	Lodolitas rojas	Areniscas rojas
2) Lodolitas amarillas	Pla	Lodolitas amarillas	areniscas grises, brechas conglomeráticas
1) Conglomerado volcánico marino	Pcv	Conglomerado marino	volcánico

IV.1.1 Descripción de litofacies.

Basados en sus características petrológicas, estructuras primarias y su contenido de fósiles se describieron 9 litofacies, 3 corresponden al miembro inferior (Pmi) y 6 al miembro superior (Pms).

A) litofacies de conglomerado volcánico marino. Esta litofacies consiste en un conglomerado masivo pobremente clasificado, soportado por clastos. Los clastos varían en tamaño desde gravas hasta bloques de 1 m de diámetro. Los clastos son de origen volcánico, principalmente de lava riolítica y toba de lapilli con granos subredondeados. Dado que esta litofacies grada a una arenisca fosilífera de color gris, se ha interpretado tentativamente a esta litofacies, como un depósito aluvial progradante, aunque se observaron fósiles característicos de este ambiente (baláños, ostreas, erizos, etc.).

B) Litofacies de areniscas grises. Consiste en un arenisca de tamaño medio, bien clasificada y color gris claro, con estructura principalmente masiva. Está compuesta principalmente de vidrio volcánico reabajado y en menor porcentaje plagioclasas y fragmentos de roca. Asociados a esta litofacies, encontramos fragmentos fósiles de *Encope* sp., *Turritella* sp., fragmentos de bivalvos e icnofósiles, principalmente del tipo domichnia (madrigueras).

Las características mineralógicas sugieren que la principal fuente de material sedimentario proviene de depósitos de origen volcaniclástico, mientras que las características sedimentarias y fosilíferas indican claramente un medio ambiente intermareal. Se infiere

que la falta de estructura interna de la litofacies, se debe a bioturbación como lo demuestran los icnofósiles.

C) Litofacies de brechas conglomeráticas. Consiste en depósitos de grano grueso, pobremente clasificados, con clastos tamaño de guijarro a bloque de hasta ~2 m de diámetro. Presenta estratificación planar pobremente desarrollada hacia la base, y masivos hacia la cima, está soportada por clastos. La composición de los clastos es principalmente volcánica: tobas lapilli, tobas riolíticas soldadas y pómez. La matriz es de arena gruesa moderadamente clasificada, de estructura masiva. Está compuesta principalmente por fragmentos de roca volcánica. Estos depósitos gradan lateralmente a areniscas medias que a su vez gradan a una facies de lodolita café.

Con base en las características texturales y al arreglo interno de las brechas, se infiere que estos son depósitos de ábanico aluvial.

D) Litofacies de lodolitas amarillas. Consiste en una lodolita de color amarillo, de estructura masiva y fisil cuando se intemperiza. La presencia de esmectita es dominante y la illita se presenta como componente menor (Cuevas, 1994). Contiene moldes de *Chione* sp. y tubos de diámetro milimétrico rellenos de óxidos de fierro.

La presencia de esmectita dominante indica que la fuente del sedimento es principalmente material volcánico y sus productos de alteración. Dadas sus características texturales, esta litofacies posiblemente fue depositada en condiciones de baja energía y probablemente a profundidades por debajo de la base de ola en condiciones de tormenta.

E) Litofacies de lodolitas rojas. Consiste en una lodolita de color rojo, su estructura es fisil cuando está intemperizada y en ocasiones se presenta pobremente laminada. La esmectita es la arcilla dominante y en menor proporción se identificó illita (Cuevas, 1994). Contiene horizontes de aproximadamente diez centímetros de espesor con moldes de *Chione* sp., en posición de vida. El rango batimétrico de *Chione* sp. oscila entre los 30 y 45 m. (Téllez-Duarte, com. pers.), lo cual apoya la interpretación de un medio ambiente infralitoral, a profundidades por debajo del nivel base de ola en condiciones de tormenta.

F) Litofacies de areniscas rojas. Consiste en una arenisca lodosa de color rojo, con estratificación planar tabular pobremente desarrollada, la matriz es de material limo-arcilloso de color rojo posiblemente debido a óxidos de fierro. La fracción arenosa, está compuesta por arena bien clasificada y subredondeada, de tamaño medio y estructura masiva. La composición mineralógica es principalmente fragmentos de roca volcánica >> cuarzo > plagioclasa >> biotita. La fracción arcillosa está compuesta por esmectita y cantidades menores de illita (Cuevas, 1994). Ocasionalmente se encuentran horizontes de concreciones ferruginosas interestratificados. Esta litofacies presenta una asociación faunística de fósiles retrabajados de: bivalvos > gasterópodos > turrítelas > quelas de cangrejo >> corales >>> dientes de tiburón. Esta asociación de organismos se presenta en un ambiente intermareal de energía moderada. El color rojizo de la matriz sugiere alteración de minerales ferromagnesianos y óxidos de fierro en condiciones subaéreas.

G) Litofacies de conglomerados. Consiste en una sucesión de conglomerados y areniscas conglomeráticas con estratificación planar tabular y gradación normal. Los clastos varían

en tamaño desde grava hasta cantos rodados subredondeados. Estos clastos son de origen volcánico principalmente, y granítico en menor proporción. La arenisca es de grano grueso y está compuesta por fragmentos de roca volcánica como componente principal, el cuarzo y los feldespatos se presentan como componentes menores.

La pobre clasificación y el grado moderado de redondeo de los clastos, sugieren que estos conglomerados son depósitos aluviales, que progradaron varios cientos de metros hacia el mar, probablemente durante eventos de tormenta o de fuertes lluvias.

H) Litofacies de lodolitas cafés. Consiste en lodolitas color café claro, presentan estructura laminar y físil cuando se encuentra intemperizada. La arcilla que domina es la esmectita, también se encuentran presenta ilita y caolinita (Cuevas, 1994). Presenta lentes de arenisca fina de color café claro, estos llegan a presenta estratificación cruzada de bajo ángulo y estructuras primarias (rizaduras), la composición de la fracción arenosa es principalmente de plagioclasas, fragmentos de roca volcánica, biotita y cuarzo.

I) Litofacies de areniscas cuarzo-feldespáticas: Consiste en un depósito de arenas finas, bien clasificadas de color café claro, presentan estratificación planar, y a intervalos también presenta estratificación cruzada de bajo ángulo. Localmente presenta concreciones en forma tubular y/o planar, con sílice como cementante. La composición de estas arenas, es principalmente cuarzo-feldespática, con algo de fragmentos líticos.

J) Litofacies de aluvión plio-cuaternario: Consiste en un conglomerado de color café a rojo oscuro, y de estructura masiva. Está compuesto por clastos volcánicos subangulosos,

mal clasificados, soportados por una matriz no consolidada de arena gruesa angulosa, también compuesta por fragmentos líticos.

IV.2 Características estratigráficas y sedimentológicas de las terrazas marinas.

IV.2.1 Características estratigráficas y sedimentológicas de la terraza Santa Catarina.

Esta terraza se encuentra en el extremo norte de la zona de estudio, aproximadamente 40 km al sur de San Felipe, B.C. y 4 km al occidente de la línea de costa. La cima se ubica alrededor de la cota de los 100 m sobre el nivel medio del mar, por lo que no presenta un relieve pronunciado (Fig. 4). La terraza incluye una secuencia sedimentaria de aproximadamente 30 m de espesor (Fig. 5).

La secuencia sobryace en discordancia al basamento volcánico del Mioceno de la Sierra San Fermín. El miembro inferior en esta terraza incluye la unidad 1 compuesta por un conglomerado volcánico marino (Pcv), que grada a una arenisca gris, muy fosilífera que tiene un espesor aproximado de 3 m y que subyace en contacto gradacional la unidad 2 de lodolitas amarillas (Pla). La unidad 1 (Pcv) en esta localidad incluye a la litofacies de areniscas grises, que presenta un alto contenido de fragmentos de concha e icnofósiles (ver descripción en la Tabla I). El espesor de esta unidad es de alrededor de 2 m, ésta a su vez subyace en contacto gradacional a la litofacies de lodolitas amarillas que tiene un espesor de 12 m.

El contacto entre el miembro inferior (Pmi) y el miembro superior (Pms), no está bien definido en este sitio. El miembro superior (Pms) en esta localidad comprende tres unidades, la unidad de lodolitas rojas, representada por la litofacies de lodolitas rojas la cual presenta horizontes de moldes de bivalvos (ver tabla I para descripción), y por la litofacies

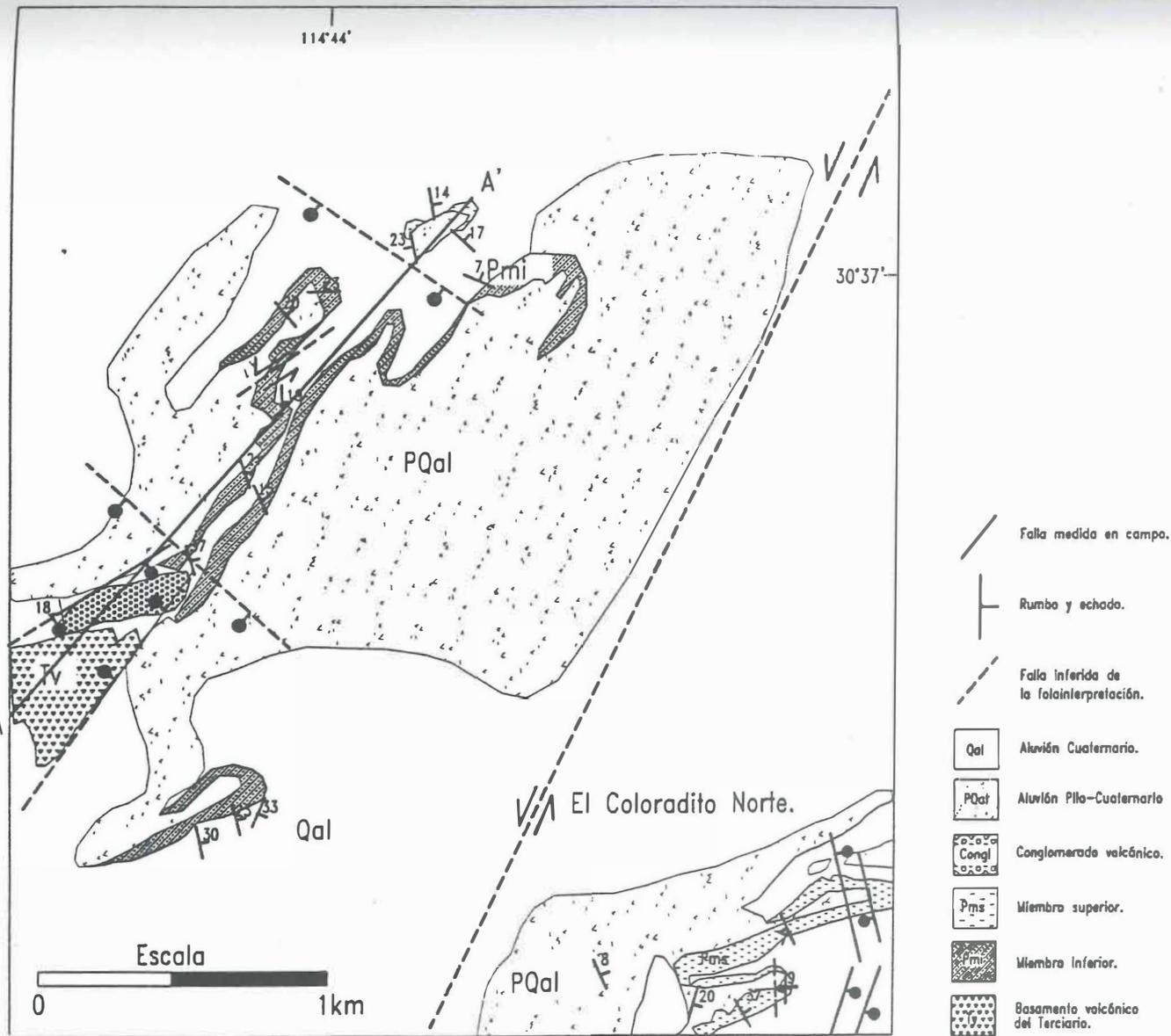


Figura 4. Mapa geológico de detalle de la terraza Santa Catarina.

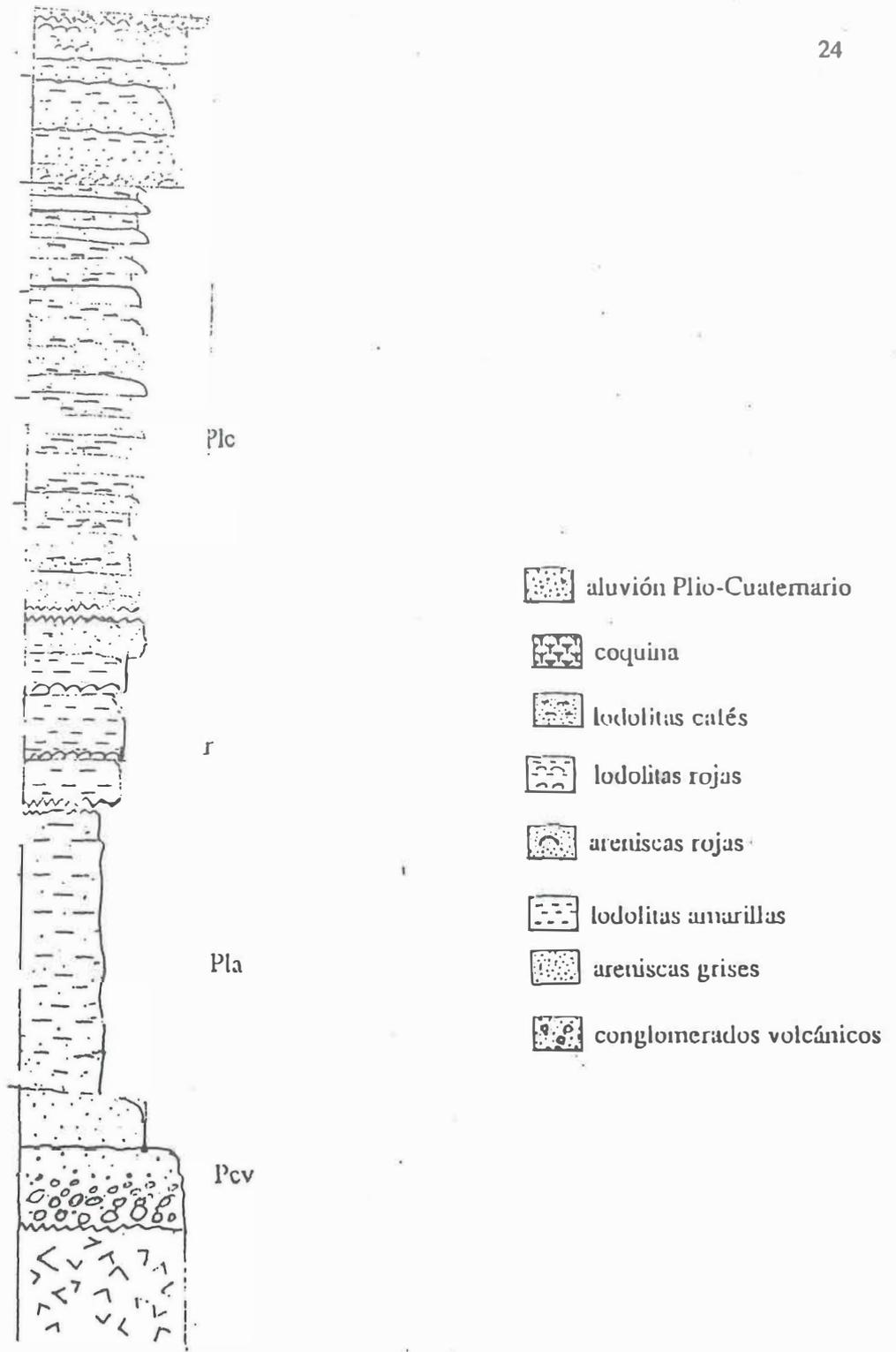


Figura 5. Columna estratigráfica compuesta de la secuencia marina que aflora en la terraza Santa Catarina.

de areniscas rojas que se repiten a intervalos de 3 m aproximadamente. Esta unidad (Pte) tiene un espesor aproximado de 10 m. Los límites superior e inferior de esta unidad están cubiertos por lo cual no se sabe que tipo de contacto hay entre esta unidad y la unidad de lodolitas cafés que la sobreyace.

La unidad de lodolitas cafés (Plc) en esta terraza, está compuesta, de la base a la cima, por una alternancia de lodolitas verdosas con horizontes ferruginosos y limo-arcillosos color café, que gradan a un lodolita color marrón con horizontes ferruginosos, compuestos por arena. Sobreyaciendo a las lodolitas, aflora una arenisca fina en capas de ~ 1.0 cm a 5 cm, presenta estratificación planar y cruzada a intervalos, así como rizaduras de pequeña escala. Está sobreyacida por una coquina de *Ostrea angelica*? de aproximadamente 1 m de espesor. Sobreyaciendo a la coquina, aflora un horizonte de limos y arcillas que sobreyace de nuevo una coquina de 1 m espesor. Toda la secuencia está cubierta en discordancia por la unidad de aluvión plio-cuaternario (PQal), que tiene un espesor de 1 m.

IV.2.2 Características estratigráficas y sedimentológicas de las terrazas en la zona de El Coloradito.

En la zona de El Coloradito, la secuencia marina aflora en tres localidades: El Coloradito Norte, El Coloradito y El Coloradito Sur (Fig. 6).

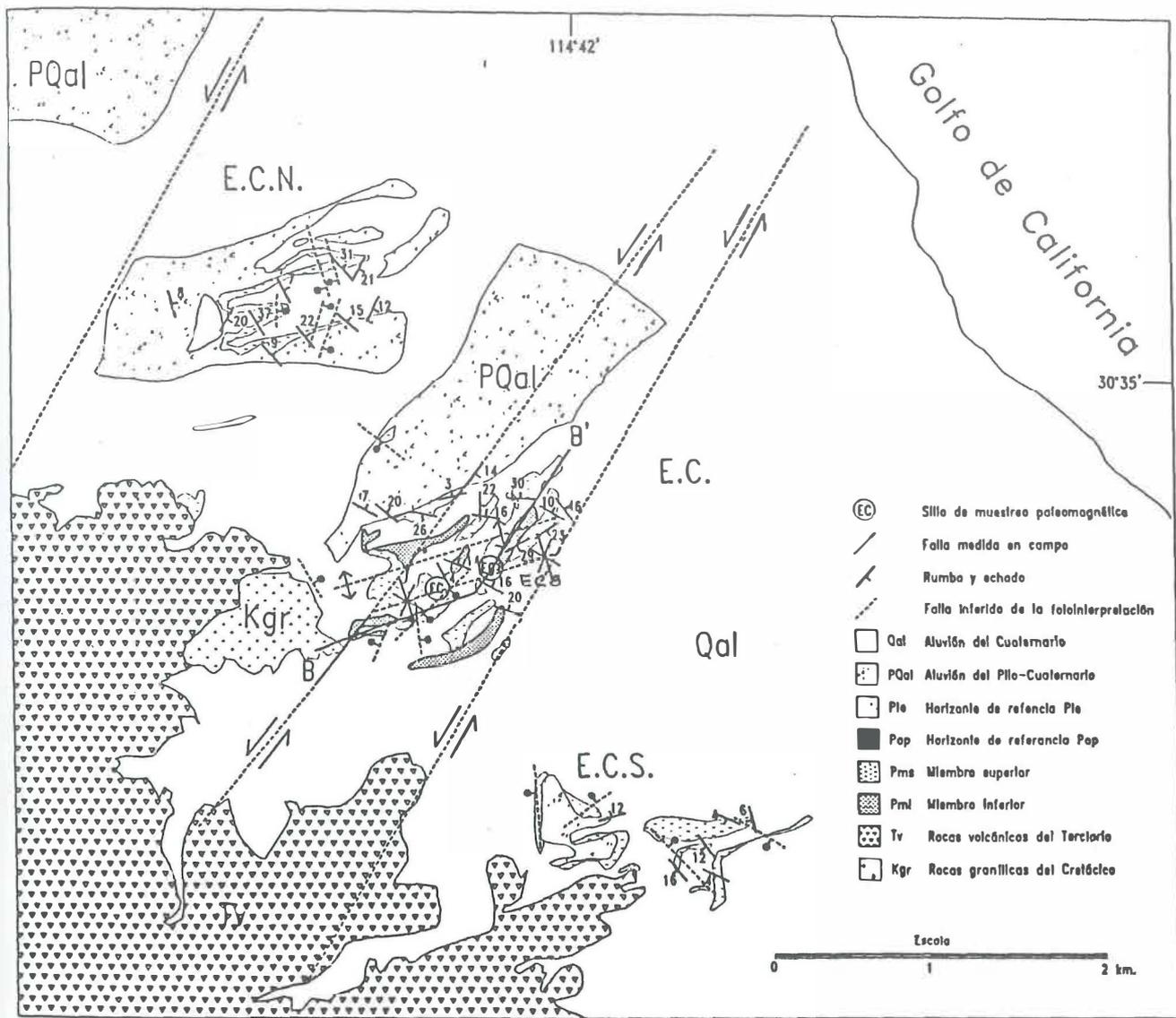


Figura 6. Mapa geológico de detalle de las terrazas en la zona de El Coloradito.
 E.C.N = El Coloradito Norte, E.C. = El Coloradito, E.C.S. = El Coloradito Sur.

IV.2.2.1 El Coloradito Norte.

Topográficamente la cima de esta terraza se encuentra en la cota de los 80 m sobre el nivel medio del mar y al igual que la terraza Santa Catarina no presenta un relieve pronunciado (Fig. 6).

Al pie de la terraza aflora la base del miembro superior. En este sitio la base consiste en una unidad de lodolitas cafés (Plc) (unidad 5) que aflora con un espesor aproximado de 3 m. Está compuesto por lodolitas color café, con yeso rellenando grietas, contiene dos estratos de arenisca de grano fino masiva de aproximadamente 1 m de espesor. Esta unidad subyace en contacto erosivo a un conglomerado mal clasificado, con clastos volcánicos, que aflora con un espesor de 4 m. El conglomerado subyace, a su vez, a otra unidad de lodolitas cafés (Plc) por lo que podría tratarse de un lente de conglomerado en la unidad de lodolitas cafés. Sobreyaciendo a las lodolitas cafés aflora de nuevo una capa de conglomerado que subyace al horizonte pumicítico de referencia Pap (unidad 4). En este sitio Pap presenta un espesor de 3 m, y una característica importante de Pap es su buena clasificación, ya que no presenta lentes de gravilla. Consiste en una arenisca pumicítica de grano medio, con estratificación planar. Este afloramiento de Pap es el último hacia el norte y toda la secuencia marina está cubierta en discordancia angular ($\approx 20^\circ$) por el aluvión plio-cuaternalio (Fig.- 7), lo que indica que la mayor parte del miembro superior fue posiblemente erosionado o no se depositó en este sitio.

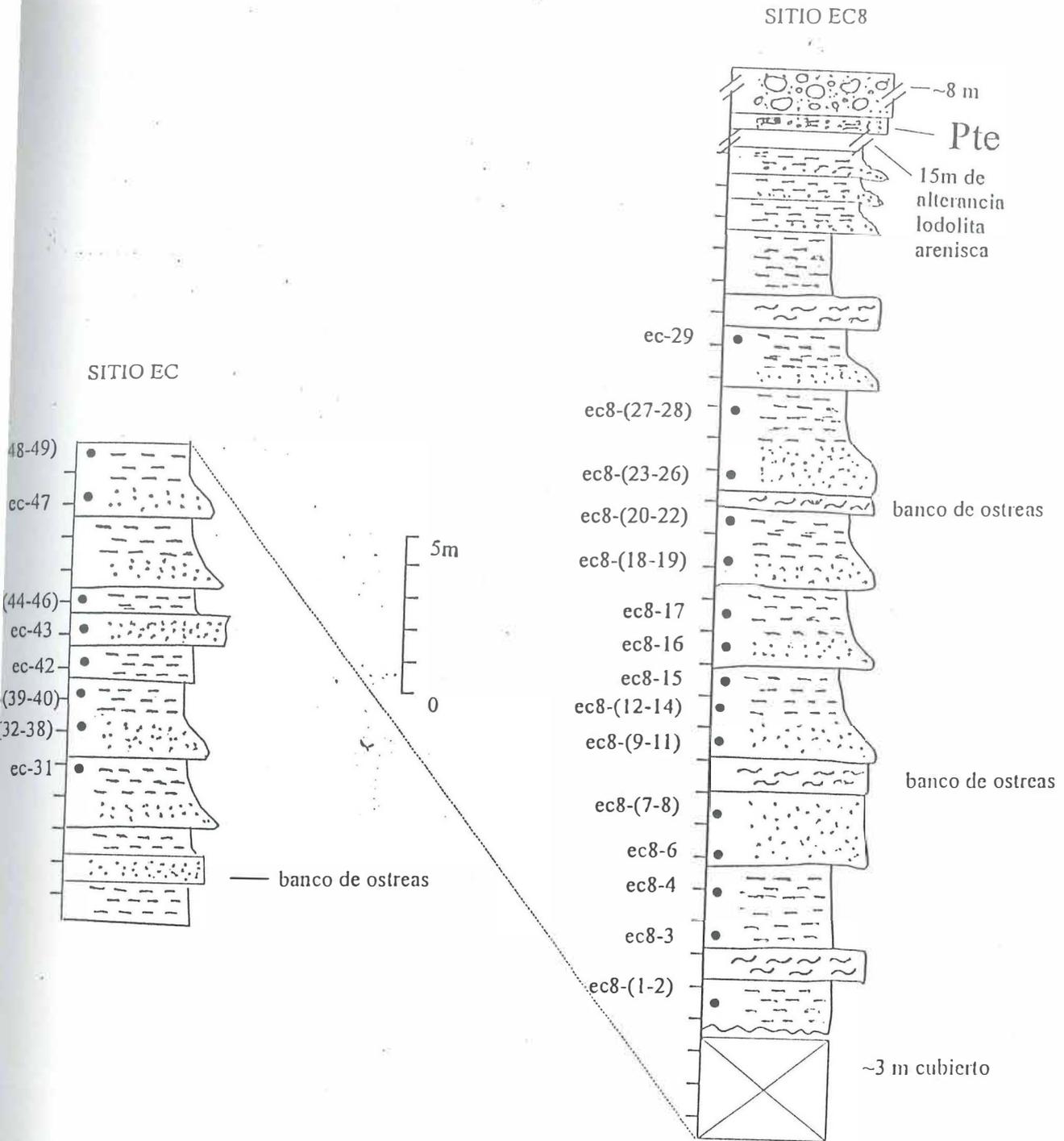


Figura 7. Columna estratigráfica compuesta de las terrazas en la zona de El Coloradito. En la margen izquierda de la columna se indica la posición estratigráfica de las muestras de paleomagnetismo, en la figura 29 se muestra la polaridad, declinación, inclinación y máxima desviación angular de estas muestras. La ubicación de las columnas de muestra en al figura 6.

IV.2.2.2 El Coloradito.

Esta terraza es la más importante en la porción central de la zona de estudio, ya que en ésta se tienen afloramientos más completos del miembro superior (Fig. 6). Se encuentra a alrededor de los 80 m sobre el nivel medio del mar y presenta mayor relieve que las terrazas al norte aún cuando no resulta abrupto.

La secuencia sedimentaria se encuentra aparentemente en contacto de falla con rocas graníticas del Cretácico y en contacto depositacional y/o de falla con las rocas volcánicas. En esta localidad el miembro inferior (Pmi), está representado por 3 unidades: la unidad 1 de conglomerado volcánico marino aflora en la base con aproximadamente 3 m de espesor. Subyace a la unidad de lodolitas amarillas (Pla) que en este sitio, incluye una litofacies de areniscas grises, la cual presenta un alto contenido de bivalvos e icnofósiles. La secuencia de conglomerados en la base y areniscas y lodolitas en la cima, indican que el miembro inferior representa una transgresión. Sin embargo, al igual que en la terraza Santa Catarina, la transición entre el miembro inferior (Pmi) y el miembro superior (Pms) no está clara.

La base del miembro superior en esta terraza está compuesta por la unidad 3 de lodolitas rojas (Plr), que tiene un espesor de aproximadamente 6 m y subyace en contacto erosional a la unidad arenisca pumicítica (Pap), que tiene un espesor aproximado de 1 m. En esta localidad la unidad 4 (Pap), consiste casi exclusivamente en arena tamaño medio de composición pumicítica y masiva. Hacia la cima aflora de nuevo la unidad 3 de lodolitas rojas (Plr) con un espesor de 12 m, la cual contiene interestratificados una arenisca de grano grueso con líticos de composición volcánica, y un conglomerado soportado por clastos con

matríz arenosa. El conglomerado subyace a una secuencia de lodolitas cafés (Plc) constituida por la litofacies de lodolitas rojas, (ver tabla I) con un espesor aproximado de 3 m. Las lodolitas rojas subyacen en contacto erosional a la unidad 6 de conglomerados (Pc); sobreyaciendo a los conglomerados en contacto gradacional, aparece de nuevo la unidad 3 de lodolitas rojas (Plc) con un espesor de 27 m. Esta unidad consiste en una alternancia de la estratos de lodolitas cafés y de areniscas cuarzo-feldespáticas, el contacto entre las areniscas y las lodolitas es gradacional. Interestratificadas en esta unidad aparecen dos coquinas de *Ostrea angelica?* con un espesor de 1.5 m aproximadamente, y de nuevo aparece la unidad 3 de lodolitas cafés (Plc) con un espesor de 8 m aproximadamente. Esta unidad se encuentra sobreyacida en contacto erosional por un depósito de areniscas caracterizadas por la litofacies de areniscas cuarzo-feldespáticas, y presenta gradación a grano más fino. Hacia la cima la sobreyace en contacto erosional la unidad 7 toba E (Pte) que tiene un espesor de 30 cm. Pte, presenta estratificación planar tabular y hacia la cima está en contacto gradacional con la unidad 8 aluvión plio-cuaternario (PQal), que tiene un espesor de 10 m.

IV.2.2.3 El Coloradito Sur.

Esta terraza es la de menor extensión, se ubica al sur de la terraza El Coloradito (Fig. 6). Esta terraza es importante ya que en ésta, aflora la cima de la miembro superior (Pms) en la cota de 60 m.

La base de esta secuencia está compuesta por la unidad de lodolitas cafés (Plc) que en este sitio tiene 15 m de espesor. Esta unidad está compuesta por la litofacies de lodolitas

café y de areniscas cuarzo-feldespáticas. La facies de arenisca presenta rizaduras asimétricas bien desarrolladas, que permitieron estimar la dirección de la corriente en dirección WNW-ESE (Fig. 8). Sobreyaciendo a las lodolitas café (Plc) aflora la toba E (Pte) con un espesor aproximado de 1 m, sin embargo el contacto se encuentra cubierto. Esta secuencia constituye la cima del miembro superior (Pms) (Fig. 7a).

La importancia de esta terraza radica en que su columna estratigráfica permite correlacionar las columnas de Playa Cristina y El Coloradito, debido a que aflora la toba E (Pte) con un espesor intermedio entre Playa Cristina y El Coloradito (1.5 y 0.20 m respectivamente), lo cual indica que la toba E (Pte) se acuña hacia el norte y sugiere que la fuente de este flujo piroclástico se encuentra hacia el sur de la zona de estudio.

La dirección de la paleocorriente en esta secuencia se estimó a N45°W a partir de la orientación de las crestas de las rizaduras medidas en campo. En la figura 8, se presenta la orientación de los valles y crestas de las rizaduras, se considera que la orientación de la corriente es perpendicular (90°) a la orientación de las crestas.

IV.2.3 Características estratigráficas y sedimentológicas en la terraza Playa Cristina

Esta es la terraza de mayor extensión en la zona y se encuentra a la altura del km 55 de la carretera San Felipe-Puertecitos. Cubre un área aproximada de 25 km² y su porción oriental se encuentra a 20 m de la línea de costa. Esta terraza es la de mayor relieve, con alturas de más de 120 m sobre el nivel medio del mar (Fig. 9).

El miembro inferior en esta terraza está constituido solo por la unidad 2 de lodolitas amarillas (Pla), la cual presenta facies de lodolitas y de areniscas grises. La litofacies de areniscas grises presenta estructura masiva y es rica en fósiles de *Encope* sp. y *Turritella* sp.

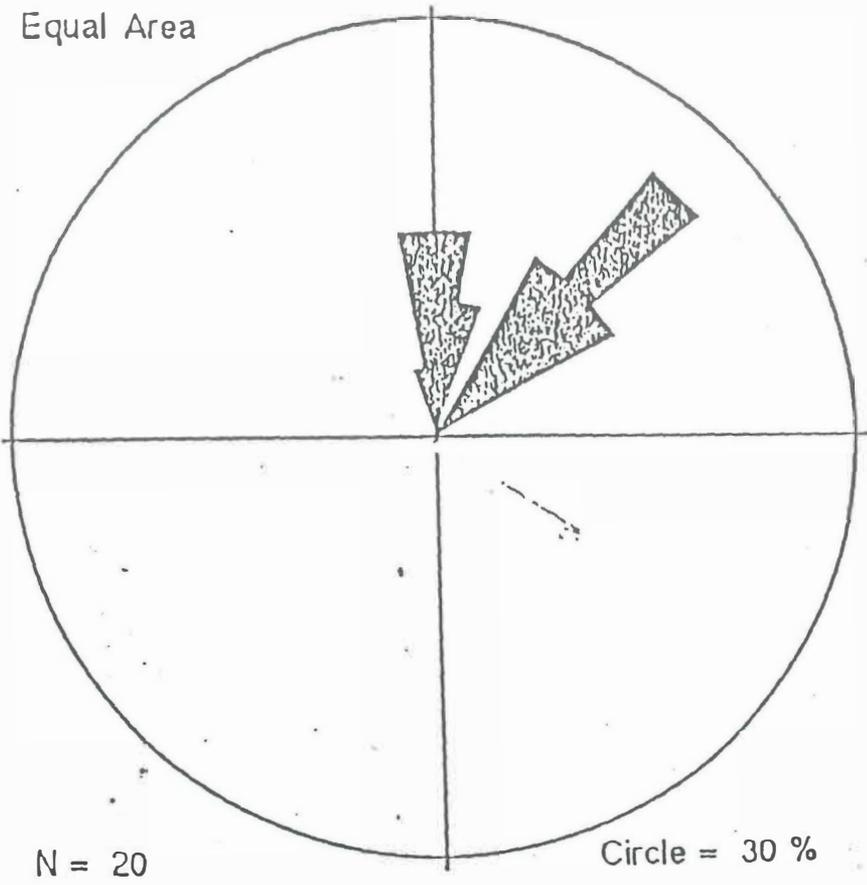


Figura 8. Diagrama de rosa con las orientaciones de las crestas de rizaduras en El Coloradito Sur.

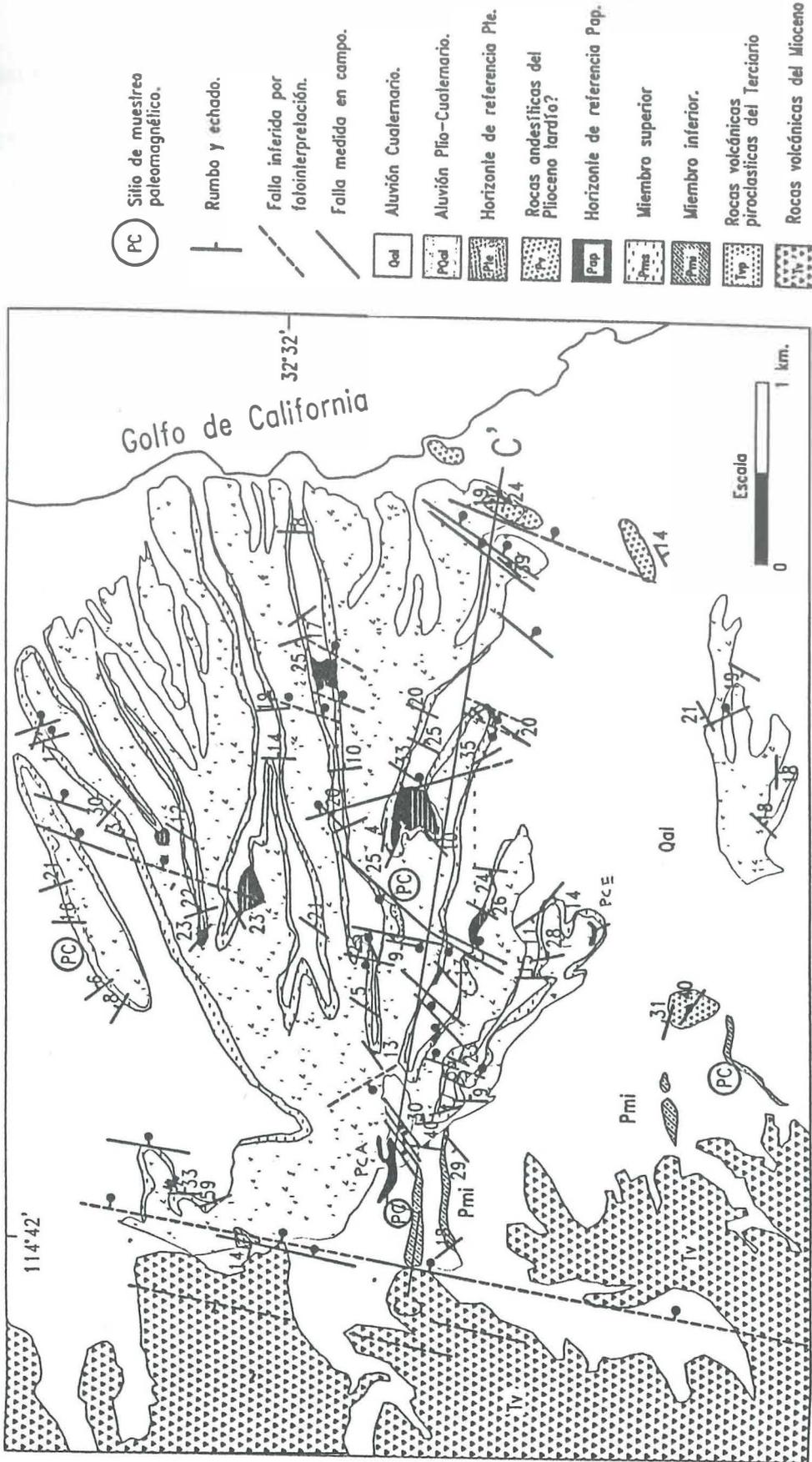


Figura 9. Mapa geológico de detalle de la terraza Playa Cristina.

asi como de otros gasterópodos, el contacto inferior está cubierto y no se pudo estimar el espesor de la unidad 1, ni de las lodolitas amarillas (unidad 2). Tampoco aflora el contacto entre el miembro inferior (Pmi) y el miembro superior (Pms) (Fig. 10). En esta localidad Pms está compuesto (de la base a la cima) por la unidad 6 de conglomerados (Pc), que aflora con un espesor de 7 m. Consiste en una alternancia de areniscas conglomeráticas y conglomerados, que subyacen a la unidad 3 de lodolitas rojas (Plr) de las cuales no se obtuvo el espesor exacto, ya que se encuentra cubierta en ambos extremos de la terraza. Sobreyaciendo a ésta unidad, afloran de nuevo conglomerados (Pc) que consisten en una alternancia de conglomerados y areniscas gruesas compuestas principalmente por fragmentos líticos volcánicos que hacia la cima grada a facies de lodolitas cafés. En contacto erosional, aflora la unidad arenisca pumicítica (Pap), con espesor de 8 m. En esta localidad consiste en un depósito de arena de grano medio, que presenta lentes de pómez tamaño guijarros bien redondeados. Presenta estratificación planar tabular y estratificación cruzada de bajo angulo, asi como estructuras de carga (flamas) y concreciones con carbonato de calcio como cementante. Sobreyaciendo a la arenisca pumicítica (Pap), y en contacto gradacional, aflora un estrato de arenisca conglomerática que posiblemente sea una variación de la litofacies de conglomerado y parte de la unidad subyacente a Pap.

La unidad 5 de lodolitas cafés (Plc) sobreyace a la arenisca conglomerática. La unidad de lodolitas cafés (Plc) tiene un espesor de 45 m, y consiste en una alternancia de lodolitas con areniscas cuarzo-feldespáticas, éstas últimas conservan estructuras primarias que indican una dirección de transporte en dirección NNW-SSE (Fig. 11).

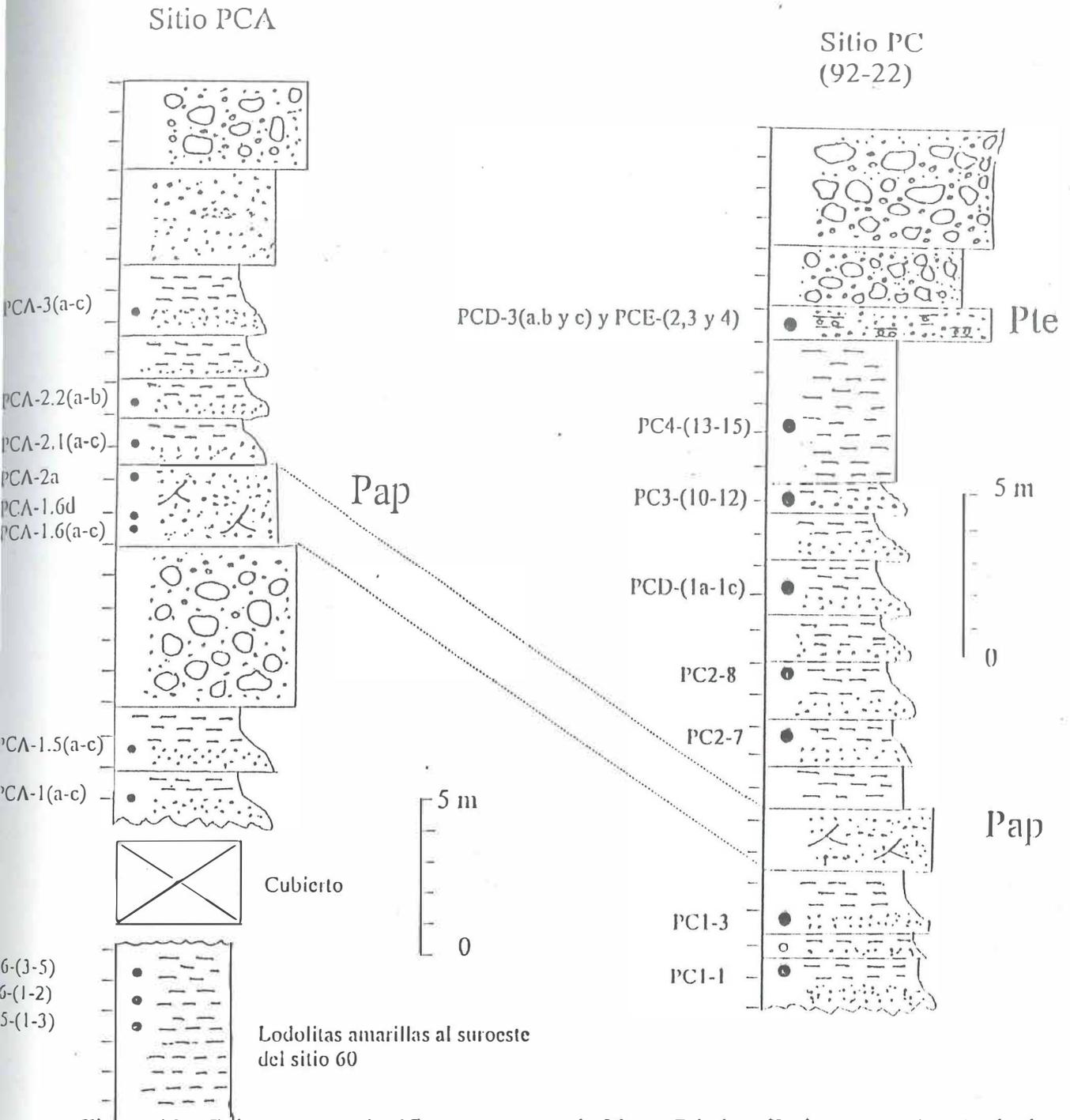


Figura 10. Columna estratigráfica compuesta de Playa Cristina. En la margen izquierda de la columna se indica la posición estratigráfica de las muestras de paleomagnetismo, en la figura 36 se muestra la polaridad, declinación, inclinación y máxima desviación angular de estas muestras. La ubicación de las columnas de muestra en al figura 9.

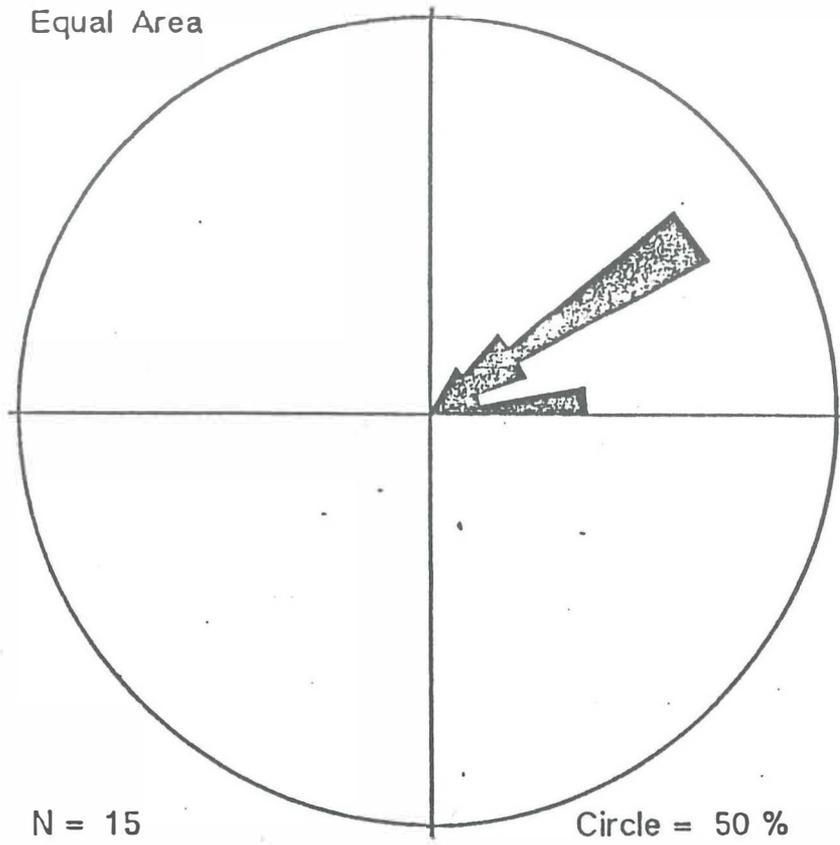


Figura 11. Diagrama de rosa con las orientaciones de las crestas de las rizaduras en Playa Cristina.

Sobreyaciendo a la unidad 5, aflora la toba E (unidad 7), con un espesor de 1.5 m aproximadamente. En esta localidad Pte presenta estratificación planar, con horizontes de gravilla y de cantos rodados de composición escoriacea. La matriz es de cenizas y localmente presenta carbonato de calcio como cementante.

IV.2.4 Correlación estratigráfica.

La correlación estratigráfica está basada en tres unidades principalmente, 1) lodolitas amarillas (Pla), que incluye facies de areniscas grises y de lodolitas amarillas, 2) la arenisca pumicítica (Pap) y 3) la toba E (Pte) (Fig. 12). Esto se debe a que son las únicas unidades que no presentan variaciones de facies laterales drásticas, y solo cambia su espesor. De las tres, solamente la unidad de lodolitas amarillas (Pla) puede correlacionarse entre las tres terrazas (Santa Catarina, El Coloradito, Playa Cristina), ya que la arenisca pumicítica (Pap) y la toba E (Pte) solo afloran en El Coloradito y Playa Cristina.

El resto de las unidades representan variaciones laterales y solo son correlacionables parcialmente.

La unidad de lodolitas cafés (Plc) es correlacionable entre las terrazas Santa Catarina, el Coloradito y Playa Cristina, sin embargo, en El Coloradito esta unidad no está completa, ya que al parecer un horizonte de areniscas conglomeráticas se acuña hacia el norte y no aflora en Santa Catarina o probablemente haya sido erosionada (Fig. 12). Lo mismo sucede con la litofacies de coquina que no aflora en Playa Cristina. En este caso no existen evidencias que sugieran que la coquina haya sido erosionada y posiblemente la unidad se acuña lateralmente.

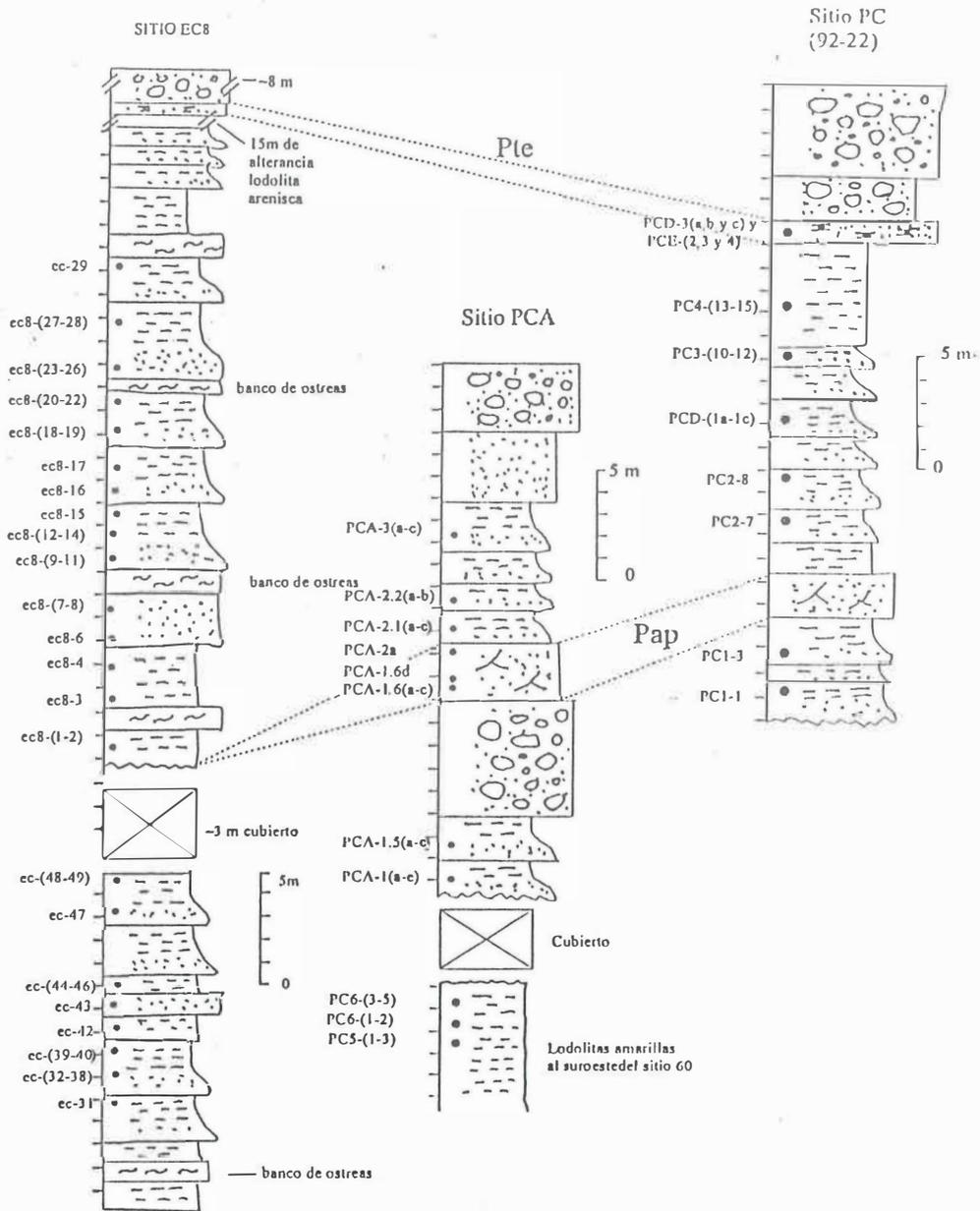


Figura 12. Correlación estratigráfica entre las columnas compuestas de las terrazas: El Colordito y Playa Cristina.

IV.3 Geología Estructural

En la zona de estudio se encontraron dos tipos principales de fallas afectando a la secuencia marina, 1) fallas normales: son las más abundantes y se agrupan en dos familias, una con orientación predominante hacia el NW (Fig. 13a) y la segunda con orientación predominante hacia el NNE (Fig. 13b), 2) Fallas de ángulo alto. Este tipo presenta dos direcciones predominantes una hacia el NW (Fig. 13c) y otra hacia el NE (Fig. 13d).

En las figuras 13a, 13b, 13c y 13d, se observa que estos cuatro grupos de fallas pueden ser consideradas como fallas conjugadas. En los cuatro diagramas se observa que las fallas son aproximadamente paralelas entre sí, los echados son contrarios, y se tiene el control del tiempo. El fallamiento normal en la zona de estudio, solo afecta a la secuencia marina y ninguna afecta al aluvión plio-cuaternario. De la orientación de los planos de falla y la relación angular entre ellas se estimó la posición de los vectores σ_1 , σ_2 y σ_3 , considerando que en fallas normales σ_1 se encuentra $\sim 30^\circ$ del plano de falla y σ_2 y σ_3 son ortogonales a σ_1 (Ramsay y Huber, 1987). Con estas consideraciones se estimó la posición del tensor de esfuerzos, obteniendo dos tensores para la zona de estudio.

En el primero de ellos, σ_1 , se encuentra en la vertical y σ_3 se encuentra sobre la horizontal orientado aproximadamente al NE, con σ_2 en la horizontal orientado hacia el NW. Se asume que este mismo tensor dio origen al fallamiento normal de alto ángulo que se presenta en la figura 13c.

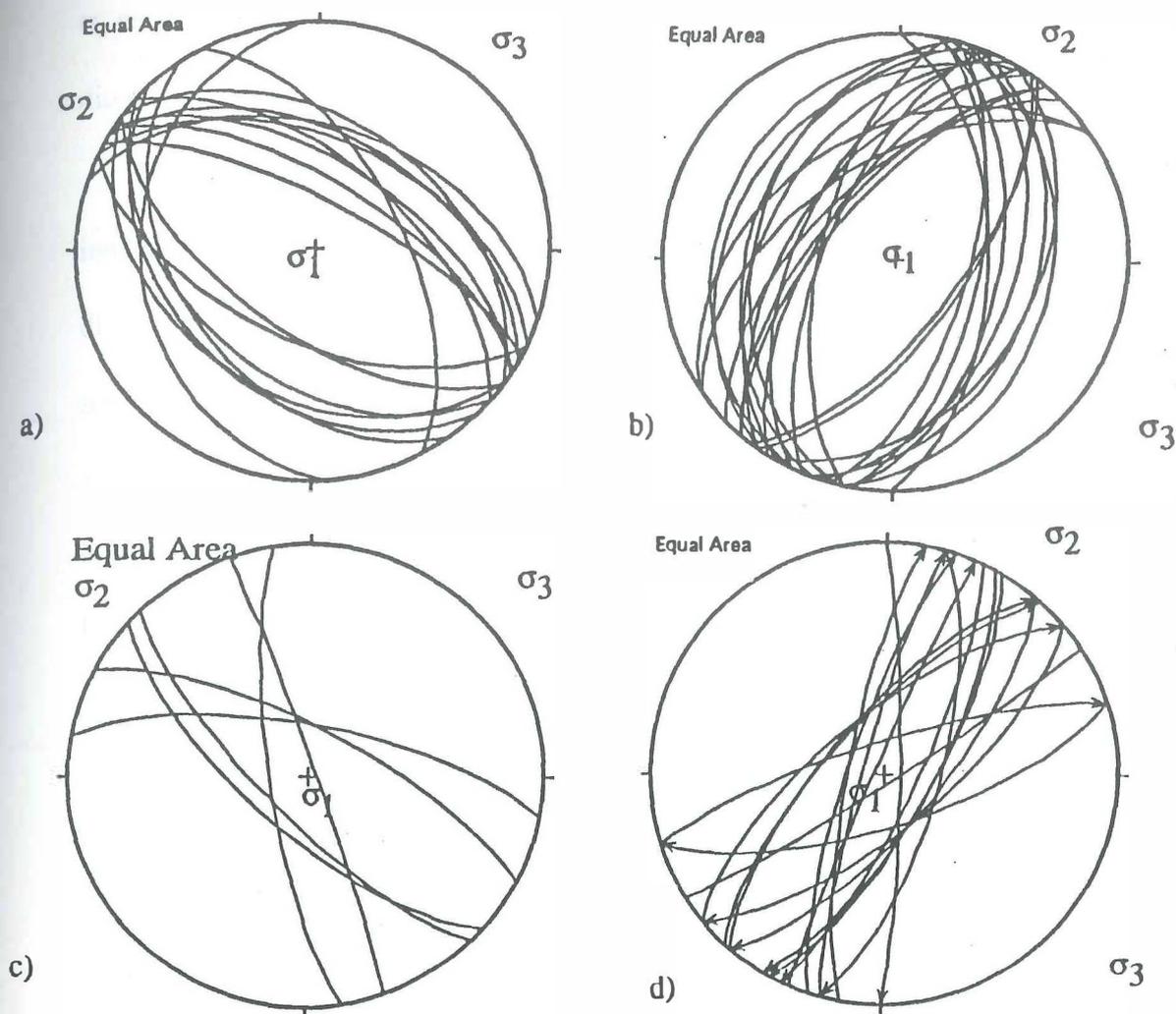


Figura 13. Estimación de la orientación del tensor de esfuerzos. a) Planos de la familia de fallas normales conjugadas con rumbo NW. b) Planos de la familia de fallas normales conjugadas con rumbo NE. c) Planos de la familia de fallas normales conjugadas de echados altos con rumbo NW. d) Planos de la familia de fallas normales conjugadas de echados altos con rumbo NE. En los diagramas se indica la dirección estimada de los vectores de compresión, considerando que: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

El segundo tensor, tiene a σ_1 en la vertical, σ_3 en la horizontal con orientación NW y σ_2 en la horizontal con orientación NNE, así mismo se asume que este campo de esfuerzos dio origen al fallamiento normal de alto ángulo de la figura 13 d.

En la región oeste de la zona de estudio, se cartografiaron algunas fallas con indicadores cinemáticos (estrías). Un primer grupo corresponde a fallamiento normal, con dirección promedio NNE (Fig. 14a), con echados principalmente al oriente (Fig. 14b). El segundo tipo de fallamiento es de desplazamiento lateral. Se obtuvieron datos de 6 fallas cuyo sentido de desplazamiento se infiere como izquierdo, ya que los indicadores cinemáticos (estrías), presentan una leve componente vertical. Considerando el echado de las fallas y la dirección de la componente vertical, se dedujo la dirección del desplazamiento. La orientación promedio de éstas fue hacia el NNE (Fig. 15a) los echados no presentan dirección predominante (Fig. 15b).

IV.3.1 Características estructurales de Terraza Santa Catarina.

La secuencia marina está afectada principalmente por fallas normales con desplazamientos menores de 3 m, con orientación predominante hacia el NE ($\sim 20^\circ$) (Fig. 16a) y echado hacia el oriente principalmente (Fig. 16b).

El miembro inferior está afectado por dos fallas normales con orientación aproximada N20W y echado hacia SW, y la secuencia está basculada 35° hacia el NE aproximadamente, a su vez, este fallamiento parece ser anterior a la depositación del miembro superior ya que Pms sobreyace a Pmi en discordancia angular (Fig. 17).

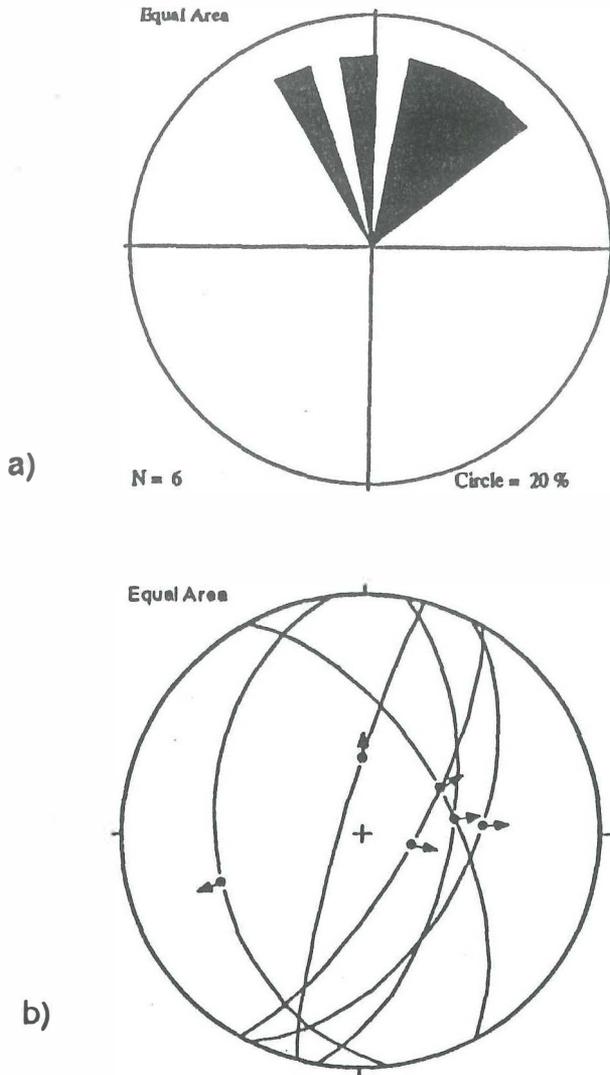


Figura 14. Datos estructurales de las fallas normales en la zona de estudio con indicadores cinemáticos a) Diagrama de rosa mostrando las orientaciones preferenciales de las fallas. b) Red estereográfica con los planos de fallas normales. Las flechas indican la dirección y ángulo de inclinación de las estrias.

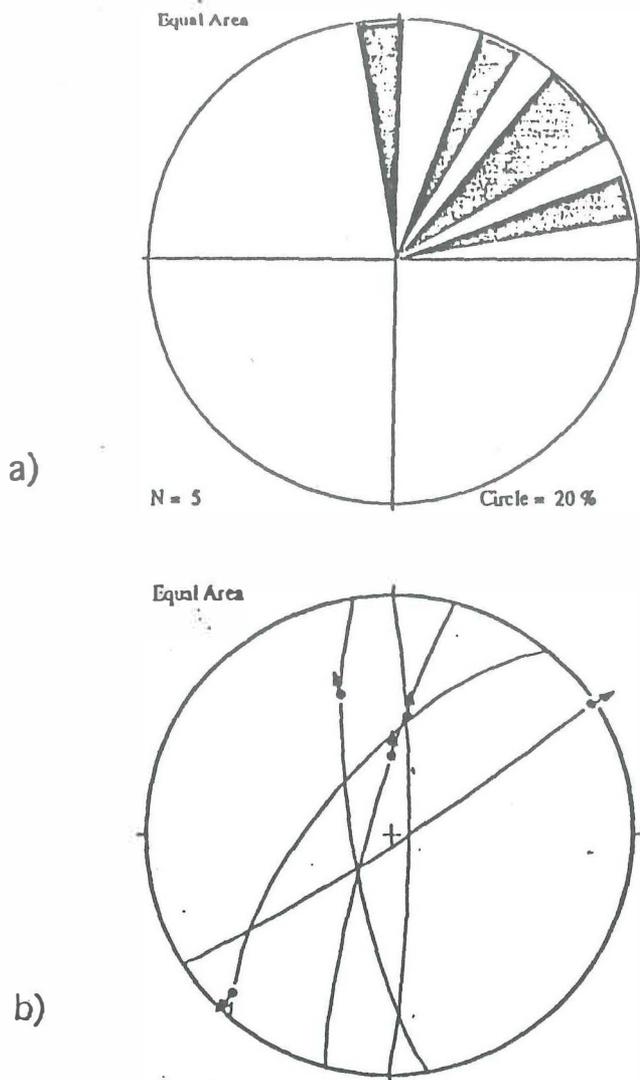


Figura 15. Datos estructurales de las fallas con desplazamiento lateral con indicadores cinemáticos en la zona de estudio a) Diagrama de rosa con las orientaciones del fallamiento la zona de estudio. b) Red estereográfica con los planos de falla.

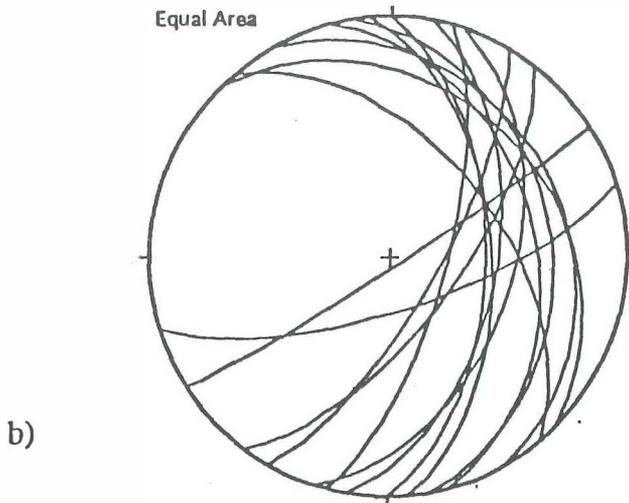
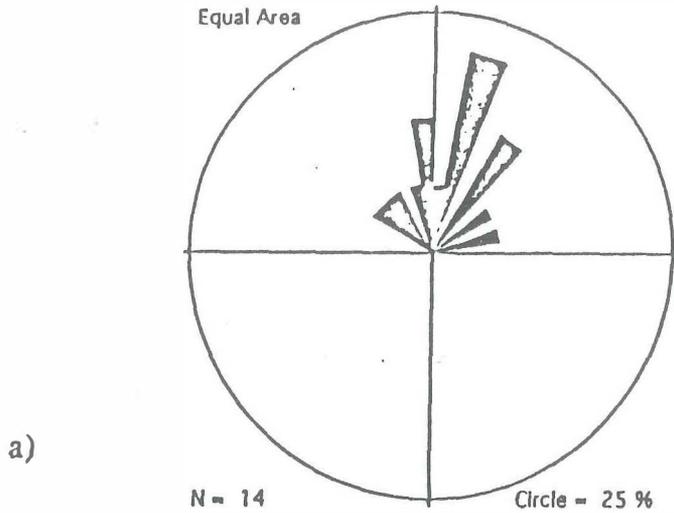


Figura 16. Datos estructurales del fallamiento en la terraza Santa Catarina. a) Diagrama de rosa con las orientaciones de las fallas normales. b) Red estereográfica que muestra el comportamiento de los planos de falla en la terraza.

También se identificaron fallas normales de ángulo bajo (50° en promedio). Este fallamiento presenta dos direcciones preferenciales al NNW y NE, respectivamente (Fig. 18a). La dirección de los echados también presenta dos orientaciones predominantes al WNW y al ESE (Fig. 18b).

IV.3.2 Características estructurales de Terrazas en la zona de El Coloradito.

Debido a que estas terrazas son pequeñas se trataron los datos de manera conjunta. La orientación predominante de las fallas normales es hacia el NE (Fig. 19a), y la dirección del echado es variable (Fig. 19b). Resalta en esta terraza la presencia de fallamiento de desplazamiento lateral con orientación NNE en el extremo sur de la terraza El Coloradito (Fig. 6). Las fallas que conservaron indicadores cinemáticos cortan a las rocas del basamento volcánico y a las rocas graníticas subyacentes. En 3 sitios se observó el contacto por falla entre el basamento volcánico-granítico y la secuencia marina (Fig. 6). Igualmente, en esta terraza se identificó una falla de desplazamiento lateral con rumbo $N40^\circ E/67^\circ NW/10^\circ$. En la fotografía área de la zona, se ubicaron dos lineamientos subparalelos a esta estructura cuyas orientaciones promedio son ENE y NNE (Fig. 6). Estas estructuras aparentemente afectan a la cubierta sedimentaria del Plio-Cuaternario (PQal).

En la terraza El Coloradito se localizaron dos pliegues subparalelos cuyo eje se orienta $N80^\circ E$ (Fig. 6). Estos pliegues de acuerdo a la clasificación de Spencer (1969), consisten en un sinclinal y en un anticlinal. Geométricamente se clasifican como "pliegues suaves": de acuerdo a la clasificación de Ramsay y Huber (1987), la cual se basa en el ángulo interno de los pliegues, que en este caso son de aproximadamente 140° y 160° . Una característica

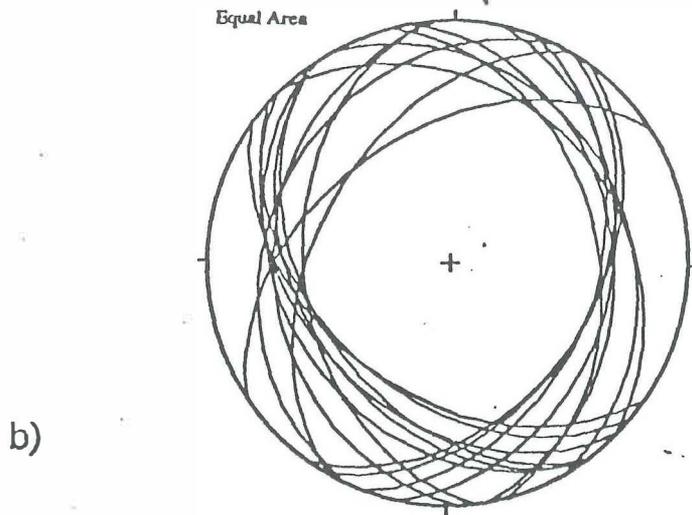
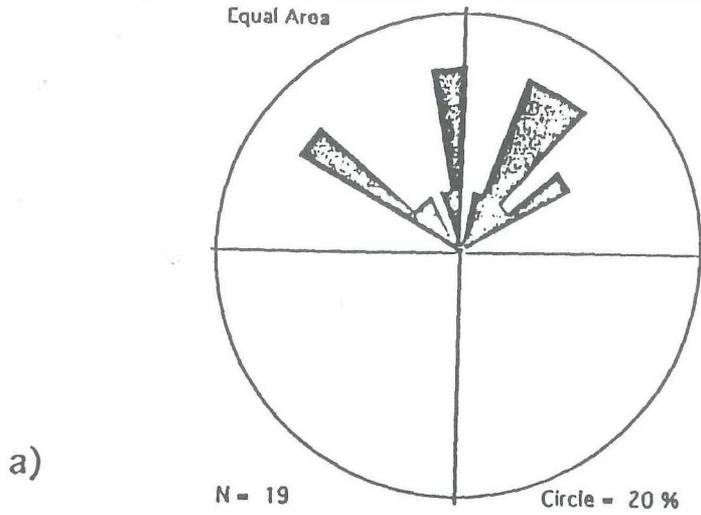


Figura 18. Datos estructurales del fallamiento en la terraza Santa Catarina con echados bajos. a) Diagrama de rosa, mostrando las orientaciones del fallamiento. b) Red estereográfica mostrando el comportamiento de los planos de falla.

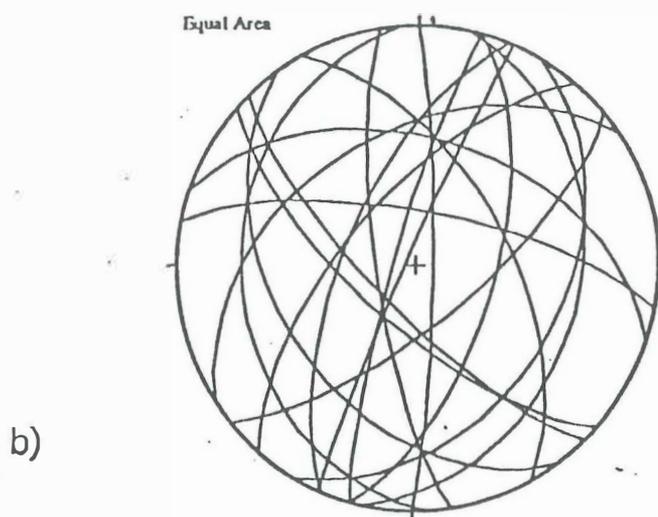
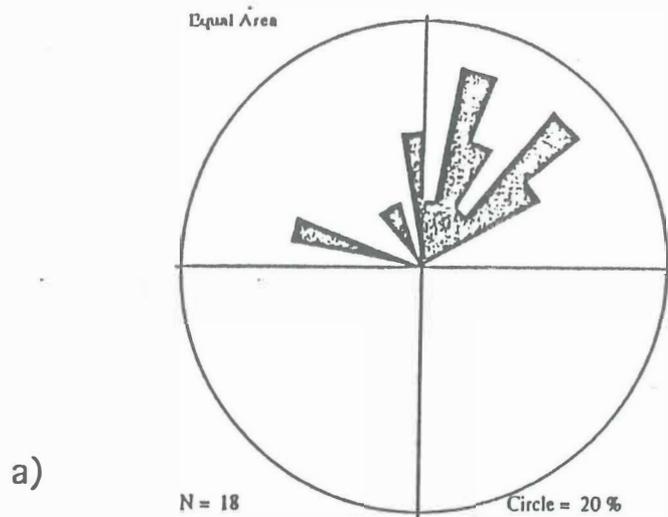


Figura 19. Datos estructurales del fallamiento en la terraza El Coloradito. a) Diagrama de rosa con las orientaciones de las fallas normales. b) Red estereográfica que muestra el comportamiento de los planos de falla en la terraza.

importante de estos pliegues, es que ambos afectan al miembro superior y a la cubierta sedimentaria del Cuaternario (Qal) (Fig. 20).

En la terraza El Coloradito Sur, las fallas normales tienen orientación NNE principalmente, y la secuencia está buzando 12° aproximadamente al W.

IV.3.3 Características estructurales de Terraza Playa Cristina.

Con base en el espesor y las características de los horizontes de referencia (unidades Pap y Pte), se considera tener un buen control en la determinación de la orientación y magnitud del fallamiento en esta terraza. La dirección del fallamiento en esta zona se agrupa en dos direcciones preferenciales al NE y NW, respectivamente (Fig. 21a). La distribución de la dirección de los echados no presenta orientación preferencial (Fig. 21b).

El estilo de deformación en Playa Cristina es principalmente extensional, y utilizando el algoritmo de Wernicke y Burchfiel (1982) con los datos de la sección de la figura 22, y considerando que el promedio de la relación $\theta + \phi \approx 60^\circ$, la extensión calculada es del orden del 16%.

En el extremo occidental se cartografió; en varios puntos, una falla normal con rumbo N10E/59°SE/80°, que pone en contacto riolitas del Mioceno tardío de la Sierra San Fermín con la unidad 2 de lodolitas amarillas de Pmi. Se infirió de las fotografías aéreas que esta estructura continúa a lo largo de 4 km aproximadamente, bordeando el extremo occidental de la terraza. Esta falla se interpreta como la estructura que controla el fallamiento normal en Playa Cristina y todas las fallas cercanas a ésta tienen la misma orientación y echado.

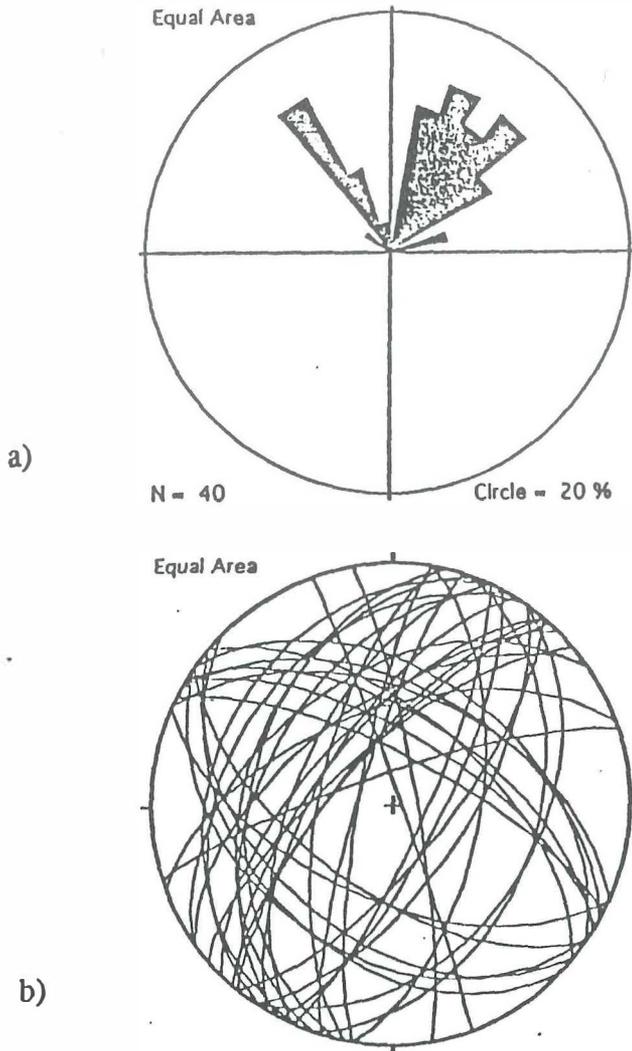


Figura 21. Datos estructurales del fallamiento en la terraza Playa Cristina. a) Diagrama de rosa con las orientaciones de las fallas normales. b) Red estereográfica que muestra el comportamiento de los planos de falla en la terraza.

- Qal Aluvion Cuaternario.
- PQal Aluvion Plio-Cuaternario
- Ptc Horizonte de referencia Pte.
- Pms Miembro superior.
- Pmi Miembro inferior.
- Kgr Rocas graníticas del Cretacico?

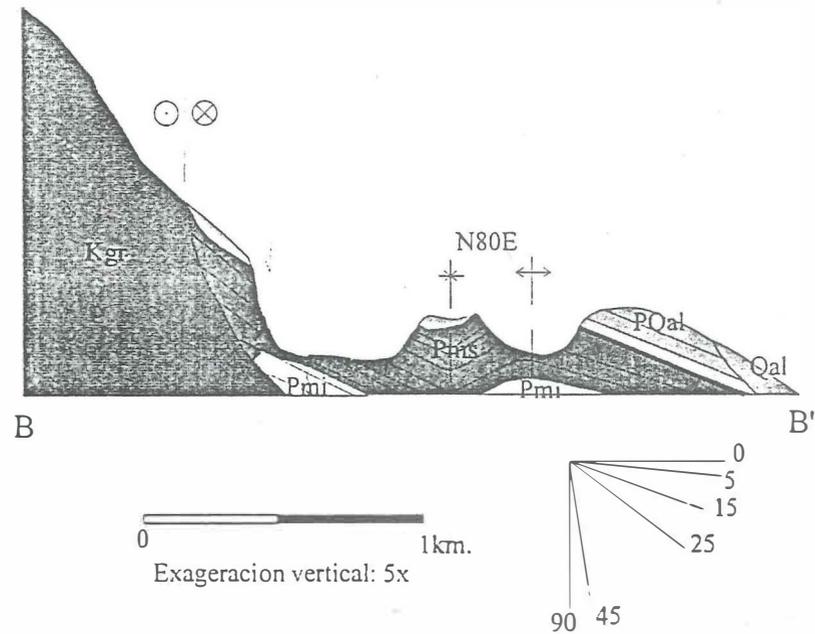


Figura 21. Seccion transversal B-B' en la terraza El Coloradito, con orientacion SO-NE, mostrando las principales estructuras.

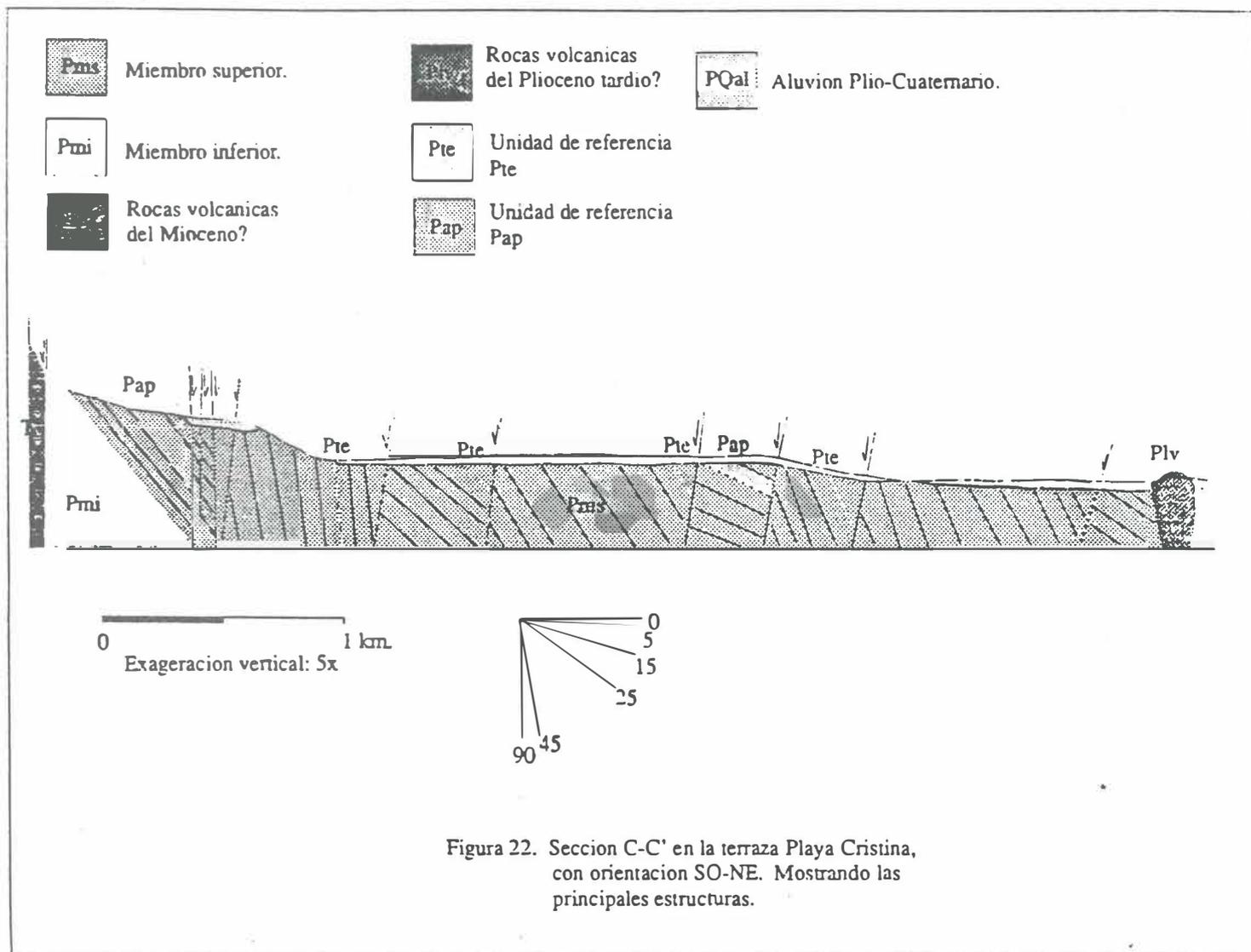


Figura 22. Seccion C-C' en la terraza Playa Cristina, con orientacion SO-NE. Mostrando las principales estructuras.

Hacia el oriente, y alejándose de la falla principal, las fallas comienzan a tener un comportamiento antitético a ésta, buzando hacia el occidente (Fig. 22).

IV.4 Paleomagnetismo.

El estudio paleomagnético se realizó en las localidades El Coloradito y Playa Cristina. En El Coloradito se muestrearon dos sitios (Fig. 6), y en Playa Cristina cuatro sitios (Fig. 9). Se obtuvieron un total de 240 núcleos.

Para calcular la dirección característica y obtener la polaridad de la componente de magnetización primaria, se realizó un ajuste por mínimos cuadrados (Kirschvink, 1980). De estos resultados sólo se utilizaron aquellas muestras en las cuales el ajuste se pudo llevar a cabo con más de 3 puntos y que tuvieron un error de ajuste menor de 10° cuando se ajustaron a una línea, y menor de 15° cuando se ajustaron a un plano (Apéndice 4).

Con los datos de los ajustes por mínimos cuadrados se calculó el paleopolo en ambas localidades. El cálculo del paleopolo consiste, de manera general, en promediar la variación secular del campo magnético en un lapso de tiempo; para ello, se utilizan las distribuciones de Fisher (1953) y Bingham (1968) (citados en: Butler, 1992). El paleopolo, a su vez, fue utilizado para estimar la cantidad de rotación que posiblemente haya tenido la zona. El cálculo se hizo con los algoritmos de Demarest (1983) (Apéndice 1).

El cálculo de un polo virtual consiste a grandes rasgos en promediar la variación secular del campo magnético en un periodo determinado.

El criterio de muestreo se basó en las siguientes hipótesis: en una secuencia marina se asume que la variación secular se registra estratigráficamente, en una secuencia de

sedimentos finos se consideró que la depositación es lenta (5 mm/año), por lo cual se asumió que la variación secular es mínima en un intervalo estratigráfico corto, y para poder obtener un buen registro de la variación secular se debe muestrear un periodo de más de 2000 años. Con estas hipótesis se hizo el muestreo de 1 núcleo por metro.

IV.4.1 El Coloradito.

En esta localidad se muestreó el miembro superior (Pms) que consiste principalmente en lodolitas de la unidad de lodolitas cafés (Plc). El muestreo se realizó obteniendo 1 núcleo por cada metro de espesor.

Con la desmagnetización por campos alternantes (AF) se eliminó principalmente la magnetización secundaria producto del campo magnético actual. En algunos casos, como en las muestras ec-39 a ec-41, la componente normal del campo actual se eliminó entre los pasos AF0 - AF37; en la mayoría de los casos, se eliminó entre los pasos AF0 - AF200. El comportamiento de la señal magnética en esta localidad fue estable durante este intervalo como se observa en los diagramas ortogonales de Zijderveld en las figuras 23 y 24, y en los diagramas de áreas iguales de las figuras 25 y 26. Los núcleos que se obtuvieron de la toba E (Pte) en esta localidad no fueron utilizados en este estudio ya que su comportamiento fue inestable durante toda la trayectoria de desmagnetización (Figs. 27 y 28).

Se determinaron en la secuencia tres eventos de depositación con polaridad inversa y cuatro con polaridad normal (Fig. 29). El evento inverso más estable se presenta hacia la cima de la secuencia de El Coloradito entre los núcleos ec8-9 y ec8-19, que corresponden a la secuencia de lodolitas y areniscas. Este evento representa un intervalo de tiempo de

Zijderveld plot of sample ec-39
 Tilt-corrected coordinates
 All demagnetization steps

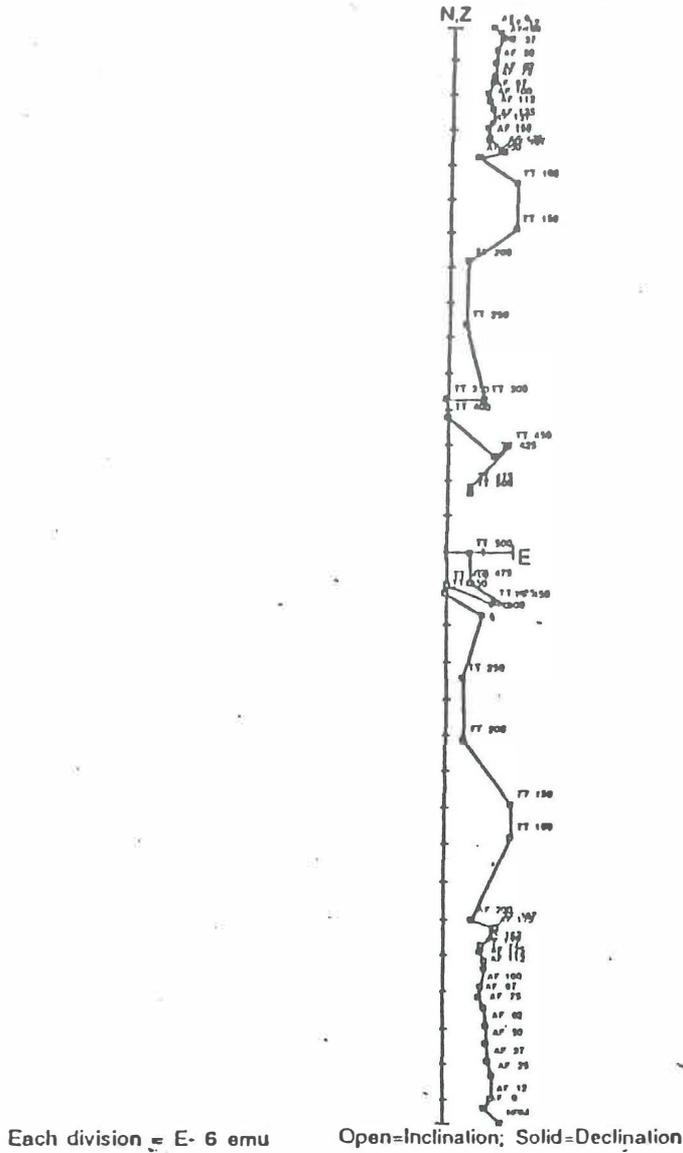


Figura 23. Diagrama ortogonal de Zijderveld, con la trayectoria de desmagnetización de la muestra ec-39. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Este diagrama corresponde a un evento normal, con una trayectoria estable entre los pasos AF 0 a TT 300. Puntos negros = declinación, puntos blancos = inclinación.

Equal Area Plot of Sample ec-39
Tilt-corrected coordinates
All demagnetization steps

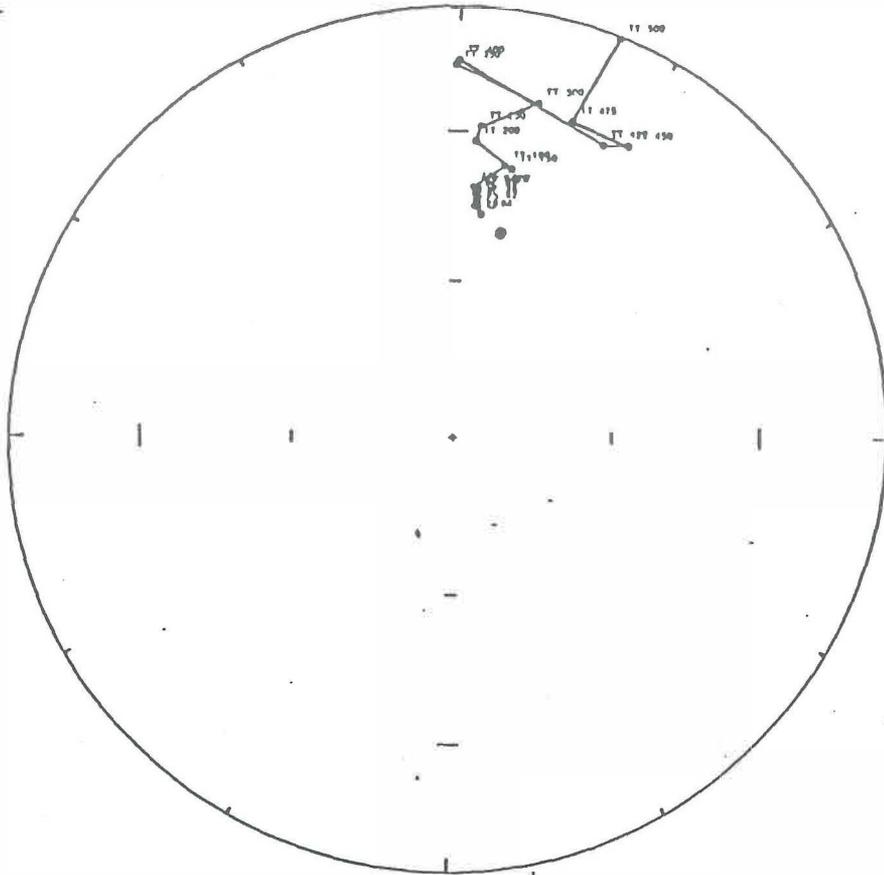


Figura 25. Hemisferio inferior de una red estereográfica mostrando la trayectoria de desmagnetización de la muestra ec-39. AT = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Puntos negros = hemisferio inferior, puntos blancos = hemisferio superior. La posición del polo actual se representa con un círculo achurado.

Equal Area Plot of Sample cc -41
 Tilt-corrected coordinates
 All demagnetization steps

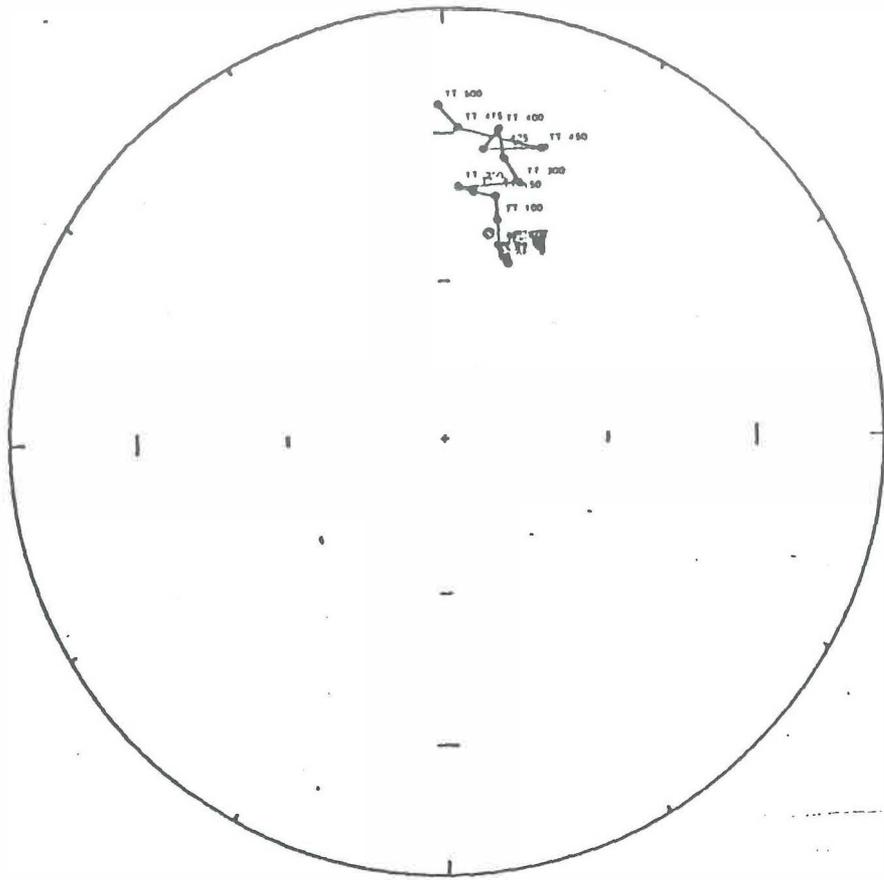
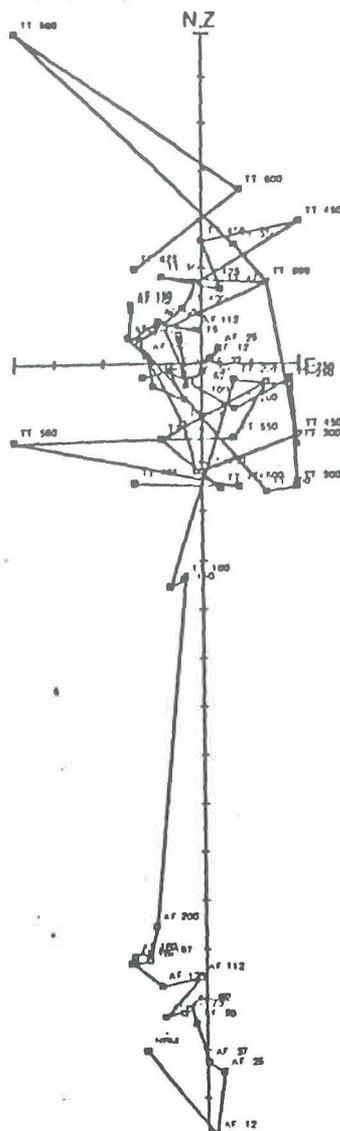


Figura 26. Hemisferio inferior de una red estereográfica mostrando la trayectoria de desmagnetización de la muestra cc-41. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT. TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Puntos negros = hemisferio inferior, puntos blancos = hemisferio superior. La posición del polo magnético actual en la localidad se representa con un círculo achurado

Zijderveld plot of sample ptec -1a
 Tilt-corrected coordinates
 All demagnetization steps



Each division = E- 5 emu Open=Inclination; Solid=Declination

Figura 27. Diagrama ortogonal de Zijderveld, con la trayectoria de desmagnetización de la muestra Ptec. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. La trayectoria de desmagnetización se considera inestable ya que no tiene un comportamiento rectilíneo. Puntos negros = declinación, puntos blancos = inclinación.

Equal Area Plot of Sample p1nc - 1a
Tilt-corrected coordinates
All demagnetization steps

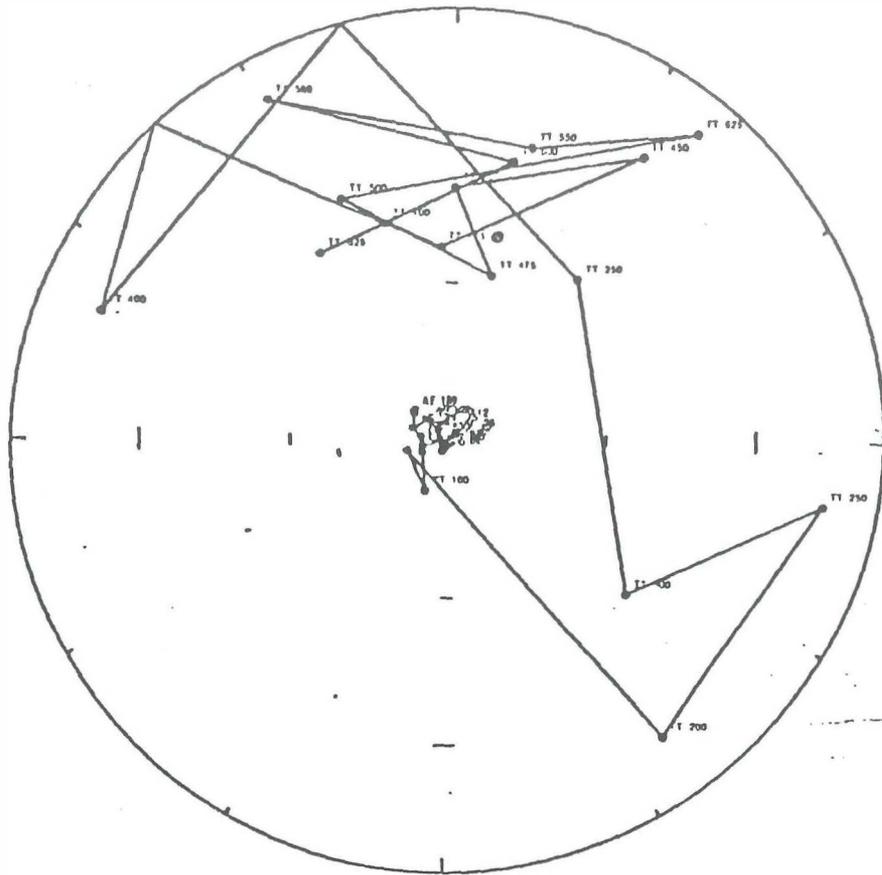
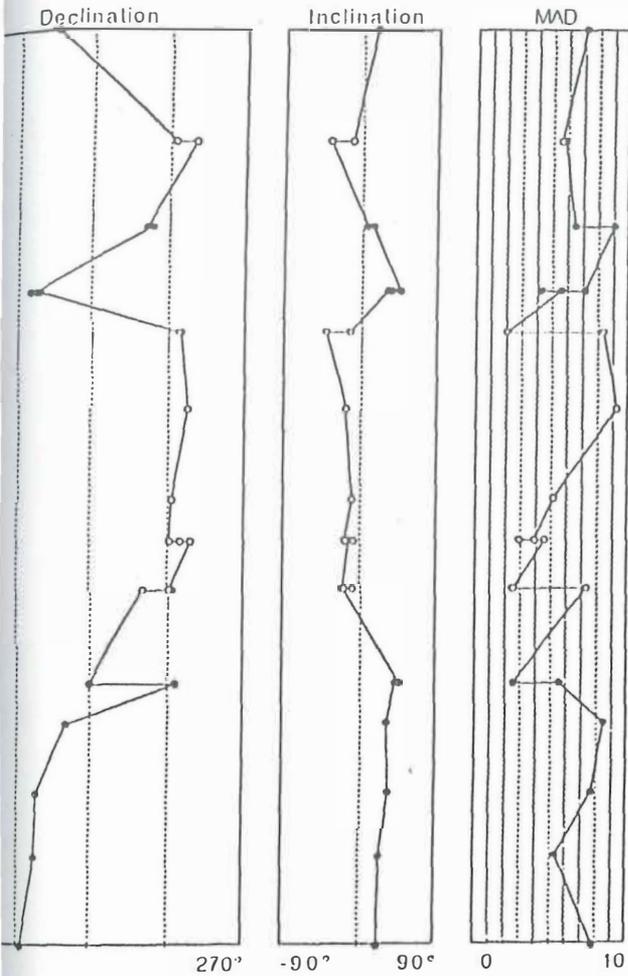


Figura 28. Hemisferio inferior de una red estereográfica mostrando la trayectoria de desmagnetización de la muestra P1nc - Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Puntos negros = hemisferio inferior, puntos blancos = hemisferio superior. La posición del polo magnético actual se representa con un círculo achurado.

Least Squares Strat Plot—EC8
 Secuencia muestreada en el pliegue El Coloradito
 Tilt-corrected coordinates



Least Squares Strat Plot—EC
 Parte Interior de El Coloradito
 Tilt-corrected coordinates

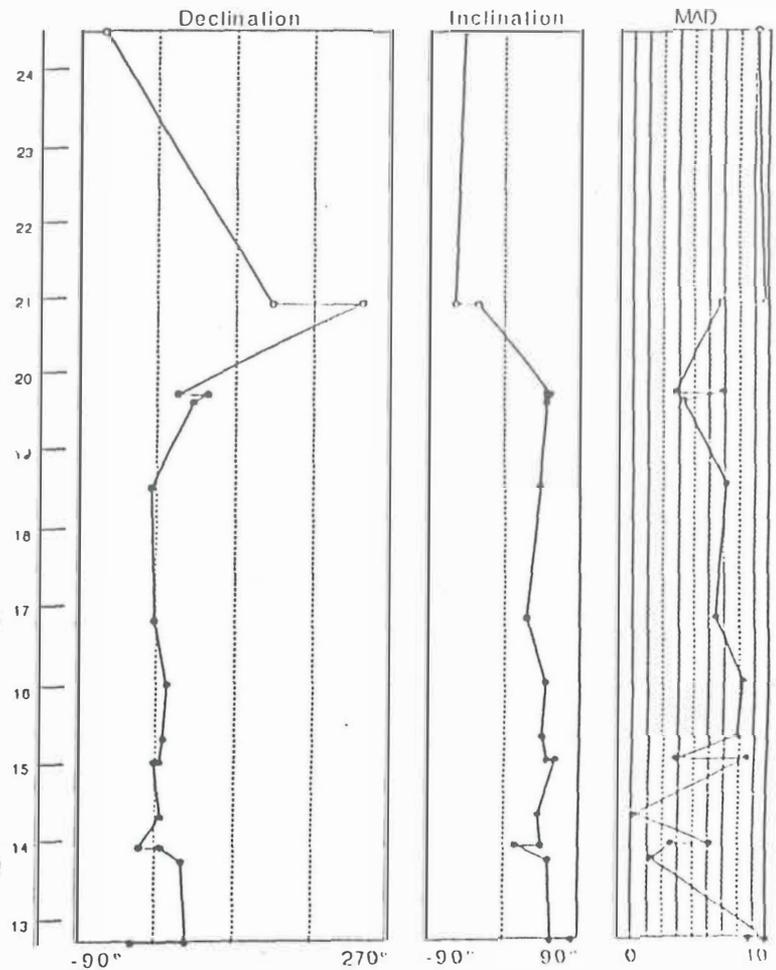


Figura 29. Columna magnetoestratigráfica de El Coloradito. Sitios EC y EC8. Su ubicación se muestra en la figura 6. VGP = polo geomagnético virtual, MAD=Desviación angular máxima. Puntos negros = polaridad normal, puntos blancos = polaridad inversa.

aproximadamente 100,000 años, mientras que el evento normal más estable, se presenta en la base de la secuencia entre los núcleos ec-31 y ec-42, que corresponden a un intervalo de tiempo de aproximadamente 50,000 años.

En la tabla II se presentan los resultados del cálculo de los paleopolos y los parámetros estadísticos. En la figura 30 se muestra el cálculo del polo virtual con las elipses de confianza del 95% para 40 datos, mientras que el polo virtual calculado con 11 datos se muestra en la figura 31. En la tabla III se muestran los resultados de la estimación de rotaciones y sus parámetros estadísticos.

Tabla II- Posición del paleopolo para la localidad El Coloradito.

Estimación	n	Dec.	Inc.	Plat.	Plon.	α_{95}	κ
EC1	11	7.9°	19.1°	68°N	93.3°W	9.3°	22.6
EC2	40	11.8°	34.4°	74.2°N	69.5°W	7.9°	9.2
Polo de referencia para Baja California para el Terciario tardío (Pischke, 1982).	15	2.8°	36.9°	85.3°N	34.4°E	9.3°	18

n = número de muestras utilizadas en el cálculo, Dec = declinación, Inc = Inclinación, Plat = paleolatitud, Plon = Paleolongitud, α_{95} = radio de la elipse de 95% de confianza, κ = razón de dispersión.

Least Squares Equal Area Plot—ECc
 Secuencia muestreada en el pliegue El Coloradito
 Tilt-corrected coordinates

Hemisphere

D= 191.8°, I=-34.4°

VGP: 74.2S, 69.5E

$\kappa = 9.2$, $\alpha_{95} = 7.9^\circ$

N= 40

Bingham line

D= 190.3°, I=-34.9°

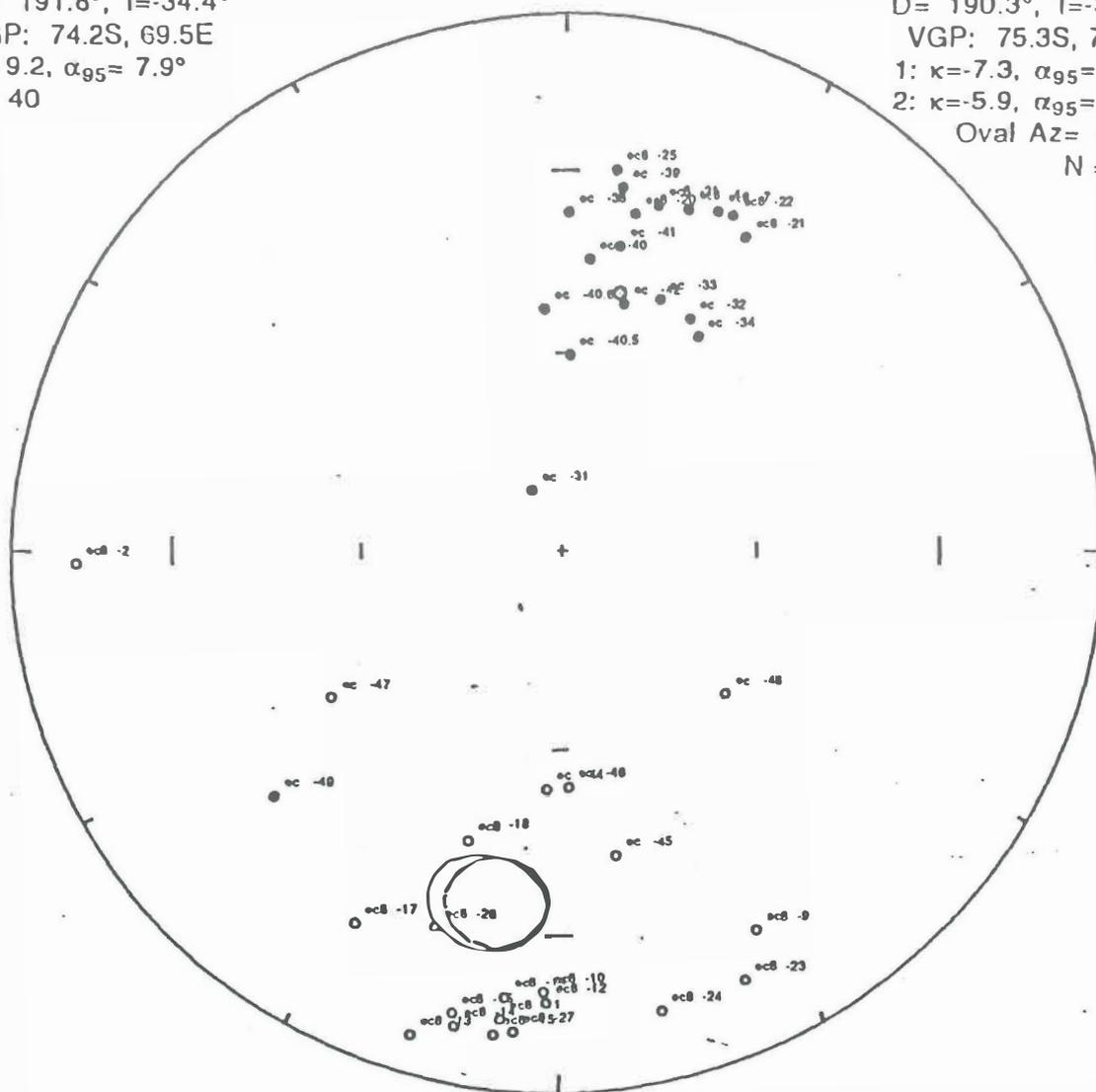
VGP: 75.3S, 72.9E

1: $\kappa = -7.3$, $\alpha_{95} = 6.7^\circ$

2: $\kappa = -5.9$, $\alpha_{95} = 7.6^\circ$

Oval Az= 16.6°

N = 40



-Figura 30. Posición del polo virtual en El Coloradito, declinación e inclinación, mostrando las elipses del 95% de confianza y parámetros estadísticos, mostrando las distribuciones de Fisher y Bingham (citados en Butler, 1992), utilizando 40 datos. Ver texto para explicación.

Least Squares Equal Area Plot--ECc
 Secuencia muestreada en el pliegue El Coloradito
 Tilt-corrected coordinates

Hemisphere

D= 10.9°, I= 50.6°

VGP: 80.6N, 162.9W

$\kappa = 26.3$, $\alpha_{95} = 8.599999^\circ$

N= 11

Bingham line

D= 11.1°, I= 50.3°

VGP: 80.5N, 161.1W

1: $\kappa = -30.4$, $\alpha_{95} = 5.6^\circ$

2: $\kappa = -12.3$, $\alpha_{95} = 9^\circ$

Oval Az= 4.3°

N = 11

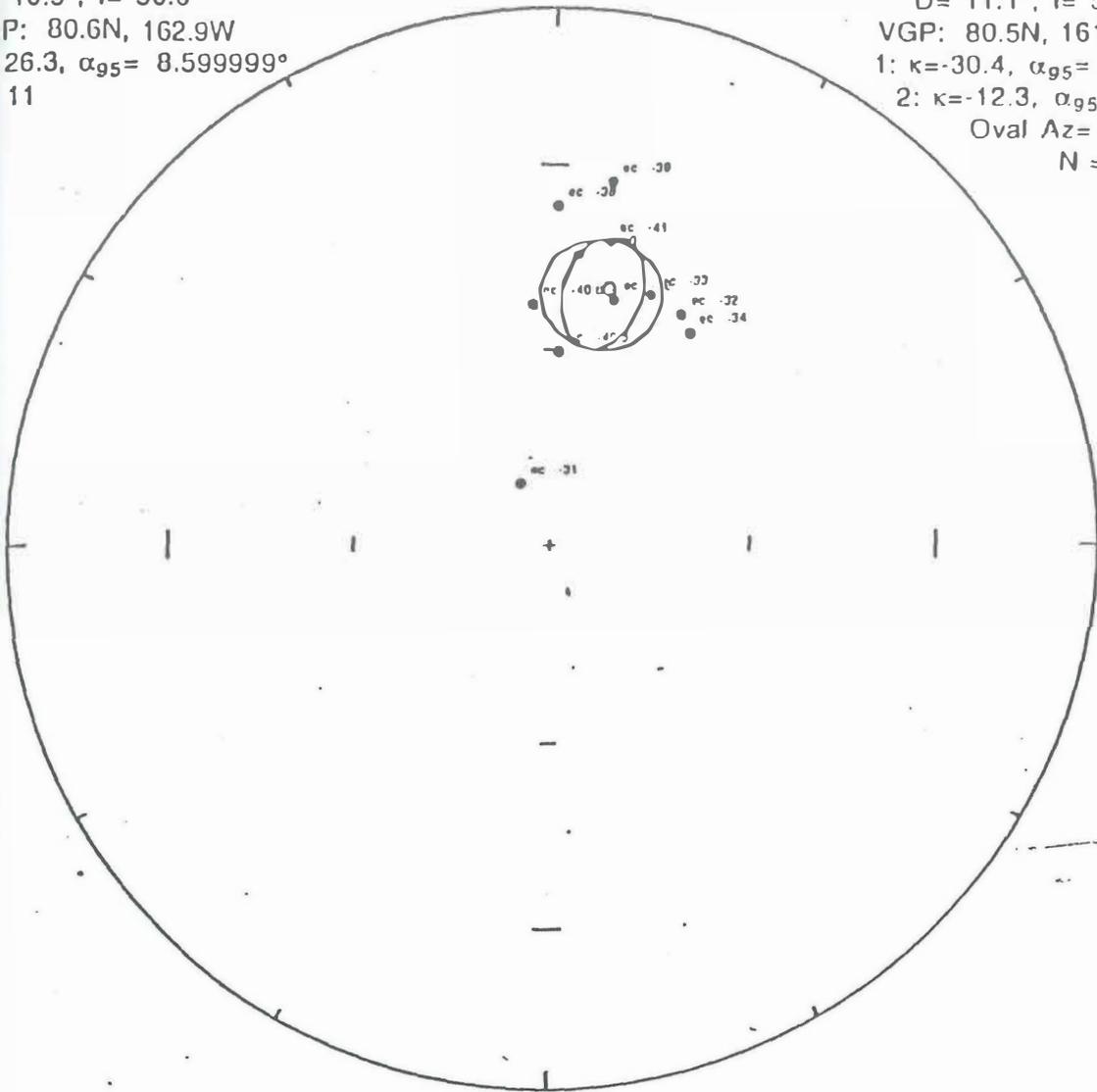


Figura 31. Posición del polo virtual en El Coloradito. declinación e inclinación, mostrando las elipses del 95%, mostrando las distribuciones de Fisher y Bingham (citados en Butler, 1992), utilizando 11 datos. Ver texto para explicación.

Tabla III. Rotación de bloques estimados con mediciones paleomagnéticas en la terraza El Coloradito.

Tipo de rotación	n	Magnitud determinada	Conclusión
Rotación sobre el eje horizontal (Desplazamiento tectónico)	40	$F = 2.5^\circ \pm 7.22^\circ$	Sin efecto tectónico significativo.
Rotación sobre el eje horizontal (Desplazamiento tectónico)	11	$F = 17.8^\circ \pm 8.22^\circ$	Tectónicamente significativo.
Rotación sobre el eje vertical (Fallas de desplazamiento lateral)	40	$R_o = 9.0^\circ \pm 8.04^\circ$	Rotación en el sentido de las manecillas del reloj de 9.0° , rotación menor.
Rotación sobre el eje vertical (Fallas de desplazamiento lateral)	11	$R_o = 5.1^\circ \pm 8.21^\circ$	Rotación en el sentido de las manecillas del reloj de 5.1° , rotación menor.

n = número de muestras usadas en el cálculo, R_o = rotación = $D_o - D_x$ (Demarest, 1983) D_o = declinación observada; D_x = declinación esperada, F = diferencia de inclinación = $I_x - I_o$ (Demarest, 1983), I_x = inclinación esperada; I_o = inclinación observada. Cálculo de los errores: $\Delta R_o = 0.8 \sqrt{\Delta D_o^2 + \Delta D_x^2}$; $\Delta F = 0.8 \sqrt{\Delta I_o^2 + \Delta I_x^2}$ (Demarest, 1983).

IV.4.2 Playa Cristina

En este sitio se muestreó una columna compuesta, que incluye la unidad de lodolitas amarillas (Pmi) y a parte del miembro superior (Pms), con un muestreo más denso de las unidades de referencia; la arenisca pumicítica (Pap) y la toba E (Pte).

Los componentes de magnetización secundaria se eliminaron principalmente con el método de campos alternantes entre los pasos AF 0 y AF 200. En algunas muestras, como pca-2.1a a pca-2.1c, entre los pasos AF 0 y AF 25 se removió una señal normal secundaria como se ve en los diagramas ortogonales de Zijderveld (Figs. 32 y 33). En los diagramas de áreas iguales (Figs. 34 y 35), se observa que el comportamiento estable de la muestra tiende a agrupar los puntos en una misma región, definiendo a este grupo de puntos como un evento normal, ya que los puntos se agrupan en el hemisferio norte y la inclinación permanece en el hemisferio inferior del diagrama.

De manera general, la dirección de magnetización de la señal primaria característica pudo ser estimada a partir de los datos de desmagnetización térmica utilizando el mismo criterio que en las muestras de El Coloradito para la magnetoestratigrafía y para el promedio de la variación secular. Sólo se utilizaron aquellos datos que fueron ajustados con 4 o más puntos y con una desviación angular máxima (MAD) menor de 10° para ajustes a líneas y menor de 15° para ajustes a planos.

La magnetoestratigrafía determinada para la terraza Playa Cristina indica que la secuencia superior muestreada se compone casi exclusivamente por eventos de deposición con polaridad normal, con excepción de un evento inverso en la base de la secuencia que

Zijdeveld plot of sample pca-2.1a
 Geographic coordinates
 All demagnetization steps

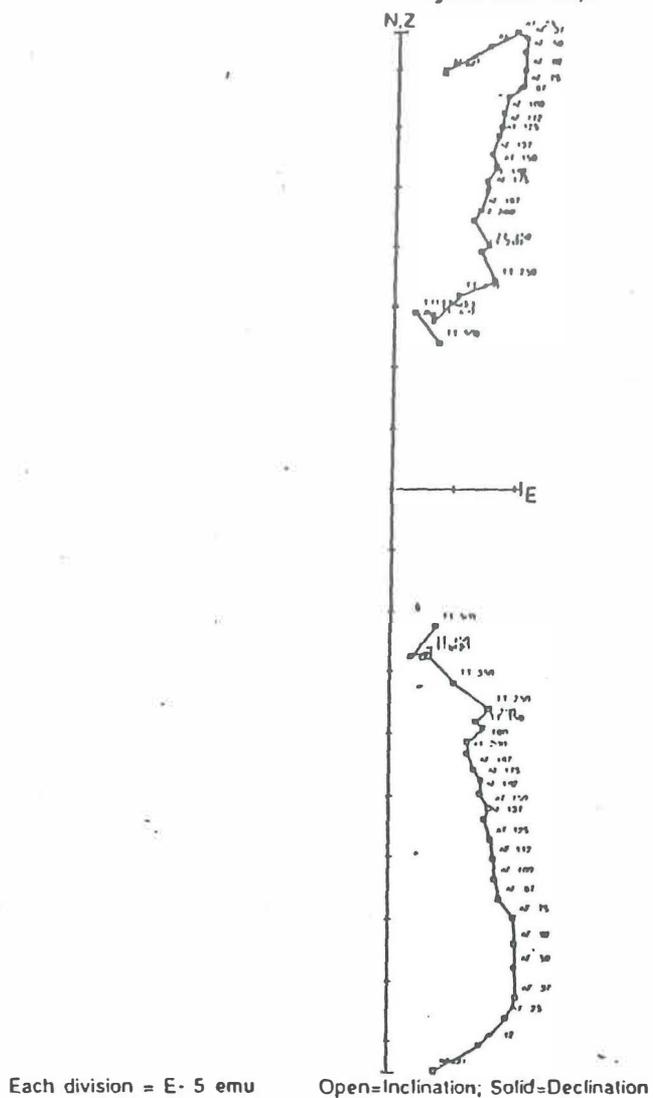


Figura 32. Diagrama ortogonal de Zijdeveld, con la trayectoria de desmagnetización de la muestra pca-2.1a. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT. TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Este corresponde a un evento normal. Puntos negros = declinación, puntos blancos = inclinación.

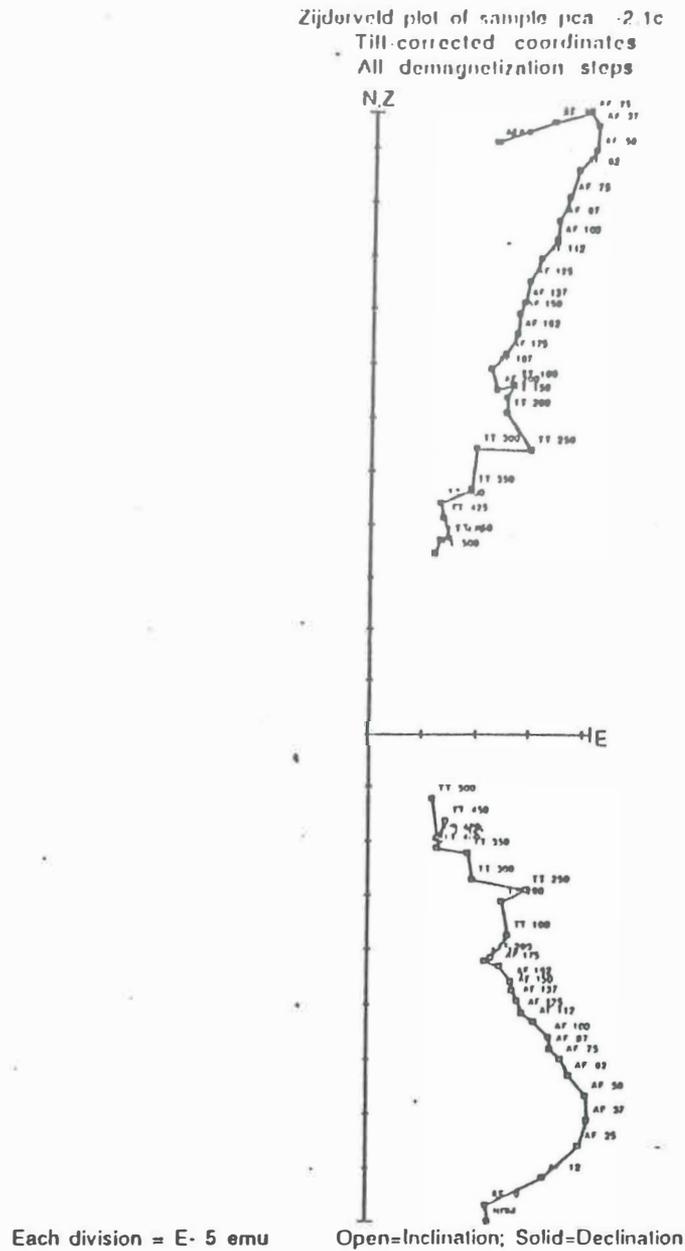


Figura 33. Diagrama ortogonal de Zijdeveld, con la trayectoria de desmagnetización de la muestra pca-2.1c. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT, TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Este corresponde a un evento normal. Puntos negros = declinación, puntos blancos = inclinación.

Equal Area Plot of Sample pca -2.1a
Tilt-corrected coordinates
All demagnetization steps

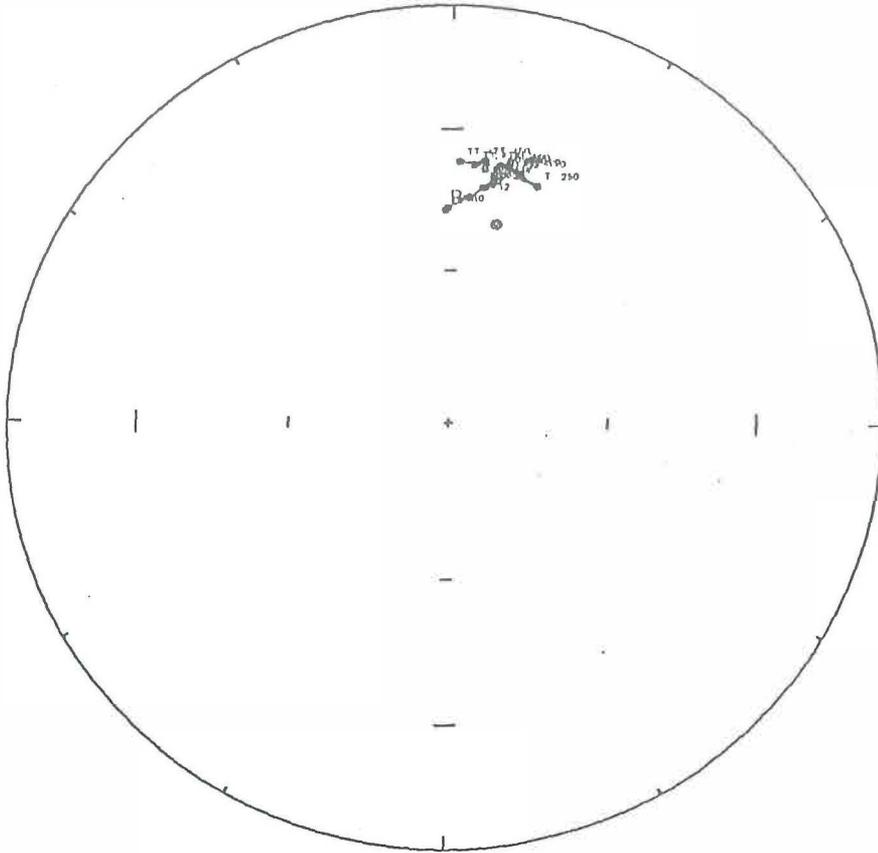


Figura- 34. Hemisferio inferior de una red estereográfica mostrando la trayectoria de desmagnetización de la muestra pca-2.1a. AF = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT; TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Puntos negros = hemisferio inferior; puntos blancos = hemisferio superior.

Equal Area Plot of Sample pea -2.1c
 Geographic coordinates
 All demagnetization steps

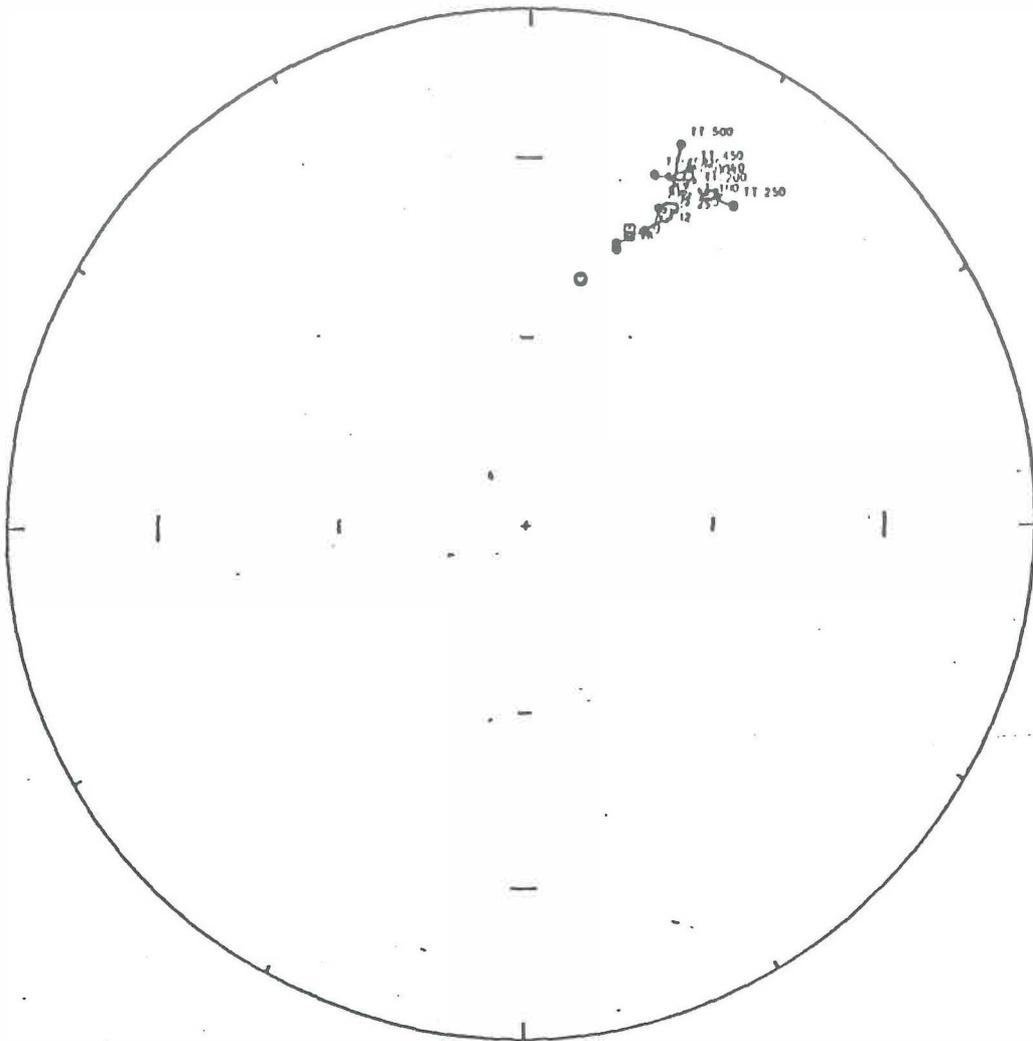


Figura 35. Hemisferio inferior de una red estereográfica mostrando la trayectoria de desmagnetización de la muestra pea-2.1c. Al = Desmagnetización por campos alternantes con su correspondiente valor en mT. TT = desmagnetización térmica con su correspondiente temperatura en °C. Puntos negros = hemisferio inferior, puntos blancos = hemisferio superior.

corresponde a las lodolitas amarillas y otro en la mitad inferior de la secuencia superior (Fig. 36). Más adelante se discuten estos resultados.

Debido a la ausencia de eventos inversos consistentes, no fue posible realizar la correlación magnetoestratigráfica completa entre El Coloradito y Playa Cristina. Sin embargo, la polaridad normal de la arenisca pumicítica (Pap) en esta localidad es consistente y ubica a la secuencia que subyace a esa unidad en ambos sitios en el límite Gauss-Matuyama.

Se calcularon dos polos, para poder realizar comparaciones entre los resultados de acuerdo a su significancia estadística. Como polo de referencia para el Terciario tardío en Baja California se utilizó el polo calculado por Pischke (1982) que ha sido utilizado por otros autores en estudios paleomagnéticos en el sur de la península (Hagstrum *et al.*, 1987; Hausback, 1988). En la tabla IV se presentan los polos calculados, y sus parámetros estadísticos, en la tabla V se muestran la estimación de las rotaciones y sus errores. En la figura 37, se muestran los resultados del cálculo del polo virtual con las elipses de confianza de 95%, utilizando 48 puntos de manera gráfica, mientras que en la figura 38, se muestran los resultados de los mismos cálculos con sólo 21 datos.

Least Squares Strat Plot—PCA
Playa Cristina Seccion A Enero 10/93
Tilt-corrected coordinates

Least Squares Strat Plot—PC1
Continuacion de PCD.
Tilt-corrected coordinates

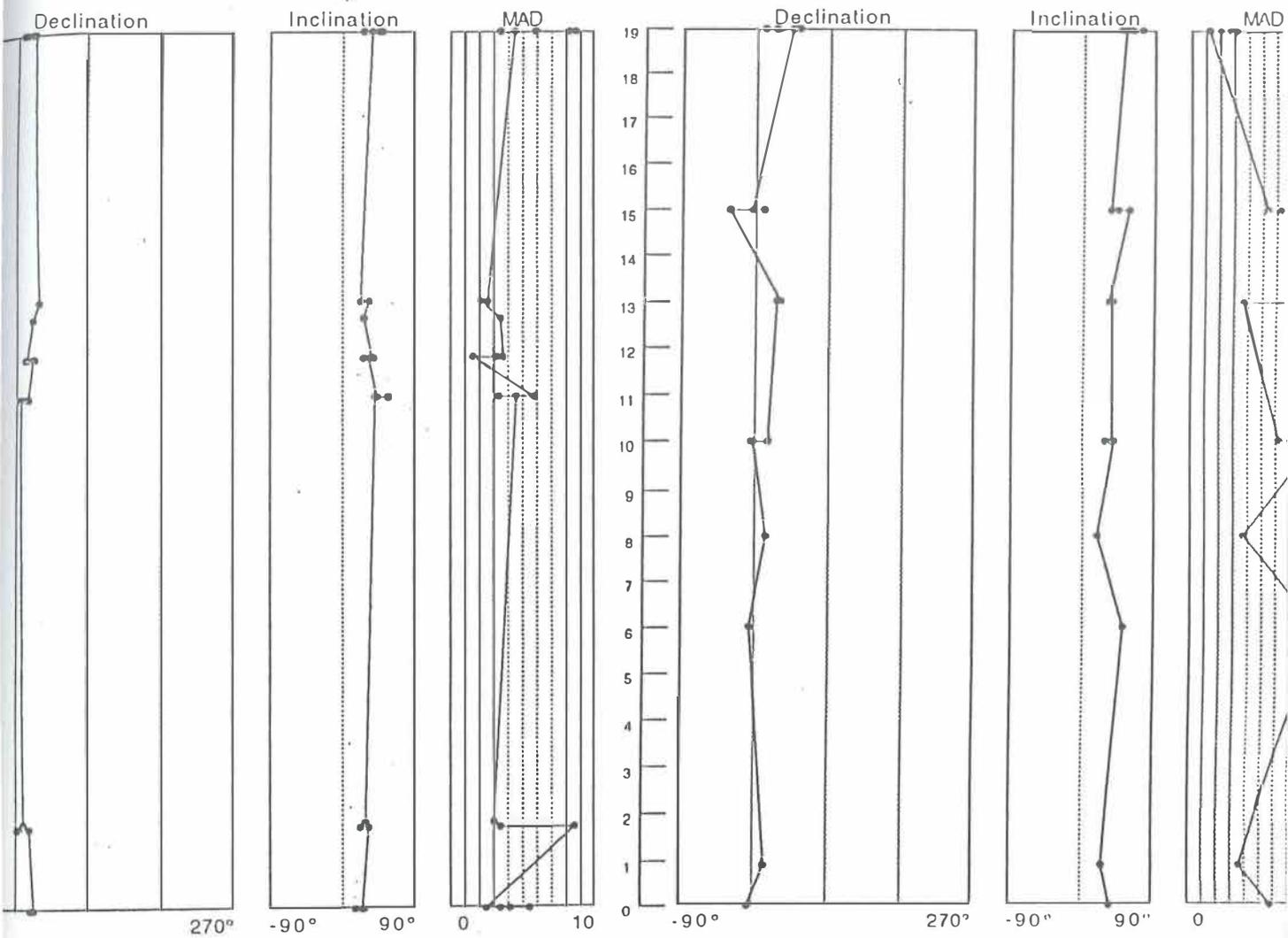


Figura 36. Columna magnetoestratigráfica de Playa Cristina. Sitios, PC, PCA, PCD y PCE, su ubicación se muestra en la figura 9. VGP = pologecomagnético virtual, MAD=Desviación angular máxima. Puntos negros = polaridad normal, puntos blancos = polaridad inversa.

Least Squares Equal Area Plot—pcc
Columna compuesta en Playa Cristina.
Tilt-corrected coordinates

Hemisphere

D= 14.2°, I= 37.5°
VGP: 74.1N, 122W
 $\kappa = 15.6$, $\alpha_{95} = 5.4^\circ$
N= 48

Bingham line

D= 14.5°, I= 36.9°
VGP: 73.6N, 121.4W
1: $\kappa = -13.5$, $\alpha_{95} = 4.2^\circ$
2: $\kappa = -7.2$, $\alpha_{95} = 5.9^\circ$
Oval Az= 179.3°
N = 48

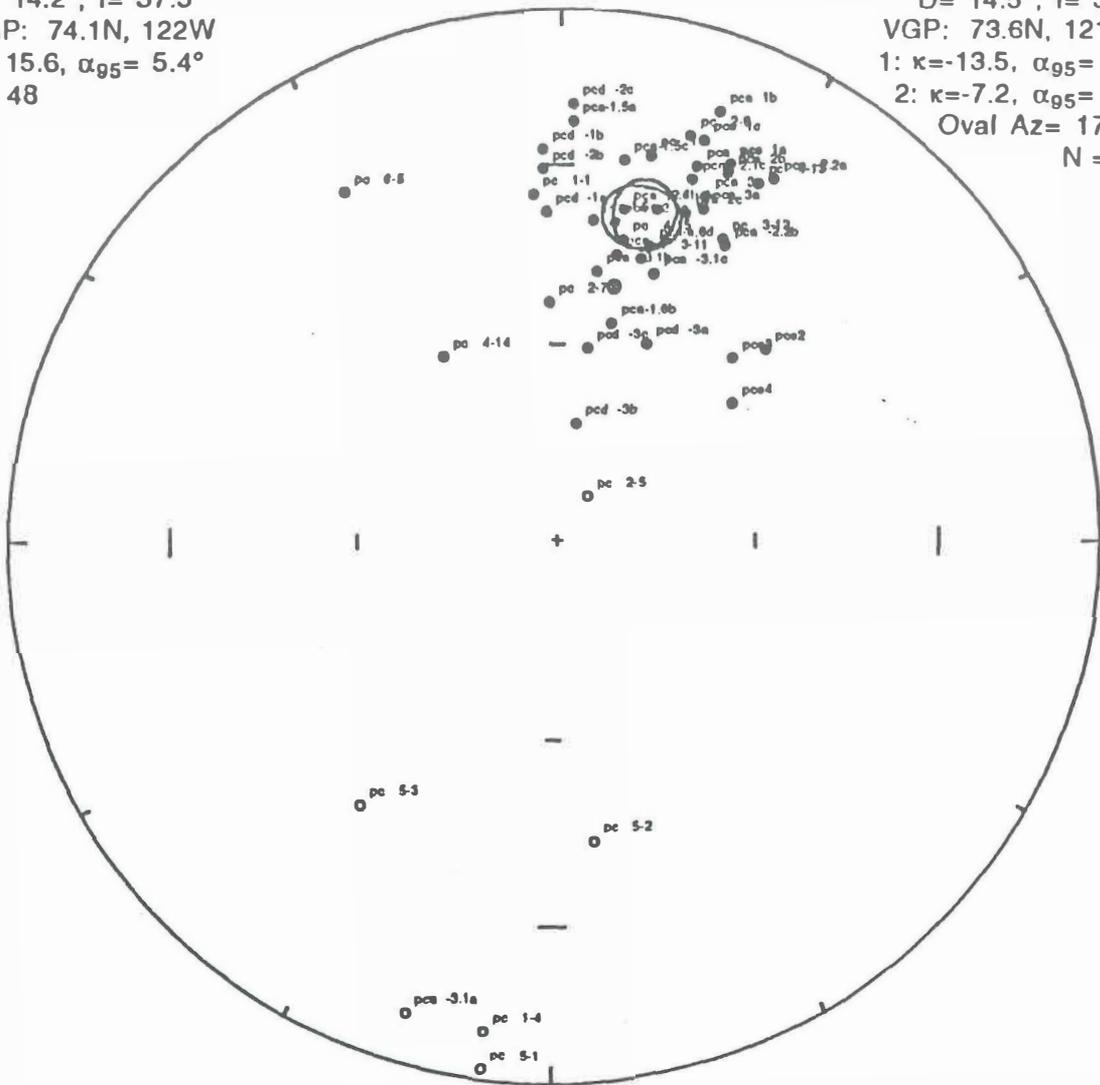


Figura 37. Declinación e inclinación en Playa Cristina, mostrando las elipses del 95% de confianza y parámetros estadísticos, mostrando las distribuciones de Fisher y Bingham (citados en Butler, 1992), utilizando 48 datos. Ver texto para explicación..

Least Squares Equal Area Plot—pcc
 Columna compuesta en Playa Cristina.
 Tilt-corrected coordinates

Hemisphere

D= 13.8°, I= 30.2°
 VGP: 71N, 109.8W
 $\kappa = 47$, $\alpha_{95} = 4.7^\circ$
 N= 21

Bingham line

D= 13.8°, I= 30.2°
 VGP: 70.9N, 109.9W
 1: $\kappa = -33.3$, $\alpha_{95} = 3.9^\circ$
 2: $\kappa = -27.2$, $\alpha_{95} = 4.3^\circ$
 Oval Az= 65°
 N = 21

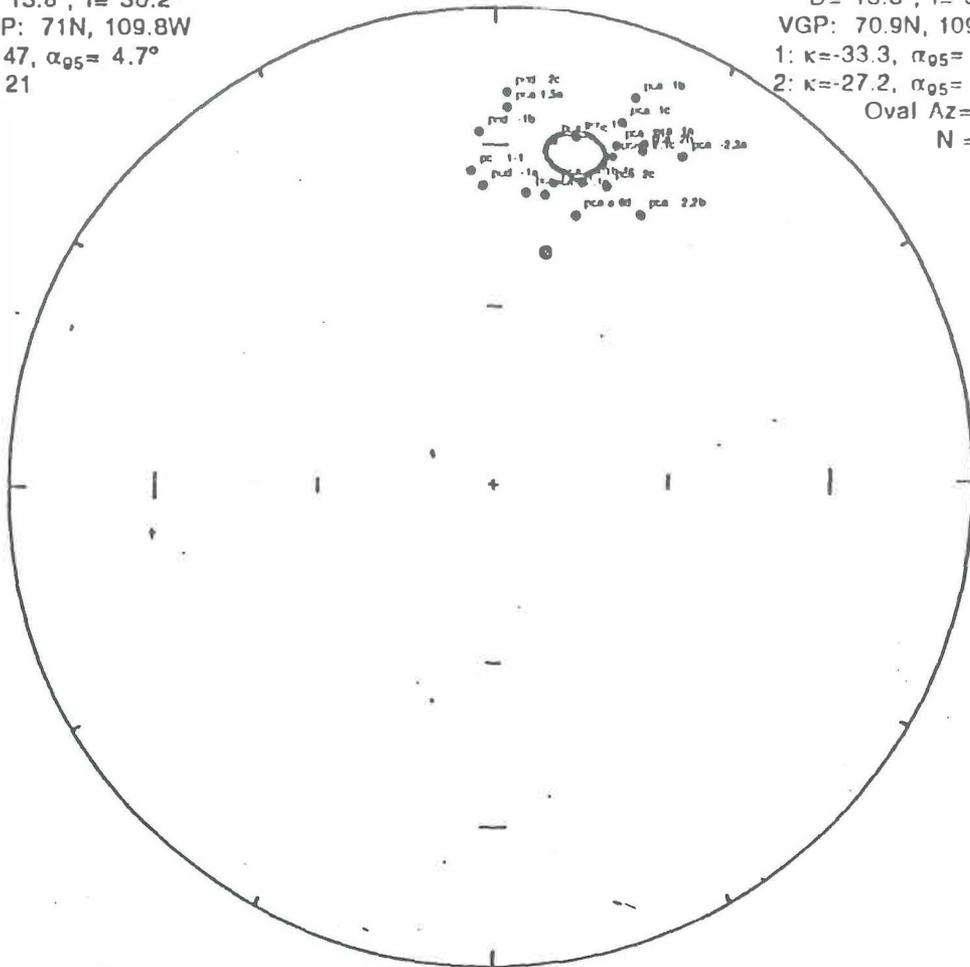


Figura 38. Declinación e inclinación en Playa Cristina, mostrando las elipses del 95% de confianza y parámetros estadísticos, mostrando las distribuciones de Fisher y Bingham (citados en Butler, 1992), utilizando 21 datos. Ver texto para explicación.

Tabla IV. Posición del paleopolo en la localidad Playa Cristina.

Estimación	n	Dec	Inc	Plat.	Plon	α_{95}	κ
PC1	21	13.9°	31.1°	71.5°N	111.4°W	5.1°	39.4
PC2	48	14.2°	37.5°	74.1°N	122°W	5.4°	15.6
Polo de referencia para Baja California para el Terciario tardío. (Pischke, 1982)	15	2.8°	36.9°	85.3°N	34.4°E	9.3°	18

n = número de muestras usadas en el cálculo, Dec = declinación, Inc = Inclinación, Plat= Paleolatitud, Plon = Paleolongitud, α_{95} = radio de la elipse de 95% de confianza, κ = razón de dispersión.

Tabla V. Rotación de bloques estimadas con mediciones paleomagnéticas en la terraza Playa Cristina.

Tipo de rotación	n	Magnitud determinada	Conclusión
Rotación sobre el eje horizontal (Fallas normales)	48	$F = -0.6^\circ \pm 5.56^\circ$	Sin rotación tectónica significativa.
Rotación sobre el eje horizontal (Fallas normales)	21	$F = 5.6^\circ \pm 5.37^\circ$	Sin rotación tectónica significativa.
Rotación sobre el eje vertical (Fallas de desplazamiento lateral)	48	$R_o = 11.4^\circ \pm 6.01^\circ$	Rotación en el sentido de las manecillas del reloj de 11.4° , rotación menor.
Rotación sobre el eje vertical (Fallas de desplazamiento lateral)	21	$R_o = 11.1^\circ \pm 5.39^\circ$	Rotación en el sentido de las manecillas del reloj de 11.1° , rotación menor.

n = número de núcleos usados en el cálculo, R_o = rotación = $D_o - D_x$ (Demarest, 1983) D_o = declinación observada; D_x = declinación esperada, F = diferencia de inclinación = $I_x - I_o$ (Demarest, 1983), I_x = inclinación esperada; I_o , inclinación observada. Cálculo de los errores: $\Delta R_o = 0.8\sqrt{\Delta D_o^2 + \Delta D_x^2}$; $\Delta F = 0.8\sqrt{\Delta I_o^2 + \Delta I_x^2}$ (Demarest, 1983).

IV.4.3 Magnetoestratigrafía:

Se utilizaron dos escalas para la correlación magnetoestratigráfica: la escala geomagnética corregida del tiempo de Mankinen y Dalrymple (1979) y la de Harland y colaboradores (1990), ya que a pesar de que existen escalas más modernas (Cande y Kent, 1992), éstas no tienen suficiente detalle en el periodo que se trabajó en este estudio. Como referencia se usó el evento de polaridad normal registrado en la arenisca pumicítica (Pap) que se correlaciona con una unidad (Ptf) que aflora en el Arroyo Matomí (Stock et al., 1991). Esta unidad fue fechada en 2.5 ± 0.05 Ma ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, hornblenda) (comunicación escrita; Stock, 1993). Ptf fue reportada en la localidad de Arroyo El Canelo, al sur de la zona de estudio por Stock y colaboradores (1991), como una toba retrabajada con clastos tamaño lapilli, interestratificada con conglomerados y depositada en condiciones subaéreas.

Para establecer la correlación, se hizo un conteo por puntos de los fenocristales en una lámina delgada de la arenisca pumicítica (Pap) y de Ptf. Tanto Ptf como Pap, contienen aproximadamente 10% de fenocristales y 90% de matriz vítrea. De este 10% la mineralogía consiste principalmente en plagioclasas y el conteo por puntos se indica en la tabla VI.

Tabla VI.- Distribución mineralógica de Pap y Ptf.

Mineral	Ptf n = 158	Arenisca pumicítica (Pap) n = 134
Clino-piroxeno	4%	4%
Orto-piroxeno	5%	7%
Hornblenda	1%	0%
Biotita	6%	5%
Plagioclasas	84%	84%

n = número de puntos contados.

La diferencia más significativa entre ambas unidades, es que la arenisca pumicítica (Pap) presenta un alto grado de alteración tanto en el vidrio como en las plagioclasas.

Esta correlación ubica a la arenisca pumicítica (Pap) cerca del del límite Gauss-Matuyama tanto en la escala geomagnética de Mankinen y Dalrymple (1979) como en la de Harland y colaboradores (1990); ya que esta unidad tiene polaridad normal (Figs. 39 y 40). El evento inverso que se registra inmediatamente encima del evento "normal Pap", corresponde al evento inverso "X" (2.48 a 2.14 Ma) (Mankinen y Dalrymple; 1979). Los eventos normales registrados en las muestras ec8-4 a ec8-7 y ec-20, 21 y 22, y el evento inverso de ec-9 a ec-19, corresponden al evento Reunión (2.14 a 2.01 Ma) (Mankinen y Dalrymple; 1979). La única diferencia en las escalas utilizadas, es que en la escala de Harland y colaboradores (1990), el evento Reunión se presenta como un solo evento normal con edades de 2.06 y 2.09 Ma (Fig. 40). Con estos resultados se calculó la tasa de sedimentación para el miembro superior, que corresponde en promedio a 5 mm/100 años.

IV.4.4 Cálculo de los errores.

El cálculo de los errores se hizo utilizando las fórmulas de Demarest (1983), quien demostró que los cálculos de los errores hechos en la década de los años sesentas y setentas, estaban sobreestimados en un 25%.

En este caso, los errores estimados (9.3° , 7.22° , 8.04°) se mantienen dentro del rango estadísticamente significativo. La razón de que estos valores sean altos, se debe al rango de error del polo de referencia utilizado (Pischke, 1982), el cual tiene una elipse de confianza del 95%, con un radio de 9.3° , lo que no permite que lo errores estimados bajen, ya que el

algoritmo de Demarest (1983) no pondera los errores, por lo que el error más grande tendrá más peso en el resultado.

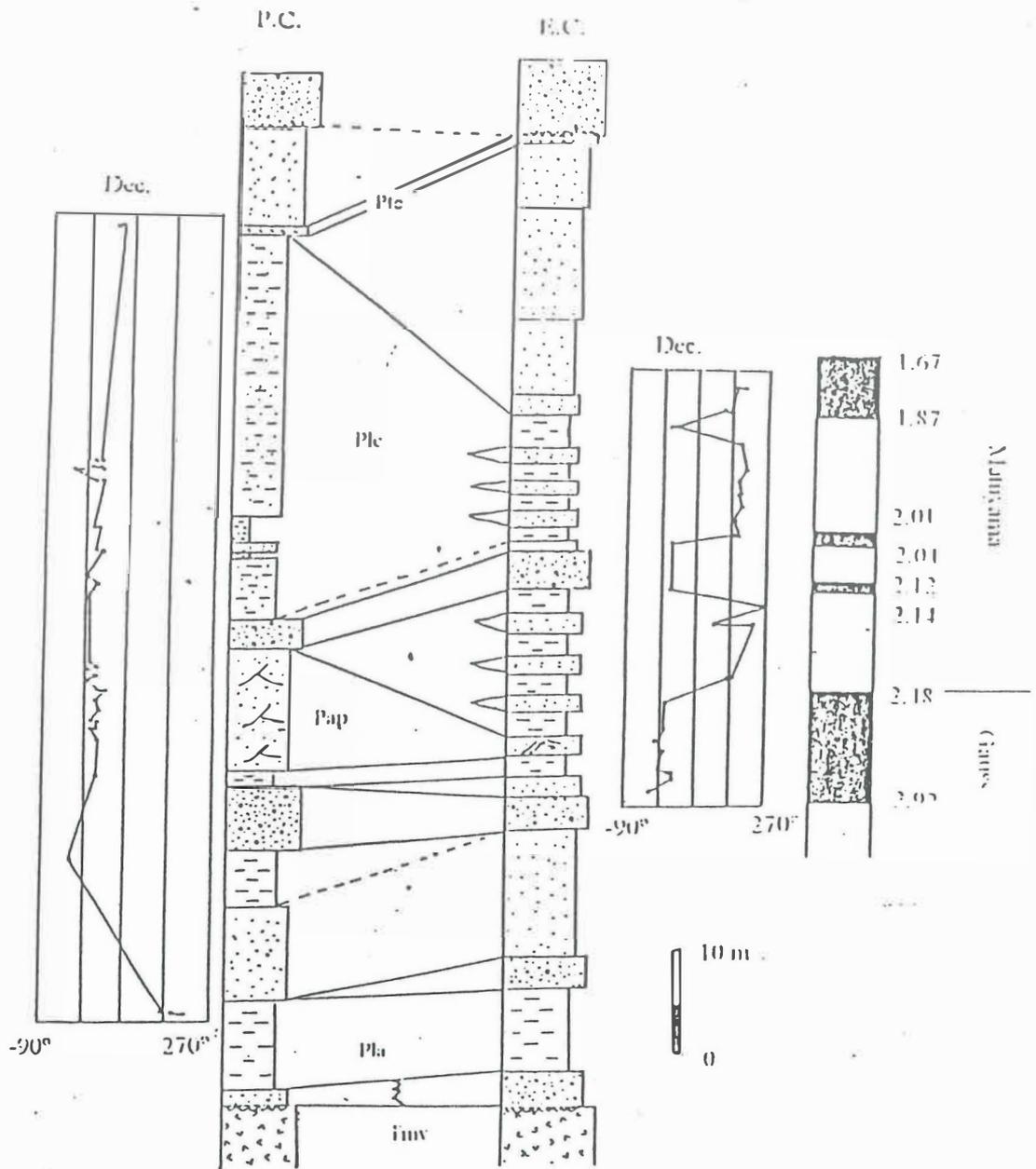


Figura 39. Correlación estratigráfica y magnetoestratigráfica de las localidades El Colorado (E.C.) y Playa Cristina (P.C.), con la escala geomagnética del tiempo, corregida por Mankinen y Dalrymple (1979). Ver texto para explicación.

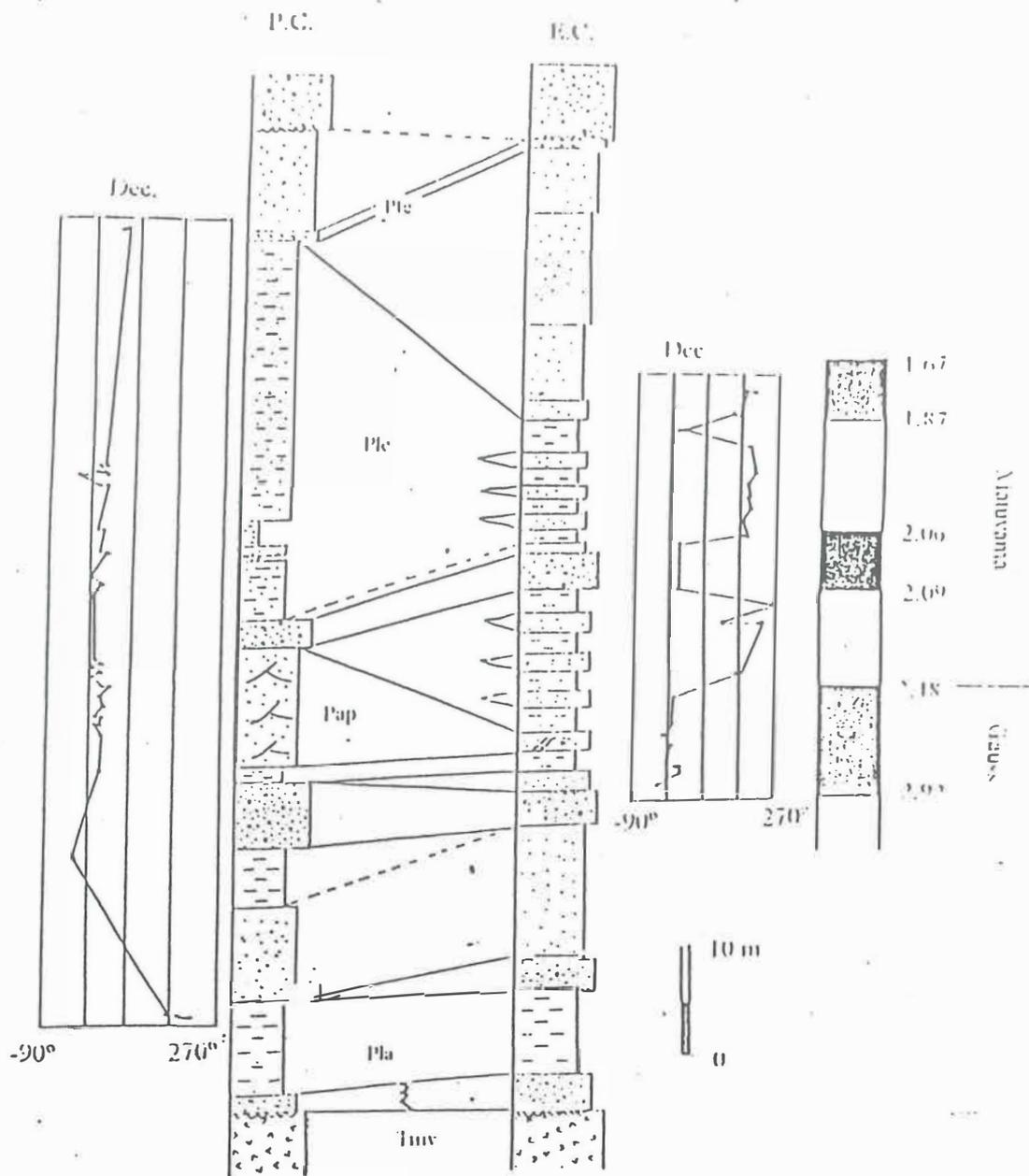


Figura 40. Correlación estratigráfica y magnetoestratigráfica de las localidades El Coloradito (E.C.) y Playa Cristina (P.C.), con la escala geomagnética del tiempo, corregida por Harland y colaboradores (1989). Ver texto para explicación.

V Discusión.

V.1 Estratigrafía y paleoambientes.

V.1.1 Interpretación paleoambiental de la secuencia marina.

Las características sedimentológicas y faunísticas de la secuencia marina al E de la Sierra San Fermín, sugieren que ésta se depositó en un medio ambiente marino de plataforma somera dominada por mareas.

La presencia dominante de lodolitas en la secuencia, que son litologías características de medios ambientes de baja energía, así como la transición lateral de facies, a conglomerados aluviales (litofacies de conglomerados) a depósitos de litoral (litofacies de areniscas grises) y a depósitos de plataforma (lodolitas amarillas), además de la presencia de estructuras primarias (rizaduras, estratificación cruzada), y los fósiles asociados indican que estos depósitos son de ambiente marino somero. Por otro lado, la fauna fósil, da una buena idea del medio ambiente de depositación. La presencia de *Chione* sp. en la litofacies de lodolitas rojas, indica que éstas se depositaron a profundidades máximas de 30 a 40 m (Miguel Téllez, comunicación personal), la presencia de *Encope* sp., *Turritella* sp. sugiere que la litofacies de areniscas grises, se depositaron en un medio marino de supralitoral.

Estas evidencias sugieren que el desarrollo de la cuenca en el área se produjo a lo largo del flanco Este de la Sierra de San Fermín, donde se depositó la secuencia marina, desde el norte de Puertecitos (Rendón-Márquez, 1992), hasta por lo menos, la terraza Santa Catarina.

Teniendo como horizontes de referencia a la arenisca pumicítica (Pap) y a la toba E (Pte), las variaciones litológicas se interpretan como variaciones laterales y relacionadas posiblemente a cambios del medio ambiente de litoral y sublitoral. Desde el ambiente intermareal (litofacies de areniscas) hasta los depósitos de lodolitas los cuales se interpretan como depositados por debajo del nivel de base de ola. Los conglomerados se han interpretado como facies de canal, y están posiblemente relacionados a depósitos aluviales producto de eventos fluviales catastróficos erosivos (tormentas, etc.). Aparentemente este fenómeno tiene implicaciones sedimentológicas más que tectónicas si se considera que la depositación en este caso es progradante y que los depósitos subaéreos se encuentran interestratificados con depósitos marinos. Otra posible explicación sería que estos depósitos subaéreos correspondan a periodos glaciares cuando el nivel del mar disminuyó a escala global. Sin embargo, no se tienen suficientes datos para discutir esta posibilidad. En la terraza El Coloradito, los depósitos de brechas sedimentarias gradúan lateralmente a arenas medias que a su vez gradúan a las areniscas lodosas que componen principalmente al miembro superior. Estas unidades están compuestas básicamente de material volcánico, la gradación lateral a sedimentos finos sugiere cambios en los medios ambientes depositacionales de ambiente subaéreo a ambientes de litoral dominado por mareas a plataforma de inframarea, por debajo de la profundidad de la base de ola de tormenta (15-25 m, Walker, 1984). Los conglomerados interestratificados en la base del miembro superior podrían representar eventos fluviales que depositaron estos sedimentos en canales asociados a sistemas de abanico aluvial que progradaron mar adentro. La presencia de una

matríz de arena gruesa, la mala clasificación en los conglomerados aluviales y el carácter masivo de los mismos, sugieren que este fue el origen de los mismos.

V.1.2 Condiciones paleoambientales de Pms

La interpretación paleoambiental del miembro superior (Pms), se asemeja al modelo depositacional de Reineck y Singh (1975), para una plataforma somera dominada por mareas (Fig. 41). La transición lateral de las facies en dirección E-W corresponde a los diferentes niveles de energía en un ambiente litoral. Una característica importante de este modelo es la presencia de conglomerados, coquinas y areniscas interestratificados con lodolitas bioturbadas. La figura 41 corresponde a una planicie intermareal en el noroeste del Golfo de California. Como se observa, la base del depósito está dominada por lodolitas, graduando a sedimentos de mayor energía debido a la disminución de la profundidad. La presencia de conglomerados, coquinas y areniscas en la secuencia de lodolitas, sugiere la acción de eventos erosivos, como tormentas, depósitos de canal de marea o abanicos aluviales progradantes. Analizando las columnas estratigráficas de las terrazas, notamos que estos eventos se presentaron con cierta regularidad (Figs. 5, 7 y 10), en todos los casos el contacto entre las unidades de lodolitas y conglomerados y/o areniscas, es de tipo erosional.

La tasa de sedimentación calculada con la magnetoestratigrafía para el miembro superior es de aproximadamente 5 mm/100 años. Esta tasa es extremadamente baja, si se compara con la tasa de sedimentación para la cuenca de Vallecito-Fish Creek calculada por Johnson y colaboradores (1983) en alrededor de 5.5 mm/año, es decir, 100 veces superior a la calculada en este trabajo. La erosión posiblemente jugó un papel importante en la

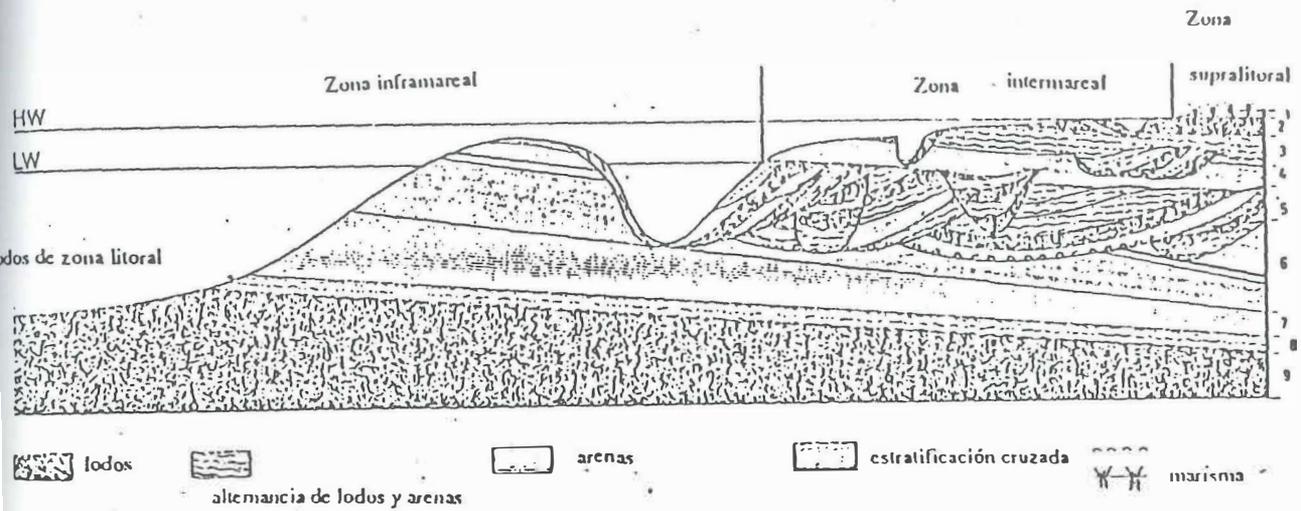


Figura 41. Modelo de deposición para una plataforma somera dominada por mareas. (Tomada de Reineck y Singh, 1975)

disminución del espesor de la secuencia, como sugiere la presencia de unidades de sedimentos de alta energía, en contacto erosional. Los contactos erosivos en la secuencia podrían explicar la tasa de sedimentación extremadamente baja en esta secuencia. Si se considera que la tasa de sedimentación calculada es 100 veces menor que la calculada por Johnson y colaboradores (1983) en la Formación Imperial, en el Valle Imperial, California, E.E.U.U., es posible que el 90% de la secuencia haya sido erosionada o haya tenido períodos largos sin depositación. Sin embargo no existen evidencias que sustenten éste último argumento.

Se debe considerar que la Sierra San Fermín, posiblemente sufrió un levantamiento rápido a partir del Plioceno Tardío como sugieren los afloramientos de rocas graníticas y el cambio de composición litológica del miembro superior (Pms)(Cuevas, 1994), con lo cual la posibilidad de erosión debió aumentar. También se debe considerar que el aporte del delta del Río Colorado en la región de Vallecito-Fish Creek era más importante que el aporte local en la región de Puertecitos, lo cual daría tasas más altas de sedimentación en el norte del Golfo de California. Sin embargo, núcleos recuperados en el Pacífico Ecuatorial, han registrado el mismo lapso de tiempo que la secuencia estudiada en tan sólo 3 m (Butler, 1992). En estudios realizados en San Pedro Valley, Arizona, el mismo lapso de tiempo se registró en aproximadamente 30 m (Butler, 1992) por lo que la tasa de esa zona es similar a la calculada en la zona de estudio. La causa por la que estas secuencias son tan cortas, son atribuidas por Badgley et al. (1986), a períodos de “no depositación”, a lo que denominaron “estratigrafía incompleta”. Un punto importante que apoya la hipótesis del levantamiento

rápido de la la fuente de material a la secuencia, es el cambio en la composición de los sedimentos en la cima de la secuencia. Se ha reportado que en las lodolitas de la litofacies de lodolitas rojas y areniscas del miembro superior, el principal componente de la fracción arcillosa es esmectita (Cuevas, 1994; Rendón-Márquez, 1992), lo que sugiere que en las primeras etapas de depositación de la secuencia, las rocas volcánicas de Sierra de San Fermín eran la principal fuente de sedimentos. Hacia la cima del miembro superior, se observa un incremento en el aporte de material granítico en los conglomerados y areniscas y la presencia de caolinita en las lodolitas y areniscas, lo cual indica que el basamento granítico estuvo expuesto hasta el Plioceno tardío, o que el patrón de drenaje al poniente era distinto, y cambió durante el Plioceno Tardío.

V.2 Geología estructural.

El análisis de las familias de fallas normales y de rumbo sugiere que la deformación obedece a un campo de esfuerzos donde σ_1 se encuentra en la vertical y σ_2 se orienta hacia NNW y al NNE. En las figuras 13c y 13d, se presentan planos de falla con echados altos ($>70^\circ$) que se trataron como fallas normales. Esto último obedece a que no se tienen evidencias suficientes para determinar el sentido de desplazamiento de la fallas. Se interpretaron como fallas normales debido que el patrón de fallamiento que domina en la secuencia marina es de tipo normal y como se discutió anteriormente, probablemente obedecen al levantamiento de la Sierra San Fermín, sin embargo, no se descarta la posibilidad de que estas fallas sean fallas de rumbo con una leve componente vertical, ya que en el campo se observaron desplazamientos verticales tomando como referencia las

unidades estratigráficas. Esta última interpretación no alteraría la interpretación del campo de esfuerzos, ya que en este caso el fallamiento lateral se interpretaría como resultado de la permutación de los vectores σ_1 y σ_2 , los cuales conservarían su azimuth, solo que σ_1 se encontraría en la horizontal y σ_2 en la vertical.

V.2.1 Terraza Santa Catarina

En la terraza Santa Catarina, se reportan dos familias de fallamiento normal. La primera familia presenta echados bajos (25° a 50°), se considera un ángulo bajo comparado con el echado de una falla normal típica que es del orden de 60° a 65° (Neville, 1966). Estas fallas representan el 30% del total en la región. Se plantean dos posibles explicaciones para este fallamiento normal de bajo ángulo. La primera hipótesis es que estas fallas son de origen sinsedimentario, por lo tanto éstas deben presentar características particulares como: inyección de material sedimentario en el plano de falla y ligeros plegamientos de las unidades afalladas cerca del plano de falla. En las observaciones de campo sólo se detectaron plegamientos adyacentes al plano de falla. La segunda hipótesis, es que estas fallas sufrieron rotación sobre el eje horizontal. El miembro inferior en esta zona está buzando en promedio 35° hacia el occidente, se asume que el fallamiento normal que afecta al miembro inferior es anterior al fallamiento normal que bascula la secuencia. En este caso, los planos de falla tendrían que ser rotados la misma magnitud en sentido contrario para realizar la corrección estructural. La evidencia que apoya esta hipótesis es que, el fallamiento normal de bajo ángulo solo afecta al miembro inferior (Pmi), mientras

que las fallas de ángulo alto que volcaron al miembro inferior también afectan al miembro superior (Pms) en esta terraza (Fig. 17).

V.2.2 Terrazas de la zona de El Coloradito

En esta terraza existen evidencias estructurales que indican que la deformación es reciente o que incluso continúa activa. En El Coloradito una falla de desplazamiento lateral izquierdo ($N40^{\circ}E/67^{\circ}NW/10^{\circ}$) y un sinclinal cuyo eje se orienta $N80^{\circ}E$, afectan o deforman la cubierta sedimentaria del Plio-Cuaternario (Fig. 6). Además, en fotografías aéreas se identificaron dos lineamientos subparalelos a la falla de rumbo NE que también afectan la cubierta sedimentaria del Cuaternario (Qal). En el campo se identificaron rasgos morfológicos (bordes en la cubierta sedimentaria del Cuaternario) que sugieren que esta estructura es una falla activa. Otros autores también reportan estas estructuras como evidencias de fallamiento activo en la misma zona (Lewis, 1994).

V.2.3 Terraza Playa Cristina.

El contacto entre la secuencia marina y el basamento volcánico en Playa Cristina es una falla normal con rumbo $N10^{\circ}E/59^{\circ}SE/80^{\circ}$ que al parecer es la estructura principal que controla el fallamiento en esta terraza, el cual tiene dos direcciones preferenciales: NNE y NNW. La distribución que sigue este fallamiento en la terraza sugiere que obedece al levantamiento de la Sierra de San Fermín en esta zona. El fallamiento normal en la terraza sólo afecta a la secuencia marina y no corta al aluvión Plio-Cuaternario, ni al aluvión Cuaternario, lo cual significa que las fallas normales en este sitio no están activas. Este fallamiento provoca que los horizontes de referencia en la secuencia marina se repitan en la

terrazza como se observa en la figura 22, donde la arenisca pumicítica (Pap) aflora en diferentes sitios a lo largo de la sección aún cuando presenta buzamientos de hasta 45° al E.

De todo lo anterior se desprende que el fallamiento normal en la zona de estudio es el evento de deformación más antiguo ya que sólo afecta a la secuencia marina y no al aluvión plio-cuaternario. Mientras que el fallamiento lateral, parece ser el más reciente ya que éste afecta tanto a la secuencia marina como al aluvión plio-cuaternario y al aluvión cuaternario.

V.3 Paleomagnetismo.

Como se mencionó en el capítulo de correlación magnetoestratigráfica, se utilizaron dos escalas geomagnéticas para la correlación magnetoestratigráfica. La principal diferencia en la correlación al utilizar una u otra escala (Mankinen y Dalrymple, 1979; Harland *et al.* 1990), es que implican dos mecanismos de depositación diferentes durante el periodo del evento Reunión. El utilizar la escala de Mankinen y Dalrymple (1979) implica una depositación lenta ya que este periodo abarca 130,000 años y representa en este caso un espesor de ~ 5 m de sedimentos, mientras que en la escala de Harland y colaboradores (1990), el periodo es de 30,000 años para el mismo paquete. Considerando que entre los dos núcleos representados en la escala se encuentra un horizonte de conglomerado aluvial (Pca), se asume que la depositación del conglomerado es rápida. Por lo tanto esta escala es más confiable para la correlación, ya que las condiciones de depositación de un conglomerado son congruentes con un periodo corto de depositación.

La tasa de sedimentación calculada es la misma utilizando cualquiera de las dos escalas, ya que en el cálculo se utilizaron las edades de los límites de la secuencia (1.87 - 2.92 Ma).

V.3.1 Magnetoestratigrafía de Playa Cristina

La columna magnetoestratigráfica de Playa Cristina no pudo ser utilizada para la correlación estratigráfica con la escala geomagnética del tiempo debido a que los eventos inversos registrados no son confiables (Figuras 39 y 40). Esta diferencia en eventos normales e inversos entre Playa Cristina y El Coloradito, posiblemente se debe a un error en la densidad de muestreo de las unidades. Debido a la complejidad estructural que se encontró en Playa Cristina, la sección se muestreó en varias localidades, y así se obtuvo una columna compuesta. Al parecer, la densidad de muestreo vertical no fue suficiente y no se registró el evento inverso completo. El evento inverso registrado en El Coloradito hacia la cima de la secuencia sí tuvo una buena densidad de muestreo en Playa Cristina. Aun cuando estas muestras exhiben un comportamiento estable, los resultados no son confiables debido a que la secuencia presenta horizontes ferruginosos como minerales secundarios.

A pesar de estas deficiencias en el muestreo, la columna es útil para medir rotaciones, ya que el promedio de la variación secular sólo se emplea para estimar la posición del polo virtual para esta localidad. Otro dato de gran utilidad que se obtiene de esta localidad, es que en ésta se muestrearon las unidades superiores del miembro inferior, donde las lodolitas amarillas muestran una polaridad inversa y pueden corresponder al evento inverso "Kaena" del período Gauss (Figs. 39 y 40).

V.3.2 Cálculo del paleopolo.

La columna magnetoestratigráfica en el El Coloradito reúne las condiciones necesarias para calcular la posición del polo virtual para el Plioceno Tardío. Para poder calcularlo, se requiere que los eventos normales e inversos sean antípodos (Butler, 1992), por lo que es necesario aplicar a las muestras la prueba de las “inversiones” que fue positiva con un 92% de confianza. Con este criterio se calculó el primer polo (74.2°N , 69.5°W) (Figura 30), utilizando 40 muestras en el cálculo. La elipse de 95% de confianza que se calculó tiene radio de 7.9° , que estadísticamente, es un buen resultado si consideramos que el radio de la elipse de confianza del 95% debe ser menor de 10° . Sin embargo, existen intervalos de varios metros sin muestra, que podrían introducir errores en el cálculo si se incluyeran. Considerando esto, se hizo el cálculo de nuevo utilizando solamente los núcleos del intervalo ec-9 a ec-19, ya que es el intervalo con mayor densidad de muestreo. El polo calculado (68°N , 93.3°W) (Figura 31), tuvo un radio de la elipse de confianza de 9.3° , que a pesar de mantenerse dentro del rango de confianza, es mayor que en el cálculo anterior. Considerando que en el primer caso se obtuvo un mejor resultado estadístico, y sobre todo, que los datos cumplen con la condición primordial de la “prueba de inversiones” positiva, se consideró a éste como el mejor resultado.

La inclinación calculada con 40 datos es de 34.4° , que no resulta significativamente diferente a la inclinación esperada que es de 36.9° (Pischke, 1982). Sin embargo la inclinación calculada en el intervalo ec-9 a ec-19 es de 19.1° , que sí es significativamente diferente a la inclinación del polo de referencia.

Las posibles explicaciones de esta diferencia de acuerdo a Lewis (1994) son: 1) correcciones estructurales incompletas o incorrectas, 2) excursiones del campo magnético, 3) traslación tectónica significativa hacia el norte de la secuencia, 4) promedio insuficiente de la variación secular.

1) En cuanto a errores estructurales, parece poco probable que esta sea la fuente de error, ya que aún cuando estas muestras fueron tomadas sobre el eje del sinclinal reportado en El Coloradito, el pliegue tiene 140° de abertura y 8° de echado, con lo cual este error no debe ser significativo en caso de existir. La prueba de pliegues (Butler, 1992), no se llevó a cabo, debido a que el muestreo se realizó de manera vertical en la secuencia, mientras que la prueba requiere también muestreo a lo largo de un estrato.

2) Registros de la variación secular del Holoceno, indican que las desviaciones máximas del campo magnético con respecto a la media son de 20° . Desviaciones de corta duración suelen ocurrir y pueden ser mayores de 30° (Butler, 1992).

3) Otros investigadores han sugerido que la traslación de la península hacia el norte, usando evidencias geológicas y paleomagnéticas es del orden de 300 km durante el Neógeno (Lewis, 1994), lo que nos ubica dentro del rango de error del estudio paleomagnético.

4) En la tabla II, se muestran los resultados de los cálculos hechos, 1) utilizando toda la columna magnetoestratigráfica (40 puntos) y 2) utilizando sólo un segmento (11 puntos), y los resultados son sustancialmente diferentes. La diferencia se atribuye a que el primer resultado promedia de mejor manera la variación secular, mientras que el segundo refleja

un periodo en el cual la variación secular se aleja de la media de manera significativa. Por lo tanto, la diferencia en inclinación de ambos cálculos, puede explicarse de dos formas:

- 1) Una excursión del campo magnético en la época que registra la inversión interpretada como perteneciente a la época del evento Reunión.
- 2) Una diferencia en el promedio de la variación secular asociada a la densidad de muestreo.

V.4 Modelo estructural.

El modelo que se propone está basado en el modelo de bloques rígidos delimitados por fallas de desplazamiento lateral (Ron et al., 1984) (Fig. 42) y consta de dos fases:

1) El sistema principal corresponde a un sistema dextral, que en este caso respondería al sistema regional dextral de las fallas transformes del Golfo de California, que tiene una orientación NNW-SSE. El modelo predice la ocurrencia de fallamiento antitético lateral izquierdo con orientación NNE-SSW, sinistral y antitético al sistema. A este fallamiento antitético corresponderían las fallas de rumbo NE reportadas en este estudio (Fig. 3), lo que nos lleva a la segunda fase del modelo.

2) En esta fase se desarrolla una elipse de deformación escalada que se convierte en un sistema de fallamiento izquierdo. Tomando en cuenta las características litológicas de la zona, en donde las rocas sedimentarias, principalmente las lodolitas, son materiales muy competentes, no se esperaría la presencia de fallamiento inverso sino plegamiento, con estas consideraciones el modelo predice la aparición de pliegues cuyo eje estará orientado ENE y fallamiento normal en dirección NNW (Figura 43).

Las estructuras en la zona de estudio responden adecuadamente a las predicciones del modelo. Se encontró fallamiento lateral izquierdo con rumbo NNE, pliegues con la orientación de su eje ENE. Sin embargo, el fallamiento normal, especialmente en Playa Cristina, no corresponde al modelo. Una posible explicación es que el fallamiento normal es anterior al evento de deformación que dio origen al sistema de fallamiento lateral izquierdo. Como se mencionó anteriormente, el fallamiento normal en la zona no afecta a la cubierta sedimentaria del Plio-Cuaternario, ni al aluvión Cuaternario. El fallamiento normal en la zona, especialmente en Playa Cristina (Figs 9 y 21), presenta dos orientaciones preferenciales, NNE y NNW. En el mapa geológico de esta terraza, se observa que éstas tienden a ser paralelas al borde oriental de la Sierra de San Fermín, lo que sugiere que el fallamiento normal podría resultar del levantamiento de la Sierra San Fermín.

El modelo de deformación que se propone, considera que el medio se comporta en forma de bloques discretos delimitados por fallas. En este caso, las fallas de rumbo izquierdas estarían delimitando tres bloques: 1) bloque Santa Catarina, 2) bloque El Coloradito y 3) bloque Playa Cristina, de acuerdo al modelo de rotación de bloques por fallamiento lateral de Ron y colaboradores (1984) (Fig. 42). Estos bloques deben rotar en sentido de las manecillas del reloj en un sistema sinestral y en el sentido contrario para el modelo de fallamiento dextral.

Los resultados del estudio paleomagnético apoyan este modelo ya que la rotación en ambos bloques (El Coloradito y Playa Cristina), es en sentido de las manecillas del reloj y son rotaciones menores con implicaciones geométricas que la zona cumple (pliegues suaves,

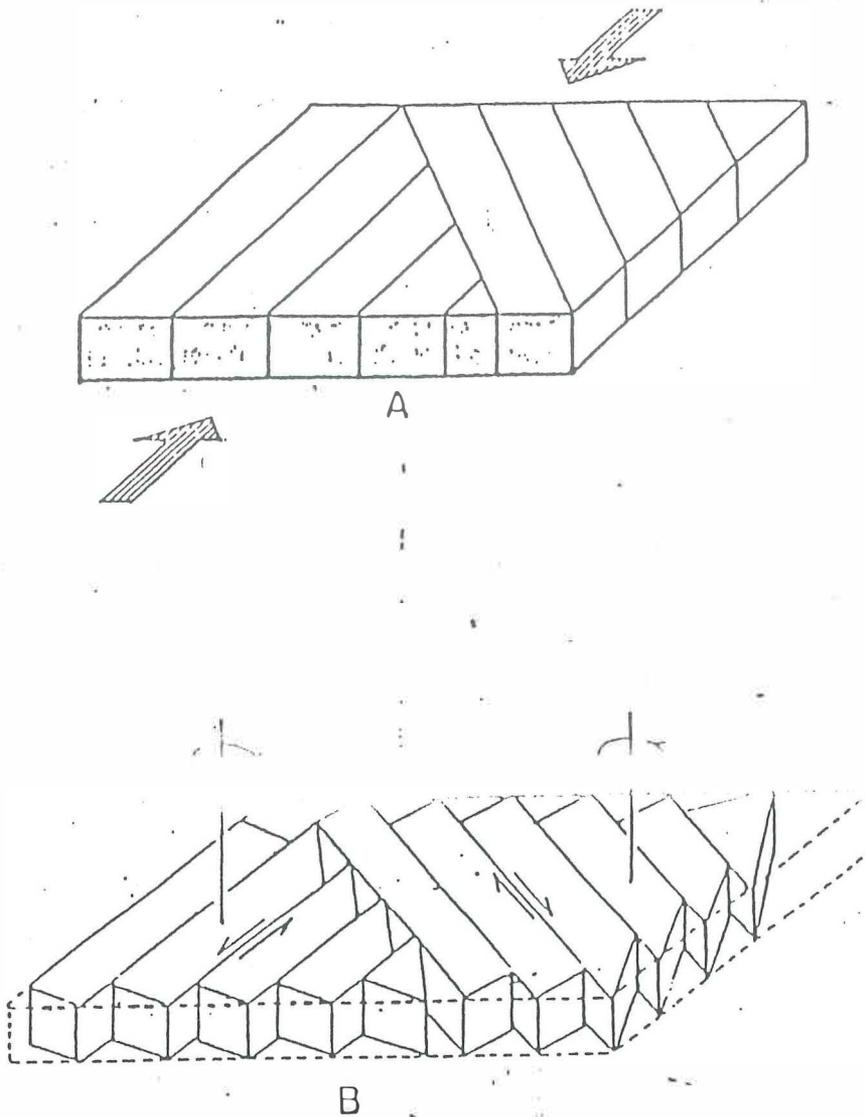


Figura 42. Modelo tridimensional que ilustra la actividad simultánea del desplazamiento lateral y rotación de los bloques aplanados. a) Configuración inicial. b) Después de la deformación. Fallas izquierdas generan rotación en el sentido de las manecillas del reloj. Fallas derechas generan rotación en el sentido contrario de las manecillas del reloj. (Tomado de Roni et al. 1984)

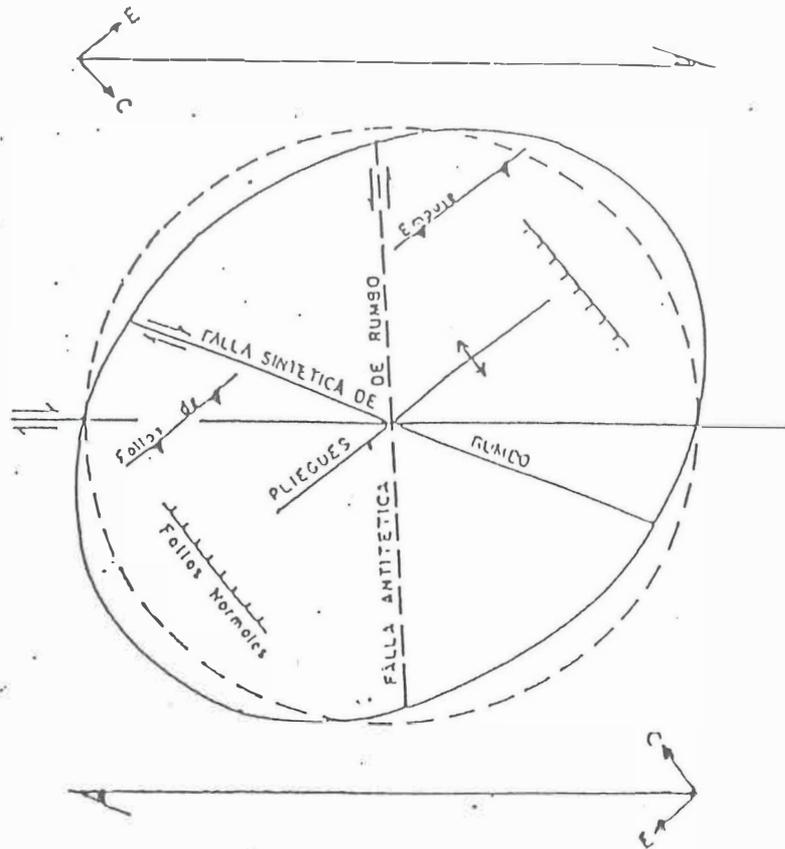


Figura 43. Elipse de deformación, para un sistema derecho. El fallamiento izquierdo en la zona de estudio se interpreta como resultado del fallamiento antitético que el modelo predice. (Traducido de Harding, 1974).

etc.). En un trabajo anterior (Strangway *et al.*, 1971) se reportó una rotación de 30° en el sentido de las manecillas del reloj en este bloque, sin embargo, una rotación de esta magnitud tiene implicaciones geométricas (fallamiento conjugado, fallas normales reactivadas, etc.) (Nur *et al.*, 1986), que no se observan en la zona. Larson y Walker (1975), publicaron los resultados de un estudio geoquímico realizado en las mismas unidades que reportaron Strangway y colaboradores (1971). A partir del estudio geoquímico concluyeron que los resultados obtenidos no son confiables ya que las muestras analizadas contienen hidropsilomelano, que es un producto de alteración de la hematita, por lo cual la dirección magnética calculada no era la dirección de magnetización característica. Por otra parte, Johnson y colaboradores (1983) calcularon rotaciones de 35° en sentido de las manecillas del reloj para las formaciones de la cuenca Vallecito-Fish Creek que son, en parte, contemporáneas a la secuencia marina de Puertecitos (Martín-Barajas *et al.*, 1993). Las rotaciones reportadas por Johnson y colaboradores (1983), por su magnitud, podrían estar asociadas a la Falla Elsinore. Lewis (1994) reportó rotaciones de 30° en el sentido de las manecillas del reloj en rocas volcánicas del Mioceno Tardío en la “zona de fallamiento El Coloradito”, ubicada aproximadamente a 3 km al SW de la terraza El Coloradito. Lewis (1994) asoció estas rotaciones a un sistema de fallamiento lateral siniestral con orientación ENE, y las fallas medidas en campo e inferidas, son consistentes con sus resultados. Por lo tanto se asume que los eventos de deformación en la Sierra de San Fermín y en El Coloradito están asociados.

Suárez y colaboradores (1991), proponen la influencia de dos fallas transformantes sobre la zona de Puertecitos, que serían las estructuras a las que se asocia el sistema dextral en la región de Puertecitos. Sin embargo, la ubicación de estas fallas está únicamente inferida.

A pesar de las incógnitas que quedan por resolver en la zona de estudio, las estructuras reportadas en la zona de estudio guardan coherencia con el modelo propuesto. La presencia de fallamiento normal, que no guarda relación geométrica con el fallamiento lateral, se explica por la diferencia en tiempo de dichos eventos, como ya se explicó, el fallamiento normal es anterior al fallamiento lateral.

Por su parte, el fallamiento lateral guarda una relación geométrica consistente con el plegamiento reportado en El Coloradito. Además, de que el estudio paleomagnético, apoya la interpretación de que el fallamiento lateral es izquierdo, que finalmente concuerda con el modelo de deformación propuesto para la zona de estudio.

VI. Conclusión.

Las características litológicas, sedimentológicas y paleontológicas de la secuencia marina, indican que ésta se depositó en un medio ambiente marino de plataforma somera dominada por mareas. Los horizontes volcánicos interestratificados en el miembro superior (Pms) (la arenisca pumicítica (Pap) y la toba E (Pte)), representan depósitos distales de la actividad volcánica terminal en la Provincia Volcánica de Puertecitos, y su fuente estaría ubicada al sur de la zona de estudio.

De acuerdo al resultado de la magnetoestratigrafía, la base del miembro superior de la secuencia marina tendría una edad de 3.0 Ma aproximadamente y la cima tendría una edad aproximada de 1.87 Ma, lo que nos da una razón de acumulación de 5 mm/100 años, que resulta ser extremadamente baja. Se infiere que esta tasa de depositación es consecuencia de varios hiatus en la secuencia, probablemente producto de variaciones del nivel del mar o de eventos erosivos de tormentas, que estarían representadas por los horizontes conglomeráticos, las coquinas y areniscas de grano más grueso.

Las terrazas marinas en el flanco oriental de la Sierra de San Fermín, registran cuando menos dos eventos de deformación, diferentes en tiempo y en naturaleza. El primero de éstos, posiblemente sinsedimentario, ocasionó el fallamiento normal que se encuentra mejor registrado en Playa Cristina y en Santa Catarina. La orientación y el comportamiento de los echados de las fallas en este evento, sugiere que el levantamiento del basamento volcánico (Sierra de San Fermín), es el mecanismo que originó y controló este fallamiento.

El segundo evento de deformación que consiste en fallamiento lateral izquierdo con orientación NNE, es el más reciente y posiblemente aún activo. Se infiere que es un sistema antitético al sistema dextral regional. Esta deformación se registra principalmente en la zona de las terrazas El Coloradito. Los lineamientos en la cubierta sedimentaria del Cuaternario se interpretan como estructuras de desplazamiento lateral y sugieren que la deformación está activa.

Esta deformación, parece estar controlada por un sistema de cizalla derecho, que estaría asociado al sistema regional. La presencia de fallamiento lateral izquierdo con orientación NE y los pliegues cuyos ejes están orientados ENE, se asocian a un sistema antitético al sistema de cizalla regional.

Los resultados paleomagnéticos realizados indican que los bloques limitados por las fallas laterales, han experimentado hasta $\sim 11^\circ$ de rotación en el sentido de las manecillas del reloj (en localidades como Playa Cristina), desde el Plioceno tardío. Estos resultados son consistentes con el modelo de deformación de Ron y colaboradores (1984) (Figura 42) y con los resultados obtenidos en otro trabajo en Sierra San Fermín (Lewis, 1994).

Finalmente, la deformación en las terrazas marinas sugiere que la transurrencia en el Golfo se propaga al continente deformando la margen continental. Parte del movimiento dextral entre la Placa de Norteamérica y la Placa Pacífico se distribuye en la zona de estudio mediante dos mecanismos: 1) Extensión (que es el mecanismo principal) y 2) fallamiento lateral antitético al sistema principal, que produce rotaciones de bloques en el sentido de las manecillas del reloj.

Literatura Citada.

- Badgley, C., L. Tauxe and F.L. Bookstein. 1986. Estimating the error of age interpolation in sedimentary rocks, *Nature*, Vol. 319, 139-141.
- Boehm, M. 1984. An overview of the lithostratigraphy, biostratigraphy and paleoenvironments of the late Neogene San Felipe sequence, Baja California, Mexico. 253-265 pp. in: V.A. Frizzell (Ed). *Geology of the Baja California Peninsula*. Pacific Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Vol. 39, 150 pp.
- Butler, R.F. 1992. *Paleomagnetism*. Ed. Blackwell Scientific Publications. U.S.A. 320 pp.
- Cande, S.C. and D.V. Kent. 1992. A new geomagnetic polarity scale for the late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97(B10), 13917-13951.
- Cuevas, A. 1994. Estratigrafía de las terrazas marinas entre El Coloradito y Puertecitos, Noreste de Baja California, México. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, U.A.B.C., Ensenada, B.C. (En proceso).
- Demarest, H.H., Jr. 1983. Error analysis for the determination of Tectonic rotation from paleomagnetic data. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 88(B5), 4321-4328.
- Gastil, G., Phillips, R.P. and Allison, E.C. 1975. Reconnaissance Geology of the State of Baja California. The Geological Society of America, Memoir 140. pp. 170.
- Hagstrum, J.T., M.G. Sawlan, B.P. Hausback, J.G. Smith and C.S. Grommé. 1987. Miocene paleomagnetism and tectonic setting of the Baja California peninsula, Mexico. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 92(B3), 2627-2639.
- Harding, T.P. 1974. Petroleum traps associated with wrench faults. en: A.G. Sylvester (Ed.). *Wrench fault tectonics. Selected papers reprinted from the American Association of Petroleum Geologists Bulletin and other geological journals*. American Association of Petroleum Geologists, Reprint series No. 28, 121-135.
- Harland, W.B., R.L. Armstrong, A.V. Cox, L.E. Craig, A.G. Smith and D.G. Smith. 1990. *A geologic time scale 1989*. Cambridge University Press. 236 pp.
- Hausback, B.P. 1988. Miocene paleomagnetism of Baja California Sur; evidence concerning the structural development of western Mexico. *Geofísica Internacional*, Vol. 27, 463-483.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1979. *Carta Topográfica Bahía Santa María HIIB67 escala 1:50,000*. 2a edición.

- Johnson, N.M., N.D. Opdyke, G.D. Woodard, E.H. Lindsay. 1983. Rates of late Cenozoic tectonism in the Vallecito-Fish Creek basin, western Imperial Valley, California. *Geology*, Vol 11, 664-667.
- Kerr, D.R. 1984. Early Neogene continental sedimentation in the Vallecito and Fish Creek Mountains, Western Salton Through, California. *Sedimentary Geology*, Vol. 38, 217-246
- Kirschvink, J.L. 1980. The least squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 62, 699-718.
- Larson, E.E. and T.R. Walker. 1975. Development of chemical remanent magnetization during early stages of red-bed formation in late Cenozoic sediments, Baja California. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 86, 639-650.
- Lewis, C.J. 1994. Constraints on extension in the Gulf extensional province from the Sierra San Fermin, Northeastern Baja California, Mexico. Ph.D thesis, Harvard University, Massachusetts. 361 pp.
- Mankinen, E.A. and G.B. Dalrymple. 1979. Revised geomagnetic polarity scale for the interval 0-5 m.y. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84 (B2), 615-626
- Martín-Barajas, A. y J. Stock. 1993. Estratigrafía y petrología de la secuencia volcánica de Puertecitos, Noreste de Baja California. Transición de un arco volcánico a rift. p 90-114 en: Delgado-Argote, L. y A. Martín-Barajas, eds. *Contribuciones a la tectónica del Occidente de México*. Monografía No. 1. Unión Geofísica Mexicana. 330 pp.
- Martín-Barajas, A, M. Téllez-Duarte, G. Rendón-Márquez. 1993. Estratigrafía y ambientes de depositación de la secuencia marina de Puertecitos, EN de Baja California. Implicaciones sobre la evolución de la margen occidental del Golfo. p. 90-114. en: Delgado-Argote, L. y A. Martín-Barajas, eds. *Contribuciones a la tectónica del Occidente de México*. Monografía No. 1. Unión Geofísica Mexicana. 330 pp.
- McLean, H. 1989. Reconnaissance geology of a Pliocene marine embayment near Loreto, Baja California Sur, Mexico p 17-26. in: P. Abbot (Ed). 1989. *Geologic Studies in Baja California*. Pacific section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Vol. 63, 140 pp.
- Neville, J. P., 1966. *Fault and Joint Development in Brittle and Semi-brittle Rock*. Ed. Pergamon Press. Great Britain. 176 pp.
- Nur, A. H. Ron and O. Scotti. 1986. Fault mechanics and the kinematics of block rotations. *Geology*. Vol. 14, 746-749.

- Pischke, G. 1982. Paleomagnetic study of Neogene tectonic history of Baja California, Mexico. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Vol. 66(10), 1697-1698.
- Ramsay, J.G. and M.I. Huber. 1987. *The techniques of modern structural geology. vol. 2: Folds and Fractures*. Academic Press 700 pp.
- Reineck, H.E., I.B. Singh. 1975. *Depositional Sedimentary Environments*. Ed. Springer-Verlag, New York, U.S.A. 439 pp.
- Rendón Márquez G. 1992. Estratigrafía de los depósitos marinos del Neogeno en la región de Puertecitos, noreste de Baja California, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, U.A.B.C., Ensenada, B.C. 59 pp.
- Ron, H., R. Freund and Z. Garfunkel. 1984. Block rotation by strike-slip faulting: structural and paleomagnetic evidence. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 89(B7), 6256-6270.
- Spencer, E.W. 1969. *Introduction to the structure of the earth*. McGraw-Hill, Co. New York 597 pp.
- Suárez V., F., R. Armijo, G. Morgan, P. Bodin and G. Gastil. 1991. Framework of Recent and Active Faulting in Northern Baja California. p 285-299 in: Dauphin, J.P. and B.R.T. Simoneit. eds. 1991. *The Gulf and peninsular province of the Californias: American Association of Petroleum Geologists. Memoir 47*, 727 pp.
- Strangway, D.W., B.E. McMahon, T.R. Walker and E.E. Larson. 1971. Anomalous Pliocene paleomagnetic pole positions from Baja California. *Earth and Planetary Science Letters* Vol. 13 pp. 161-166.
- Stock, J.M. and K.V. Hodges. 1989. Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and transfer of Baja California to the Pacific Plate. *Tectonics*. Vol. 8(1), 99-115.
- Stock, J.M., A. Martín B., F. Suárez V., and M.M. Miller. 1991. Miocene to Holocene extensional Tectonics and volcanic stratigraphy of NE Baja California, Mexico. *Comunicaciones Académicas. C.I.C.E.S.E., CESF9108*.
- Walker, R.G. 1984. Shelf and shallow marine sands. p 141-170 en: Walker, R.G. ed. *Facies Models*, Geoscience Canada, Reprint Series 1.510 pp.
- Wernicke, B. and B. Burchfiel. 1982. Modes of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology*. Vol. 4 No. 2, 105-115.
- Wilson, I.F. 1948. Buried topography, initial structures, and sedimentation in Santa Rosalia area, Baja California, Mexico. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Vol. 32(9), 1762-1807.

Apéndice 1. Análisis de normalidad, cálculo de polos, errores y rotaciones:

Los cálculos estadísticos de los datos paleomagnéticos se hicieron utilizando el programa desarrollado por Craig Jones y Joe Kirshvink de *California Institute of Technology* ©1991. Este programa calcula la distribución de Fisher.

La función de la distribución de Fisher (Butler, 1992) P_{dA}^{Θ} nos indica la probabilidad por área angular unitaria de encontrar una dirección dentro del área angular d_A , cuyo centro se encuentra a un ángulo Θ con respecto a la media. Se escogió esta distribución ya que los datos que se obtienen del magnetómetro son coordenadas esféricas, parámetros con los cuales trabaja esta distribución.

Para calcular la media se utilizan las siguientes expresiones:

$$l_i = \cos I_i \cos D_i \quad (2)$$

$$m_i = \cos I_i \sin D_i \quad (3)$$

$$n_i = \sin I_i \quad (4)$$

donde D_i es la declinación del vector i , I_i es la inclinación de dicho vector y l_i , m_i y n_i son los cosenos directores del vector i .

De aquí calculamos los cosenos directores de la media:

$$l = \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{R}, \quad (5)$$

$$m = \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{R} \quad (6)$$

y

$$n = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{R} \quad (7)$$

donde R es igual al vector resultante:

$$R^2 = \left(\sum_{i=1}^N l_i^2 \right) + \left(\sum_{i=1}^N m_i \right) + \left(\sum_{i=1}^N n_i \right) \quad (8)$$

Por lo tanto la inclinación y la declinación de la media de la dirección

es:

$$D_m = \tan^{-1} \frac{m}{l} \quad (9)$$

y

$$I_m = \text{Sen}^{-1} n \quad (10)$$

El siguiente parámetro a calcular es el coeficiente de dispersión k , que nos indica una medida de la dispersión de la población de direcciones con respecto al vector resultante, la expresión es:

$$k = \frac{N-1}{N-R} \quad (11)$$

como vemos k aumenta conforme el valor de R se aproxima a N .

Por analogía directa con la desviación estándar de la estadística Gaussiana, vemos que la varianza angular de una muestra es:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Delta_i^2 \quad (12)$$

donde Δ_i es la diferencia entre la dirección i y la media. Por lo cual, la desviación angular estándar estimada es simplemente:

$$s \approx \frac{81^\circ}{\sqrt{k}} \quad (13)$$

y para la desviación angular estándar tenemos:

$$\delta = \text{Cos}^{-1} \frac{R}{N} \quad (14)$$

que para muestras de $N \geq 10$ podemos considerar:

$$s \approx \delta \approx \frac{81^\circ}{\sqrt{k}} \quad (15)$$

En cuanto al nivel de confianza, el límite de confianza se expresa como el radio angular a partir de la media de la dirección.

Para un conjunto de datos de N direcciones, el ángulo α_{1-p} la verdadera media, se encuentra en el límite de confianza $(1-p)$, está dada por:

$$\text{Cos} \alpha_{(1-p)} = 1 - \frac{N-R}{R} \left\{ \left(\frac{1}{p} \right)^{N-1} - 1 \right\} \quad (16)$$

el nivel de confianza $(1-p)$ más común es de 0.95 y se denota como α_{95} . Sin embargo para muestras de α_{95} y $N \geq 10$ podemos aproximar:

$$\alpha_{95} \approx \frac{140^\circ}{\sqrt{kN}} \quad (17)$$

Prueba de "Inversiones":

Para comprobar que efectivamente tenemos registradas inversiones del campo magnético, debemos calcular la media de la muestra donde se obtuvo la inversión, una vez hecho esto, este resultado debe ser "antiparalelo" al campo magnético normal del mismo conjunto de muestras.

Cálculo de la dirección promedio de un sitio, rotaciones e intervalo de confianza:

Para calcular la dirección promedio de un sitio, se utilizó el mismo algoritmo descrito anteriormente, solo que en este caso se escribió un programa en *Fortran 77* (apéndice 2) que a su vez calcula la diferencia de posición entre un polo calculado y un polo de referencia.

Para calcular la rotación y los intervalos de confianza se utilizaron los siguientes algoritmos:

Se calculó el ángulo de rotación sobre el eje vertical R:

$$R = D_0 - D_x \quad (18)$$

donde:

R = rotación

D_O = Declinación observada.

D_X = Declinación esperada.

también fue necesario calcular la disminución de la inclinación:

$$F = I_X - I_O \quad (19)$$

donde:

F = disminución de la inclinación.

I_O = Inclinación observada.

I_X = Inclinación esperada.

Posteriormente se calculó el intervalo de confianza para la rotación:

$$\Delta R = 0.8 \sqrt{\Delta D_o^2 + \Delta D_x^2} \quad (20)$$

donde:

$$\Delta D_o = \frac{\text{Sen} \alpha_{95}}{\text{Cos} I_o} \quad (21)$$

$$\Delta D_x = \text{Sen}^{-1} \left(\frac{\text{Sen} A_{95}}{\text{Sen} p} \right) \quad (22)$$

de donde:

$$A_{95} = 2dp \left(\frac{1}{1 + 3\text{Cos}^2 p} \right) \quad (23)$$

$$p = \text{Cos}^{-1} \left(\text{Sen} \lambda_p \text{Sen} \lambda_s + \text{Cos} \lambda_p \text{Cos} \lambda_s (\phi_p - \phi_s) \right) \quad (24)$$

donde:

(λ_p, ϕ_p) = coordenadas polo magnético esperado.

(λ_s, ϕ_s) = coordenadas del sitio de estudio.

además:

$$dp = 2\alpha_{95} \left(\frac{1}{1 + 3\cos^2 I_o} \right) \quad (25)$$

Para el intervalo de confianza de la disminución en la inclinación se utilizó el siguiente algoritmo:

$$\Delta F = 0.8 \sqrt{\Delta I_o^2 + \Delta I_x^2} \quad (26)$$

donde:

$$\Delta I_o = \alpha_{95} \quad (27)$$

$$\Delta I_x = A_{95} \left(\frac{2}{1 + 3\cos^2 p} \right) \quad (28)$$

Apéndice 2: Programa para calcular la posición del polo virtual de un sitio promediando la variación secular del campo magnético.

```

c *****
c Programa para calcular la rotación de una secuencia en          *
c un sitio, promediando la variación secular del campo          *
c magnético.                                                    *
c Algoritmos de:                                                *
c Fisher (1953) (tomado de Butler,1992) y Demarest (1983)      *
c Codificado por Mario Rebolledo V.                             *
c Lenguaje: Fortran77                                           *
c *****
  Implicit real*8 (a-h,o-z)
  character*12 dat
  parameter (pi=3.14159)
  write(*,*)'nombre del archivo de salida:'
  read(*,1)dat1
  write(*,*)'Declinacion e Inclinacion esperadas:'
  write(*,*)xD,xI
  write(*,*)'alfa 95 para este polo:'
  read(*,*)ax95
  write(*,*)'Declinacion e Inclinacion observadas:'
  write(*,*)oD,oI
  write(*,*)'alfa 95 para este polo:'
  read(*,*)ao95
1  format(a12)
  open(3,file=dat,status='new')
  rxI=(xI*pi)/180.
  rxD=(xD*pi)/180.
  roI=(oI*pi)/180.
  roD=(oD*pi)/180.
  dDo=sin(ax95)/cos(xI)
  dIo=ax95
  p=atan(2./tan(oI))
  dp=(2.*ao95)*(1./(1.+3.*(cos(oI)**2)))
  dxI=dp*(2./(1.+3.*(cos(oI)**2)))
  A95=2*dxI*(1./(1.+3.*(cos(xI)**2)))
  dDx=asin(sin(A95)/sin(p))
  Ro=oD-xD
  =xI-oI
  dRo=.8*(((dDo)**2+(dDx)**2)**.5
  dF=.8*(((dIo)**2+(dxI)**2)**.5

```

```
write(3,9)'Rotación, Flattening, dRo, dI  
9 format(2x,f10.3,3x,f10.3,3x,f10.3,3x,f10.3)  
write(3,9)Ro,F,dRo,dF  
close(3)  
stop  
end
```

Apéndice 3. Dirección característica del componente magnético primario en las muestras analizadas, ajustados por mínimos cuadrados. Las muestras corresponden a toda la zona de estudio.

Muestra	Tipo de ajuste	Dec.	Incl.	PLon.	Plat.	n	MAD
pc1-1	L anc	340.1	46.2	355.9	35.3	7	5.5
pc1-3	L anc	3.9	43.1	13.2	26.7	10	3.6
pc1-4	L anc	183.6	-26.8	188.4	-10.1	10	5.2
pc2-5	L anc	43.8	-61.3	34.5	-82.2	27	2.9
pc2-7	L anc	326.9	62.4	357.8	53.1	16	4.4
pc2-8	L anc	17.8	35.7	17.6	21.7	27	3.1
pc3-11	L anc	15.9	58.1	16.1	44.1	26	5.6
pc3-12	L anc	31.4	49.9	28.4	36.2	15	4.2
pc4-13	L	30.9	38.5	28.7	24.8	3	3.6
pc4-14	L anc	306.6	64.3	328.1	56.9	10	8.2
pc4-15	L anc	359.2	50.2	12.2	41.8	8	2.9
pc5-1	L anc	189.0	-17.1	188.1	-2.2	6	9.5
pc5-2	L anc	166.6	-57.9	172.5	-43.7	6	6.6
pc5-3	L anc	222.4	-48.4	217.1	-39.4	6	5.8
pc6-5	L	324.9	32.4	328.7	24.5	5	8.8
pca1a	L anc	28.8	29.9	23.9	23.7	6	2.5
pca1b	L anc	23.4	22.3	20.2	15.4	4	4.3
pca1c	L anc	23.9	28.3	19.6	21.4	8	5.4
pca-1.5a	L anc	4.5	28.4	1.7	22.3	11	3.4
pca-1.5c	L anc	13.8	33.6	9.6	28.5	11	3.0
pca-1.6b	L anc	25.8	59.5	14.0	55.5	12	3.3
pca-1.6c	L anc	12.1	44.8	6.1	39.5	11	4.6
pca-a.6d	L anc	24.1	45.8	16.9	41.9	10	5.8
pca2a	L anc	16.9	31.8	20.0	26.2	11	3.4
pca2b	L anc	21.4	31.4	24.3	25.4	11	3.2
pca2c	L anc	16.7	40.5	21.1	34.8	17	2.6
pca-2.1a	L anc	16.4	44.2	10.1	39.3	24	2.1
pca-2.1b	L anc	17.7	41.6	11.1	36.8	24	2.6
pca-2.1c	L anc	24.6	32.5	20.1	28.8	25	2.5
pca-2.2a	L anc	34.5	24.9	30.1	22.6	12	7.6
pca-2.2b	L anc	35.6	39.3	29.2	36.9	25	3.2
pca3a	L anc	19.3	39.1	23.2	33.1	11	5.6
pca3b	L anc	4.5	48.9	11.5	44.4	17	6.2
pca3c	L anc	19.1	36.8	22.7	30.9	25	4.5
pca-3.1a	L anc	199.5	-14.7	197.8	-10.4	10	6.5
pca-3.1b	L anc	16.4	52.9	8.1	47.9	17	8.9
pca-3.1c	L anc	28.2	49.3	19.7	45.8	17	8.3
pcd-1a	L anc	349.1	63.6	357.7	38.2	14	8.8

Apéndice 3. continuación

Muestra	Tipo de ajuste	Dec.	Inc	Plon.	Plat.	n	MAD
pcd-1b	L anc	352.6	52.7	357.4	27.3	11	3.1
pcd-1c	L anc	22.4	61.2	16.3	35.7	10	6.2
pcd-2b	L anc	351.9	56.2	357.5	30.8	10	5.3
pcd-2c	L anc	359.7	45.8	1.7	19.1	10	4.5
pcd-3a	L anc	30.4	47.1	24.3	56.9	17	2.7
pcd-3b	L anc	29.9	58.8	9.6	72.2	17	3.3
pcd-3c	L anc	24.2	45.9	9.1	60.1	16	3.2
pce2	L anc	44.9	39.7	47.1	46.8	15	1.7
pce3	L anc	41.7	44.2	43.8	51.4	15	1.2
pce4	L anc	39.6	52.1	51.9	56.1	16	2.7
ec8-10	L anc	171.8	-37.3	181.9	-20.1	12	2.6
ec8-4	L anc	8.6	53.9	20.2	32.9	7	8.3
ec8-9	L anc	141.1	-27.1	152.0	-22.0	10	7.3
ec8-11	L anc	180.1	-32.9	187.1	-14.6	21	2.4
ec8-12	L anc	172.8	-34.7	181.7	-18.2	11	3.9
ec8-13	L anc	193.2	-28.9	197.2	-7.9	6	1.7
ec8-14	L anc	187.1	-31.7	192.6	-11.9	29	7.9
ec8-15	L anc	181.8	-29.1	187.7	-11.4	24	3.5
ec8-17	L anc	203.6	-46.1	208.9	-23.2	4	4.0
ec8-21	L anc	1.1	53.4	15.5	33.7	12	7.2
ec8-22	L anc	19.1	53.4	27.1	30.9	10	8.5
ec8-23	L anc	148.4	-22.1	156.1	-14.7		9.5
ec8-24	L anc	159.2	-26.1	167.1	-14.4	4	9.8
ec8-27	L anc	179.2	-30.1	185.5	-12.2	10	5.6
ec8-8	C	105.6	0.2	103.7	-11.1	4	7.4
ec8-15	L	186.1	-33.1	193.1	-14.1	26	8.4
ec8-19	L	178.6	-36.8	187.1	-18.7	4	3.6
ec8-20	L	355.1	54.8	12.0	36.3	5	4.4
ec8-21	L	23.2	56.9	30.6	33.1	4	5.7
ec8-25	L	354.6	47.1	7.8	29.4	6	7.8
ec8-28	L	188.5	-48.8	198.5	-28.1	8	6.6
ec8-2	L anc	275.2	-28.1	268.4	-12.6	9	6.2
ec8-18	L anc	177.9	-63.6	197.8	-43.9	4	9.2
ec-31	L anc	345.3	74.3	332.9	79.7	5	8.4
ec-32	L anc	27.2	43.1	29.4	49.6	11	8.5
ec-33	L anc	19.9	42.9	21.3	48.8	9	5.4
ec-34	L anc	30.1	45.7	32.9	51.2	10	7.8
ec-35	C anc	97.1	28.7	101.2	28.4	11	13.5
ec-36	C	94.1	23.8	96.7	23.9	10	7.3
ec-38	L anc	1.2	31.3	0.8	37.2	4	8.8

Apéndice 3. continuación

muestra	Tipo de ajuste	Dec	Inc	Plon	Plat	n	MAD
ec-39	L anc	9.0	26.5	9.1	32.5	11	8.4
ec-40	L	5.5	38.7	5.3	44.7	11	7.2
ec-40.5	L	2.9	54.3	2.0	60.3	9	4.2
ec-40.6	L	356.5	47.2	355.1	53.1	11	5.1
ec-41	L anc	10.4	35.9	10.6	41.9	11	6.3
ec-42	L	13.4	45.2	14.1	51.2	4	6.6
ec-44	L	183.6	-47.7	183.1	-53.7	6	7.0
ec-45	L	170.8	-36.6	169.3	-42.4	7	7.2
ec-46	L	179.2	-48.2	178.0	-54.2	6	8.6
ec-47	L	232.6	-44.6	237.3	-48.7	4	8.3
ec-48	L anc	137.2	-52.8	130.4	-56.4	5	8.1
ec-49	L	232.9	36.1	229.1	31.7	4	6.2
ptec-1d	C	46.1	-43.3	239.1	64.7	4	1.6
ptec-1e	L	232.3	-33.3	228.1	-11.7	4	9.4
ptec-1f	C	3.1	-32.5	172.7	52.2	19	7.9
ptec-1g	C	336.1	-12.3	329.5	-24.7	4	12.1
ptec-h	L	22.4	42.8	24.2	19.9	4	7.9

C = ajuste a un círculo, L= ajuste a una línea, anc= forzado al origen Dec e Inc.= declinación e inclinación calculada en grados, con corrección estructural, n= número de puntos utilizados para el ajuste, MAD = Desviación angular máxima, Plat.= Paleolatitud, Plon.= Paleolongitud.

Apéndice 4. Datos de dirección característica, y coordenadas del polo virtual en Playa Cristina sección compuesta, con los datos de ajuste por mínimos cuadrados, para cada muestra.

Muestra	Tipo de ajuste	Dec.	Inc.	PLon.	Plat.	n	MAD
pc1-1	L anc	340.1	46.2	355.9	35.3	7	5.5
pc1-3	L anc	3.9	43.1	13.2	26.7	10	3.6
pc1-4	L anc	183.6	-26.8	188.4	-10.1	10	5.2
pc2-5	L anc	43.8	-61.3	34.5	-82.2	27	2.9
pc2-7	L anc	326.9	62.4	357.8	53.1	16	4.4
pc2-8	L anc	17.8	35.7	17.6	21.7	27	3.1
pc3-11	L anc	15.9	58.1	16.1	44.1	26	5.6
pc3-12	L anc	31.4	49.9	28.4	36.2	15	4.2
pc4-13	L	30.9	38.5	28.7	24.8	3	3.6
pc4-14	L anc	306.6	64.3	328.1	56.9	10	8.2
pc4-15	L anc	359.2	50.2	12.2	41.8	8	2.9
pc5-1	L anc	189.0	-17.1	188.1	-2.2	6	9.5
pc5-2	L anc	166.6	-57.9	172.5	-43.7	11	6.6
pc5-3	L anc	222.4	-48.4	217.1	-39.4	6	5.8
pc6-5	L	324.9	32.4	328.7	24.5	5	8.8
pcd-1a	L anc	349.1	63.6	357.7	38.2	14	8.8
pcd-1b	L anc	352.6	52.7	357.4	27.3	11	3.1
pcd-1c	L anc	22.4	61.2	16.3	35.7	10	6.2
pcd-2b	L anc	351.9	56.2	357.5	30.8	10	5.3
pcd-2c	L anc	359.7	45.8	1.7	19.1	10	4.5
pcd-3a	L anc	30.4	47.1	24.3	56.9	17	2.7
pcd-3b	L anc	29.9	58.8	9.6	72.2	17	3.3
pcd-3c	L anc	24.2	45.9	9.1	60.1	16	3.2
pca1a	L anc	28.8	29.9	23.9	23.7	10	2.5
pca1b	L anc	23.4	22.3	20.2	15.4	10	4.3
pca1c	L anc	23.9	28.3	19.6	21.4	8	5.4
pca-1.5a	L anc	4.5	28.4	1.7	22.3	11	3.4
pca-1.5c	L anc	13.8	33.6	9.6	28.5	11	3.0
pca-1.6b	L anc	25.8	59.5	14.0	55.5	12	3.3
pca-1.6c	L anc	12.1	44.8	6.1	39.5	11	4.6
pca-1.6d	L anc	24.1	45.8	16.9	41.9	10	5.8
pca2a	L anc	16.9	31.8	20.0	26.2	11	3.4
pca2b	L anc	21.4	31.4	24.3	25.4	11	3.2
pca2c	L anc	16.7	40.5	21.1	34.8	17	2.6

Apéndice 4. continuación:

Muestra	Tipo de ajuste	Dec.	Incl.	PLon.	Plat.	n	MAD
pca-2.1a	L anc	16.4	44.2	10.1	39.3	24	2.1
pca-2.1b	L anc	17.7	41.6	11.1	36.8	24	2.6
pca-2.1c	L anc	24.6	32.5	20.1	28.8	25	2.5
pca-2.2a	L anc	34.5	24.9	30.1	22.6	12	7.6
pca-2.2b	L anc	35.6	39.3	29.2	36.9	25	3.2
pca3a	L anc	19.3	39.1	23.2	33.1	11	5.6
pca3b	L anc	4.5	48.9	11.5	44.4	17	6.2
pca3c	L anc	19.1	36.8	22.7	30.9	25	4.5
pca-3.1a	L anc	199.5	-14.7	197.8	-10.4	10	6.5
pca-3.1b	L anc	16.4	52.9	8.1	47.9	17	8.9
pca-3.1c	L anc	28.2	49.3	19.7	45.8	17	8.3
pce2	L anc	44.9	39.7	47.1	46.8	15	1.7
pce3	L anc	41.7	44.2	43.8	51.4	15	1.2
pce4	L anc	39.6	52.1	51.9	56.1	16	2.7

C= ajuste a un círculo, L= ajuste a una línea, anc= forzado al origen Dec e Inc.= declinación e inclinación calculada en grados, con corrección estructural, n= número de puntos utilizados para el ajuste, MAD = Desviación angular máxima, Plat.= Paleolatitud, Plon.= Paleolongitud.

Apéndice 5: Datos de dirección característica, y coordenadas del polo virtual en El Coloradito sección compuesta, con los datos de ajuste por mínimos cuadrados para cada muestra.

Muestra	Tipo de ajuste	Dec.	Incl.	PLon.	Plat.	n	MAD
ec8-10	L anc	171.8	-37.3	181.9	-20.1	12	2.6
ec8-4	L anc	8.6	53.9	20.2	32.9	7	8.3
ec8-9	L anc	141.1	-27.1	152.0	-22.0	10	7.3
ec8-11	L anc	180.1	-32.9	187.1	-14.6	21	2.4
ec8-12	L anc	172.8	-34.7	181.7	-18.2	11	3.9
ec8-13	L anc	193.2	-28.9	197.2	-7.9	6	1.7
ec8-14	L anc	187.1	-31.7	192.6	-11.9	29	7.9
ec8-15	L anc	181.8	-29.1	187.7	-11.4	24	3.5
ec8-17	L anc	203.6	-46.1	208.9	-23.2	4	4.0
ec8-21	L anc	1.1	53.4	15.5	33.7	12	7.2
ec8-22	L anc	19.1	53.4	27.1	30.9	10	8.5
ec8-23	L anc	148.4	-22.1	156.1	-14.7	21	9.5
ec8-24	L anc	159.2	-26.1	167.1	-14.4	4	9.8
ec8-27	L anc	179.2	-30.1	185.5	-12.2	10	5.6
ec8-8	C	105.6	0.2	103.7	-11.1	4	7.4
ec8-15	L	186.1	-33.1	193.1	-14.1	26	8.4
ec8-19	L	178.6	-36.8	187.1	-18.7	4	3.6
ec8-20	L	355.1	54.8	12.0	36.3	5	4.4
ec8-21	L	23.2	56.9	30.6	33.1	4	5.7
ec8-25	L	354.6	47.1	7.8	29.4	6	7.8
ec8-28	L	188.5	-48.8	198.5	-28.1	8	6.6
ec8-2	L anc	275.2	-28.1	268.4	-12.6	9	6.2
ec8-7	L	15.1	53.2	24.9	31.2	4	5.3
ec8-18	L anc	177.9	-63.6	197.8	-43.9	4	9.2
ec-31	L anc	345.3	74.3	332.9	79.7	5	8.4
ec-32	L anc	27.2	43.1	29.4	49.6	11	8.5
ec-33	L anc	19.9	42.9	21.3	48.8	9	5.4
ec-34	L anc	30.1	45.7	32.9	51.2	10	7.8
ec-35	C anc	97.1	28.7	101.2	28.4	11	13.5
ec-36	C	94.1	23.8	96.7	23.9	10	7.3
ec-38	L anc	1.2	31.3	0.8	37.2	4	8.8
ec-39	L anc	9.0	26.5	9.1	32.5	11	8.4
ec-40*	L	5.5	38.7	5.3	44.7	11	7.2
ec-40.5	L	2.9	54.3	2.0	60.3	9	4.2
ec-40.6	L	356.5	47.2	355.1	53.1	11	5.1
ec-41	L anc	10.4	35.9	10.6	41.9	11	6.3
ec-42	L	13.4	45.2	14.1	51.2	4	6.6

Apéndice 5. continuación:

Muestra	Tipo de ajuste	Dec.	Incl.	PLon.	Plat.	n	MAD
ec-44	L	183.6	-47.7	183.1	-53.7	6	7.0
ec-45	L	170.8	-36.6	169.3	-42.4	7	7.2
ec-46	L	179.2	-48.2	178.0	-54.2	6	8.6
ec-47	L	232.6	-44.6	237.3	-48.7	4	8.3
ec-48	L anc	137.2	-52.8	130.4	-56.4	5	8.1
ec-49	L	232.9	36.1	229.1	31.7	4	6.2

C = ajuste a un círculo, L= ajuste a una línea, anc= forzado al origen Dec e Inc.= declinación e inclinación calculada en grados, con corrección estructural, n= número de puntos utilizados para el ajuste, MAD= Desviación angular máxima, Plat.= Paleolatitud, Plon.= Paleolongitud.