

## El Terremoto Argentino de 1894: Fenómenos de Licuefacción asociados a Sismos

Laura PERUCCA<sup>1,2</sup> y Hugo BASTIAS<sup>2</sup>

**Abstract:** *THE ARGENTINE EARTHQUAKE OF 1894: LIQUEFACTION PHENOMENON ASSOCIATED WITH SEISMIC ACTIVITY.* October 27 1894 took place an earthquake with epicenter in the northwest of San Juan's province, considered by their effects at big distances of the focus, as the most important occurred in Argentinean territory. Bodenbender denominated this earthquake as "Argentine Earthquake" and assigned him a magnitude 8.2, locating its epicentre between San Juan and La Rioja 's provinces. One of their particularities was the spectacular modification of the land in areas very far to the epicenter. Many liquefaction phenomena took place, like cracks, sand volcanoes and exit of water in the saturated soils without cohesion.

The liquefaction was one of the characteristic of all the earthquakes occurred in the western valleys of central west part of the Argentinian territory. The cracks, sand volcanoes and spills have been very abundant in distant areas until 260 km of the shock epicenter, and they affected areas of more than 4000 km<sup>2</sup>. The damages caused by the liquefaction include subsidence of constructions, roads, watering channels, fields, tanks and houses. The Holocene deposits of alluvial plain paleochannels and beach have been affected by this phenomenon.

So, it is indispensable to carry out an appropriate urban planning and to study the liquefaction potential areas and their effects in the densely populated localities of our region.

**Resumen:** *EL TERREMOTO ARGENTINO DE 1894: FENÓMENOS DE LICUEFACCIÓN ASOCIADOS A SISMOS.* El 27 de octubre de 1894 se produjo un sismo con epicentro en el noroeste de la provincia de San Juan, considerado por sus efectos a grandes distancias del foco, como el de mayor magnitud ocurrido en territorio argentino. Bodenbender denominó este sismo "Terremoto Argentino" y le asignó una magnitud 8.2, ubicando su epicentro al noroeste de San Juan y La Rioja. Una de sus particularidades fue las grandes perturbaciones del terreno aún en áreas muy alejadas al epicentro. Se produjeron deslizamientos y fenómenos de licuefacción, agrietamiento del terreno, volcanes de arena y salida de agua en forma de chorros.

La licuefacción es uno de los efectos que acompañó a todos los terremotos ocurridos en nuestra región. Las grietas, volcanes de arena, derrames, han sido muy abundantes en áreas distantes hasta 260 km del epicentro, y afectaron áreas de hasta 4000 km<sup>2</sup>. Los daños causados por la licuefacción incluyen hundimientos del suelo por falta de poder portante debajo de edificaciones, caminos, líneas férreas, canales de riego, campos, tanques y viviendas. Los depósitos holocenos de llanura aluvial, paleocanales y playa han sido la litología principalmente afectada por este fenómeno.

Por ello, el estudio de los terrenos que pueden ocasionar procesos de licuefacción durante la ocurrencia del movimiento sísmico y aquellos terrenos que presentan las condiciones físicas y litológicas para sufrir ese proceso en las áreas densamente pobladas de los valles de la región centro oeste de Argentina, resulta un campo de investigación prioritario para realizar una adecuada planificación urbana.

**Key words:** Earthquake. Liquefaction. Hazard. Seismogenic sources. Tulum valley.

**Palabras clave:** Terremoto. Licuefacción. Peligro. Fuentes sísmogénicas. Valle del Tulum.

<sup>1</sup> CONICET- Dpto. Geología

<sup>2</sup> Gabinete de Neotectónica - INGENIO - FCFN - UNSJ. E-mail: lperuca@unsj-cuim.edu.ar - hubastiasj@infovia.com.ar

## Introducción

El terremoto del 27 de octubre de 1894 es considerado por sus efectos a grandes distancias del foco, como el más importante de Argentina. Bodenbender, (1894) denominó este sismo “*Terremoto Argentino*» y le asignó una magnitud 8.2, localizando su epicentro al noroeste de San Juan y La Rioja. Este sismo se caracterizó por la presencia de abundantes fenómenos de licuefacción y de remoción en masa aún en áreas muy alejadas al epicentro, a más de 200 km de distancia en línea recta del sitio epicentral determinado por este investigador. Bodenbender le asignó una importancia fundamental a la presencia de agua subterránea en la formación de estas estructuras y estableció que estos efectos se producirían en los suelos de los valles y llanuras formados por depósitos blandos de arenas, arcillas y rodados con el agua subterránea a poca profundidad. Este análisis del fenómeno de licuefacción constituye uno de los primeros realizados en el país para este tipo de efectos.

La licuefacción fue uno de los efectos que caracterizó a todos los terremotos ocurridos en nuestra región. Las grietas, volcanes de arena, derrames, han sido muy abundantes en áreas distantes hasta 260 km del epicentro, y afectaron áreas de hasta 4000 km<sup>2</sup>. Los daños causados por la licuefacción incluyen hundimientos de suelo debajo de edificaciones, caminos, líneas férreas, canales de riego, campos, tanques y viviendas. Los depósitos holocenos de llanura aluvial, playa y paleo canales fueron prácticamente las litologías afectadas por este fenómeno.

Por ello, el estudio de los suelos susceptibles de sufrir licuefacción y sus efectos en las áreas más densamente pobladas de nuestra región, resulta indispensable para realizar una adecuada planificación urbana.

## Terremotos de San Juan

El registro de sismos históricos en esta región del país comienza aproximadamente a principios del siglo XVII, con la llegada de los primeros colonizadores españoles. Sin embargo, como la densidad poblacional en esa época era muy baja o nula, sumado al marcado aislamiento que sufrían los pobladores, sólo se registraron los eventos catastróficos. Muchos de los sismos cuyos epicentros los historiadores ubicaron en Chile entre los 28° y 30° de latitud sur, podrían haber ocurrido realmente en el lado argentino. La casi inexistencia de pobladores en esta parte del país fue quizás la causa principal de la falta de registros que mencionen tales eventos.

Es poco probable que esta falta de datos sea representativa de un ciclo asísmico regional anterior al siglo XIX, ya que la información Neotectónica recopilada tanto en San Juan como en Mendoza indica que el rango de actividad ha sido continuo a través del gran parte del Cuaternario.

**Terremoto de 1894:** El terremoto del 27 de octubre de 1894 tuvo su epicentro en el noroeste de las provincias de San Juan y La Rioja y se considera uno de los más importantes ocurridos en territorio argentino.

La Academia Nacional de Ciencias y Universidad Nacional de Córdoba envió al Dr. Guillermo Bodenbender entre otros investigadores a esta región para profundizar los estudios sobre este sismo. Por ello este evento es uno de los mejores documentados en Argentina para el siglo XIX. Bodenbender (1894) realizó una excelente revisión geológica, describió las características del sismo y ubicó el epicentro en el noroeste de la provincia de San Juan, en el límite con La Rioja. Denominó a este sismo “*Terremoto Argentino*», al cual le asignó una magnitud de 8.2. Bastias, (1986) determinó una magnitud de 7.5 considerando longitudes de rotura probables en la falla y un dato máximo de 8.5 considerando el momento sísmico de probables roturas históricas. Es muy probable que la magnitud del terremoto Argentino sea menor que la asignada por Bodenbender, quien determinó

una magnitud mayor probablemente al observar los grandes daños que ocasionaron los extensos e importantes fenómenos de licuefacción que caracterizaron a ese terremoto, ocasionando un aumento aparente de los efectos del mismo. Según las crónicas de la época, el sismo fue sumamente fuerte y se produjo a las 16 horas, 25 minutos de un día sábado, fue de carácter ondulatorio y larga duración; causó alarma en gran parte de la Argentina y se percibió con distinta intensidad en Chile, sur de Brasil y Perú. Algunas particularidades de este sismo fueron las grandes alteraciones del terreno aún en áreas muy alejadas del epicentro. Perucca (1995) describe fenómenos de licuefacción, con agrietamiento del terreno, volcanes de arena y salida de agua en forma de chorros de hasta 2 metros de altura en los terrenos saturados de agua y sin cohesión a más de 200 km del epicentro (Figuras 1 y 2).

El diario La Unión del día 2 de noviembre de 1894 se refiere a interesantes fenómenos ocurridos en el departamento Iglesia donde señala arroyos que salieron de sus cauces naturales y formaron lagunas, caída de masas de tierra en los barrancos y generación de grandes grietas de las que surgía el agua. También describe la aparición y desaparición de manantiales y «en la zona de La Jarilla, camino a Copiapó, se han abierto muchas grietas, zanjas hondas y campos pantanosos, esto es, en el área del río Blanco»

Las zonas más afectadas fueron las provincias de La Rioja y San Juan, con alrededor de un centenar de muertos. La violencia del sismo fue aumentando hacia el norte de la ciudad de San Juan, y hacia el oeste de la ciudad de La Rioja, con un máximo en las localidades de Iglesia, Rodeo, Jáchal, Mailimán, Pismanta, Huaco, Villa Unión y Mogna. En Jagüel, Vinchina, Unión, sólo cayeron algunas casas, lo mismo que en Guandacol (Aceñolaza, 1972).

En el departamento de Iglesia, provincia de San Juan, se registraron numerosas casas caídas con 7 muertos. Las que no cayeron, quedaron inhabitables. Se registró un total de 20 muertos entre las poblaciones de Rodeo, Iglesia y Angualasto, mientras que en Las Flores, el número ascendió a 8. También fueron afectadas intensamente las poblaciones de Jáchal, Malimán y Tucunuco. En la ciudad de Jáchal no hubo víctimas pero se destruyeron numerosos edificios y las fachadas de los templos.

El número de muertos fue reducido debido a la baja densidad poblacional de la época y a la hora; además porque el fenómeno fue precedido de ruidos y pequeños movimientos sísmicos denominados premonitores que dieron tiempo a la gente abandonar sus casas. Sin embargo, en las poblaciones ubicadas en el valle de Iglesia, el sismo fue rápido y violento, lo que evidencia la proximidad del epicentro.

En la ciudad de San Juan los daños materiales fueron cuantiosos y cayeron gran parte de las cornisas y antepechos; se destruyó una de las torres de la catedral y la nave central quedó averiada. También fueron destruidas algunas iglesias y el teatro. El puente de Alto de Sierra construido el año anterior también tuvo que ser reparado, al igual que el de Caucete, posiblemente a causa de los efectos de licuefacción en los márgenes del río San Juan.

En las localidades de Angaco y Albardón, debido a las características de sus suelos, se produjeron fenómenos de licuefacción y roturas en los canales de regadío, con enormes daños en los cultivos. Se formaron grietas en el terreno de hasta 50 cm de ancho, con emanación de agua y arena y hundimientos del terreno. También San Martín y Caucete sufrieron cuantiosos daños por la formación de grietas, hundimiento del terreno y salida de agua y arena.

En la provincia de La Rioja se sintió con gran intensidad en las localidades de Villa Unión, donde se registraron fenómenos de licuefacción. En el camino entre la sierra de Velazco y Famatina se produjo un gran número de deslizamientos, como así también en Tinogasta. En la capital riojana se registró la caída de casas e iglesias, y también se reconocen en los relatos fenómenos de licuefacción a más de 200 km de distancia al sitio epicentral asignado por Bodenbender.

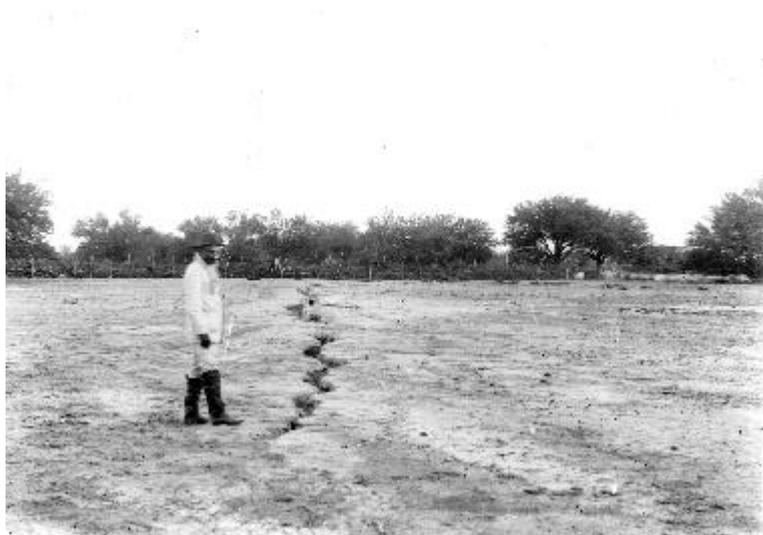
En la provincia de Mendoza fue percibido en la ciudad capital y en la localidad de La Paz, con caída de revoques y paredes viejas.

En San Luis se sintió un fuerte temblor con averías en algunas construcciones y en Córdoba hubo roturas de casas viejas y agrietamiento en algunas iglesias. Con menor intensidad fue percibido en numerosas ciudades del litoral, norte argentino y en la provincia de Buenos Aires. Se mencionan en los diarios de la época numerosas réplicas, por lo menos 8 de gran intensidad.

A partir del sismo de 1894 comenzaron a realizarse en la zona estudios geológicos y sismológicos; los gobernadores de San Juan y Mendoza instaron a los técnicos de la época a intensificar sus investigaciones.



**Fig. 1.** Fenómenos de licuefacción en Albardón durante el terremoto de 1894.



**Fig. 2.** Grieta en Mogna. Terremoto de 1894.

**Terremoto de 1944:** El 15 de enero de 1944, a las 20 horas 49 minutos se produjo un sismo que duró 15 o 20 segundos destruyendo la ciudad de San Juan casi completamente. Alcanzó una magnitud de 7,4 en la escala de Richter y una intensidad IX en la escala Mercalli (INPRES, 1993).

La zona de máxima intensidad fue comparativamente reducida y abarcó unos 200 km<sup>2</sup>. El epicentro fue ubicado a 20 km al norte de la ciudad, en la localidad de La Laja y el sismo fue percibido en las ciudades de Córdoba y Buenos Aires.

En comparación con los otros grandes sismos ocurridos en la provincia de San Juan (27 de octubre de 1894 y 23 de noviembre de 1977), este sismo fue de relativamente corta duración y de menor área total de percepción del fenómeno. El área de mayor destrucción se localizó en la ciudad de San Juan, especialmente en el norte y en el departamento Albardón y alledaños.

Durante el terremoto de 1944 se registraron numerosos fenómenos de licuefacción, con la surgencia de aguas y la formación de volcanes y cráteres de arena, no sólo en el departamento Albardón sino también en localidades vecinas (Figura 3).

El puente de Albardón, que atraviesa el río San Juan y une los departamentos Albardón con la ciudad de San Juan, sufrió daños en el estribo norte debido a fenómenos de licuefacción, con grietas que lo dislocaron. También por la misma razón hubo agrietamiento de la ruta, a ambos lados de la losa de hormigón y en el terraplén de la ruta 40.

En la localidad de Las Lomitas, entre La Laja y Albardón la mayoría de las casas fueron destruidas. En los Baños de La Laja las fuentes termales sufrieron una modificación pasajera en su caudal y las piletas se agrietaron, mostrando algunas de ellas rechazo de los bloques.

En las canteras de travertino ubicadas unos 5 km al norte de los baños, el sismo fue de gran intensidad y los efectos de considerable importancia, las casas construidas con bloques de travertino orientadas de norte a sur se cayeron y de las salas de máquinas cortadoras saltaron numerosas piezas. Se originaron grietas de las que surgió un agua sulfurosa y termal (Castellanos, 1945).

En la quebrada de Ullum y sierra de Tontal se produjo caída de rocas y deslizamientos y en las localidades de Zonda y Ullum se originaron hundimientos de áreas cultivadas y formación de grietas con escapes de agua y arena.



Fig. 3. Cráter de arena en Albardón. Enero de 1944.

**Terremoto de 1977:** A las 6:36 am (hora local) en la mañana del 23 de noviembre de 1977, un fuerte terremoto ( $M=7,4$ ) ocurrió en la provincia de San Juan, causando 70 víctimas y daños sustanciales en la propiedad (INPRES, 1993). Gran parte de los daños producidos en la propiedad fue resultado de la licuefacción de los suelos. Los efectos causados por licuefacción fueron los más espectaculares y extendidos del terremoto. Se produjeron grandes grietas de cientos de metros de largo por varios metros de ancho, acompañadas por volcanes de arena de algunos metros de diámetro. Los daños en la propiedad causados por licuefacción incluyeron edificios, canales, rutas, vías férreas y cultivos afectados (Figuras 4 y 5). Además, los suelos debilitados por licuefacción afectaron tanques, torres y otras estructuras. Los daños experimentados en los cimientos por algunas estructuras edificadas bajo la reglamentación existente, se debieron a licuefacción.

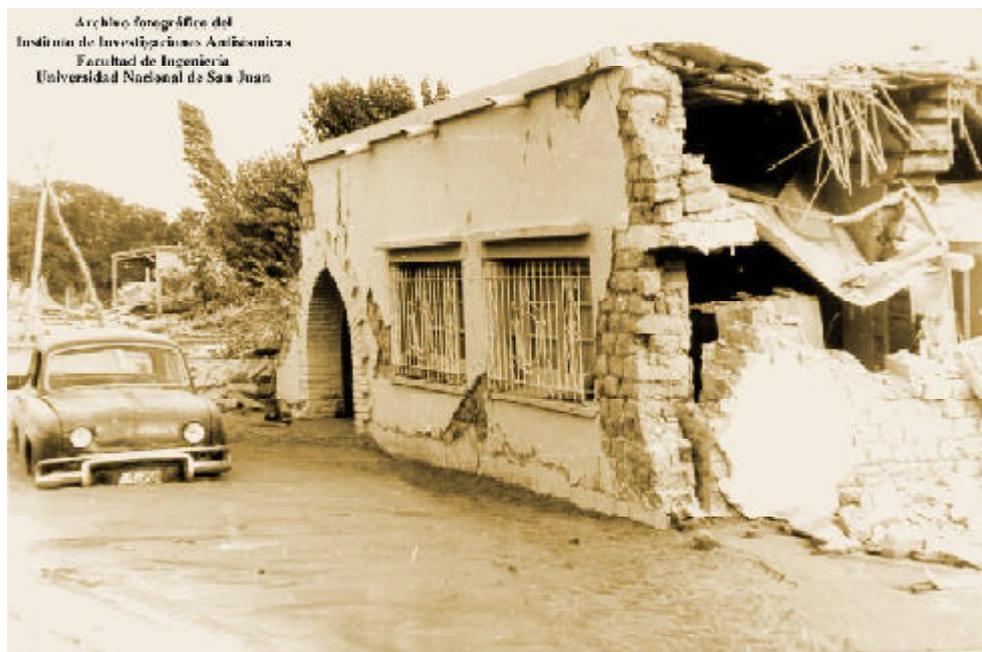
La licuefacción fue uno de los efectos principales del terremoto del 23 de noviembre de 1977. Los efectos de la licuefacción, grietas, volcanes de arena, etc, fueron abundantes en un área discontinua de 2000 km<sup>2</sup>, a 70 km del epicentro. También se encontraron esporádicamente distribuidos en un área de 4000 km<sup>2</sup>. Se observaron volcanes de arena a una distancia de 260 km del epicentro. Los daños causados por la licuefacción incluyeron fallas debajo de edificaciones, caminos, líneas férreas, canales de riego, campos, tanques y casas inundadas de arena y agua de los volcanes que se formaron en el interior de las mismas.

Los depósitos holocenos de llanura aluvial y playa y los paleocauces arenosos fueron prácticamente los depósitos afectados por licuefacción. Estos depósitos demostraron ser altamente susceptibles a la licuefacción en terremotos pasados. Se originaron volcanes de arena e inclinaron tanques y torres. Dos torres y 9 tanques de vino se inclinaron hasta 5° a causa de la licuefacción de los sedimentos bajo sus bases de hormigón. También se formaron cráteres de varios metros de diámetro erosionados por el agua que provocaron la caída de casillas y fundaciones.

Es interesante destacar que durante este terremoto se identificó una ruptura nueva en el sistema de fallamiento Niquizanga, el cual se manifestó con una importante deformación del terreno evidenciada por sucesivas mediciones geodésicas sobre la línea N° 23 (Volponi y Sisterna, 1980).



**Fig. 4.** Volcanes de arena en Caucete. Terremoto de 1977.



**Fig. 5.** Licuefacción en Caucete. Terremoto de 1977.

## Fuentes Sismogénicas

La provincia de San Juan posee numerosas evidencias de fallamiento que afectan sedimentos modernos. Bastías (1986), agrupó las mismas en Sistemas de Fallamiento, relacionados con límites de unidades geológicas principales, denominando Sistemas de falla a las mayores zonas de falla subparalelas de similares características.

Perucca y Paredes (2004) efectúan una descripción de los sistemas de fallamiento moderno de acuerdo al siguiente agrupamiento (Figura 7):

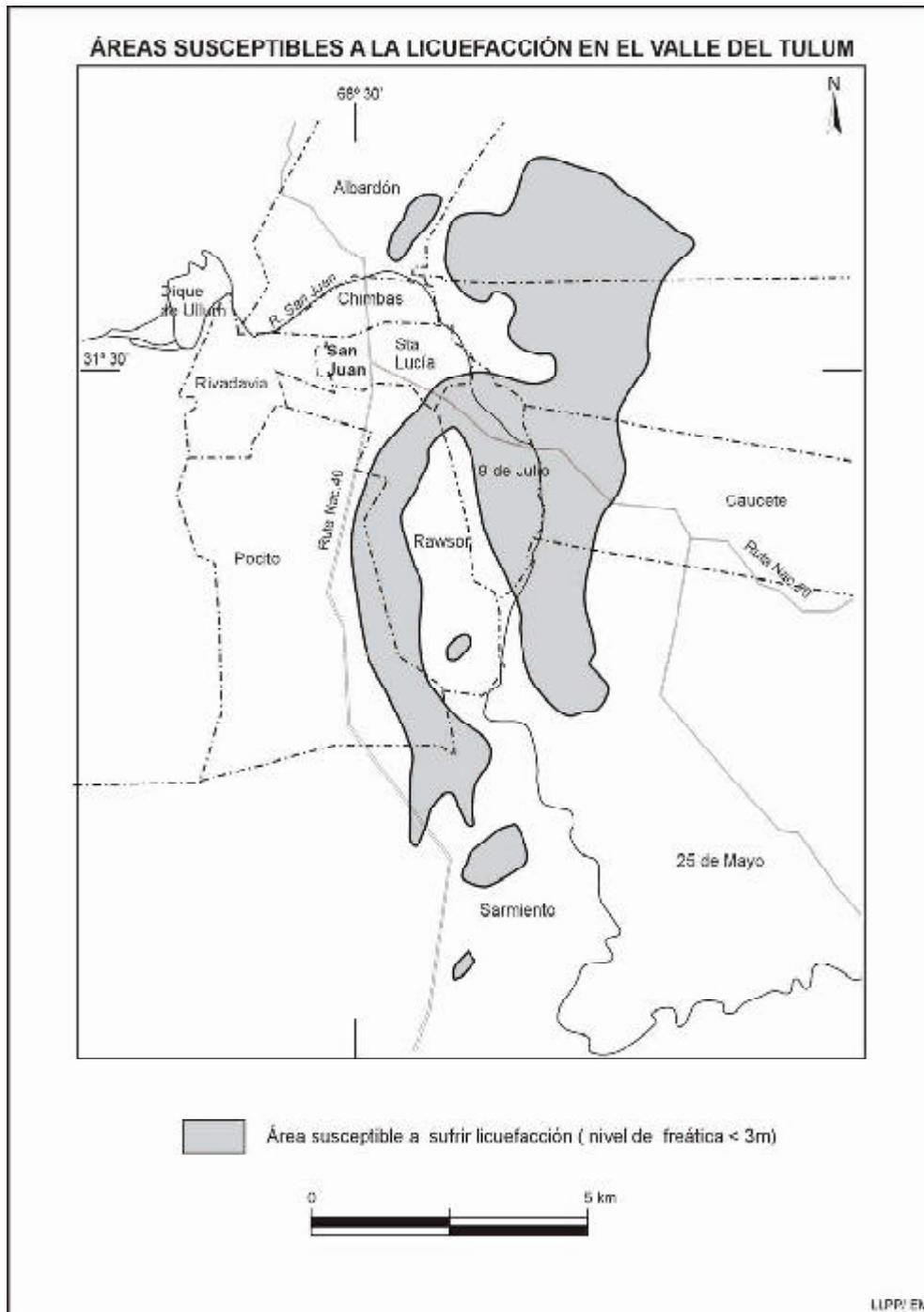
- 1- Sistema de Fallamiento Las Chacras
- 2- Sistema de Fallamiento Ampacama-Niquizanga
- 3- Sistema de Fallamiento Precordillera Oriental
- 4- Corredor Tectónico Matagusanos-Maradona-Acequión
- 5- Sistema de Fallamiento El Tigre
- 6- Falla La Cantera
- 7- Fallas Yalguaraz, Puesto Tapia y Lomas Bayas

### **1 - SISTEMA DE FALLAMIENTO LAS CHACRAS**

Este sistema se ubica en el faldeo occidental de las sierras de Valle Fértil-La Huerta, departamento Caucete, a 110 kilómetros al noreste de la ciudad de San Juan.

El Sistema de Fallamiento Las Chacras posee aproximadamente 60 km de evidencias continuas de actividad que afectan depósitos del Cuaternario. Esta compuesto por fallas inversas buzantes al este con una importante componente de desplazamiento lateral izquierdo y un rumbo norte 35° al oeste.

Bastías (1986) determina un rango de movimiento vertical de unos 0,4 mm/año y horizontal de 0,1mm/año, mientras que la magnitud del sismo máximo posible oscilaría entre 6 y 7.5.



**Fig. 6.** Áreas en el valle del Tulum que pueden sufrir licuefacción en caso de un sismo destructivo.

## **2- SISTEMA DE FALLAMIENTO AMPACAMA - NIQUIZANGA**

Con este nombre se agrupan las escarpas cuaternarias localizadas en el piedemonte oriental de la sierra de Pie de Palo. El área con fallas cuaternarias se extiende por unos 70 km y la componen numerosos segmentos de falla cuyas longitudes no superan los 8 kilómetros, y con un rumbo general de aproximadamente N20°E.

Los cálculos realizados por Bastias (1986) para determinar la magnitud máxima de un sismo probable, siguiendo distintas metodologías arrojó valores de M variables entre 6.8 y 7.1 y un rango de movimiento de 0,1mm/año. Durante el sismo de Caucete en 1977, de M=7.4, utilizando los datos de cuerpo de ondas se obtuvo un mecanismo focal de falla inversa que inclina al este (Bastias, 1986), pero las evidencias de rotura en el terreno se produjeron a lo largo de una estructura de graben con desplazamientos verticales máximos de 0.80cm. Este graben podría estar representando el área distensiva de la parte superior de un desplazamiento en falla inversa buzando al este, como lo sugieren escamas de basamento que se localizan sobre secuencias terciarias en el extremo norte de la falla sistema Niquizanga.

## **3- SISTEMA DE FALLAMIENTO PRECORDILLERA ORIENTAL**

Este sistema se localiza en el borde este de Precordillera oriental, con una longitud aproximada de 120 kilómetros. En la bajada oriental de los cordones montañosos, la preservación de los rasgos de fallamiento es muy buena, distinguiéndose en numerosos sectores escarpas a contrapendiente, paralelas y con su cara libre hacia el oeste. Estas fallas subparalelas afectan los distintos niveles de abanicos aluviales, conos-glacis, lomadas pedemontanas y terrazas. Perucca y Paredes (2004) describen las siguientes áreas de fallamiento:

- Rinconada - Las Tapias - Segmento Tapias - La Laja - Segmento Tapias - Villicum
- Los Berros
- Cerro Salinas
- Tulum

Tello y Perucca, (1993) estiman para este sistema, un sismo máximo potencial entre 6.7 y 7.4 Bastias (1986) estima un rango de movimiento de 0,6 mm/año.

Al segmento de falla Tapias - La Laja se lo relaciona con el sismo del 15 de enero de 1944 que destruyó la ciudad de San Juan y cuya magnitud fue de 7.4 con un desplazamiento de 30 cm a 60 cm. El epicentro del sismo del 11 de Junio de 1952 con una magnitud de 7, se localizó en el área de fallamiento Rinconada.

## **4- CORREDOR TECTÓNICO MATAGUSANOS-MARADONA-ACEQUIÓN**

El denominado "Corredor tectónico" Matagusanos-Maradona-Acequiión es una depresión tectónica elongada y de rumbo meridional, ubicada en la porción central de la provincia de San Juan, entre las unidades morfoestructurales de Precordillera central por el oeste y Precordillera oriental por el este. Separa dos ambientes estructurales diferentes, uno oriental en donde las fallas poseen escarpas con la cara libre al oeste y otro occidental donde las escarpas miran al este. La inversión de estas estructuras se produce a escasos 1,5 kilómetros al este de los cordones montañosos de Precordillera central. Los valores empíricos obtenidos por Perucca y Paredes (2004) para el sismo máximo probable oscilan entre 6.0 y 7.25. Bastias (1986) determina un rango de movimiento de 0,3 mm/año.

## **5- SISTEMA DE FALLAMIENTO EL TIGRE**

El Sistema de Fallamiento El Tigre se ubica en el borde occidental de Precordillera, entre los 26° y 33° de latitud sur y 69° longitud oeste. Se extiende desde las proximidades de la laguna La Brava, en

la provincia de La Rioja hasta el cordón de Cortaderas en la provincia de Mendoza. Este sistema se dispone paralelo al borde continental y su longitud se estima en aproximadamente 400 km. Se evalúa en la actualidad la extensión del sistema en ambiente de Puna, con una extensión probable de 400 km más en sistemas de fracturación que se relacionan al borde oeste del cratón precámbrico-paleozoico inferior. Los segmentos de falla muestran fuertes indicios de actividad cuaternaria con desplazamientos horizontales de abanicos aluviales de magnitudes cercanas a los 200 m.

Bastías (1986) divide al sistema en tres áreas de fallamiento principal de acuerdo a sus características:

- Area Norte
- Area Centro
- Area Sur

Bastías (1986) determina un rango de movimiento para el total del sistema en 2 a 3 mm/año y una magnitud máxima probable superior a 7.5. sólo considerando aparentes longitudes de rotura. Bodenbender (1894) asigna una magnitud de 8.2 al "Terremoto Argentino" de 1894 probablemente influenciado por la magnitud de los fenómenos de licuefacción.

#### **6- FALLA LA CANTERA**

Esta falla con actividad cuaternaria se ubica en el faldeo occidental de la sierra de La Cantera, al norte del río San Juan, en donde posee evidencias de actividad moderna muy notorias. Su longitud es de aproximadamente 20 kilómetros con buenos indicios de actividad holocena donde el trazo de la falla corta el río de Gualilán, en la que el curso fluvial ha sido desplazado elevándose el bloque oeste. No se conocen sismos históricos asociados a esta falla pero su evidencia de actividad actual es muy notoria

#### **7- FALLAS YALGUARAZ, PUESTO TAPIA Y LOMAS BAYAS**

El frente serrano en las estribaciones sur occidentales de la sierra de Ansilta posee dos tramos con rasgos morfotectónicos diferentes, ellos son, el sector al este de la ciénaga de Los Avestruces, y el sector al noreste de la ciénaga de Yalguaraz. En el primer tramo, el borde serrano es de mayor altitud y está limitado por la falla Puesto Tapia de rumbo NNO y N-S y los abanicos aluviales holocenos se desarrollan junto a la línea de falla. En el noreste de la ciénaga de Yalguaraz el borde serrano es más bajo y está delimitado por una falla transversal de rumbo noroeste denominada falla Lomas Bayas. Los afloramientos de rocas paleozoicas en el sector distal del piedemonte conforman un bloque positivo limitado en su borde sureste por la falla Yalguaraz de rumbo noroeste (Cortes y Costa, 1993).

### **Fenómenos de licuefacción**

La licuefacción es la disrupción in situ del soporte mutuo entre granos, generalmente por una sacudida sísmica, en la que se produce la pérdida total o parcial de la resistencia de cizalla de los materiales afectados. En suelos sin cohesión, la transformación de un estado sólido a líquido es el resultado del aumento de la presión de los poros que disminuye el coeficiente de fricción durante un terremoto. El suelo completamente saturado, con arenas sin cohesión, generalmente limpias, que pueden incluir algo de gravas puede ser licuefactado durante la sacudida sísmica por la propagación de las ondas de cizalla (Rodríguez Pascua, 1997).

Los sedimentos arenosos sin cohesión y los depósitos de limos suelen tener una resistencia de cizalla alta, soportando grandes cargas sin producirse alteraciones en su estructura interna. Pero bien por causas naturales o artificiales, se puede producir la pérdida de resistencia de esos materiales,

cambiando su estado para pasar a comportarse como líquidos viscosos. El mecanismo que afecta a este cambio de estado, de sólido a líquido, es la licuación que genera depósitos licuefactados (Allen, 1977). Esta pérdida de cohesión puede producir desplazamientos a favor de la pendiente o inyecciones de materiales licuefactados en respuesta a gradientes de presión

Los ambientes sedimentarios más favorables para la génesis de licuefacciones son: playas, barras arenosas y sistemas fluviales, ambientes lacustres y fluviolacustres.

Para que se produzcan inyecciones en filón y cráteres de arena es necesaria una capa de arena de al menos 3 m de potencia. Una composición del 95% de sílice en arenas de grano medio a fino favorece el fenómeno y la mayor probabilidad de licuefacción se da entre la superficie topográfica y los 6 a 7 m de profundidad como máximo y por encima de los 3 m de profundidad del nivel freático.

Los factores condicionantes son:

- Edad de los materiales sedimentarios: con terremotos actuales no se produce licuefacción en materiales más antiguos que el Pleistoceno.
- Profundidad de la lámina de agua (nivel freático). La probabilidad de licuefacción disminuye mucho por debajo de los 3 m del nivel freático, sólo en condiciones particularmente inestables y con magnitudes mayores que 7.5 se genera licuefacción por debajo de este nivel.
- Tamaño de grano: arena de tamaño medio a fino
- Densidad y cohesión de los sedimentos: Cuando los materiales son más antiguos, en general son más densos y cohesivos. A mayor densidad, se necesita mayor presión intersticial para que se produzca la licuefacción.
- Origen de los sedimentos: altas tasas de sedimentación favorecen la licuefacción (sedimentos de grano fino, lacustres y fluviales)
- Potencia de los sedimentos: espesores mínimos de arenas de 3m (o de alternancia de arenas y limos)
- Aceleración interna: depende de la amplitud de la onda sísmica y varía en función de los mecanismos focales del sismo y parámetros locales de los materiales.
- Obermeier (1994) y Moretti *et al.* (1995) coinciden en señalar que sismos de magnitud 6 pueden generar estructuras de licuefacción en un radio de 40 km. Audemard y De Santis (1991) estudian estructuras de licuefacción a 25 km del epicentro, para sismos de magnitud 5 a 5,7. Para terremotos de magnitud 7 según Seed (1968) el radio en el que se pueden dar licuefacciones es de 70 km y para sismos de magnitud 8 o superior, el radio pasaría a ser de 100 km (Moretti *et al.*, 1995). Sin embargo, en los sismos con características destructivas en la provincia de San Juan (1894, 1944, 1977), con magnitud superior a 7, se registró licuefacción a distancias de hasta 260 km en línea recta al epicentro. Este fenómeno es un punto de análisis donde se involucran varias condiciones, desde la forma de transmisión de ondas sísmicas, los tipos de suelos, hasta la variación de los niveles freáticos en las subcuencas que forman el Valle de Tulum.

## Licuación en el Valle del Tulum

El valle del Tulum es una depresión colmada por sedimentos y sedimentitas del Cuaternario y del Terciario que contiene una cuenca de agua subterránea de unos 3.700 Km<sup>2</sup> de extensión. Su base impermeable está integrada básicamente por rocas de edad terciaria que presentan una topografía ondulada vinculada a pliegues y fallas.

Los sedimentos cuaternarios que rellenan la cuenca, fueron depositados principalmente por el río San Juan, curso que ha construido un amplio cono y una llanura aluvial. Estos sedimentos constituyen el reservorio de agua subterránea de la cuenca del Valle de Tulum y poseen espesores variables entre unas decenas hasta 600 a 700 m, albergando acuíferos de tipo libre y confinados.

Su principal fuente de recarga es el río San Juan y tiene lugar aguas abajo del embalse de Ullum en la zona apical y media del cono aluvial.

La zona de descarga de los acuíferos está representada por las áreas de freática elevada que se localizan en el sector distal del cono aluvial, de donde nacen dos cauces naturales: los arroyos Los Taponés y Agua Negra. La profundidad del agua subterránea está comprendida entre escasos centímetros y 15 m.

Los principales sismos ocurridos tanto en la provincia de San Juan como en el resto del país, han ocasionado licuefacción en los depósitos susceptibles en sistemas fluviales, lacustres y fluvio-lacustres. Los depósitos de la llanura aluvial del río San Juan, con arenas, limos y arcillas y con el agua subterránea cerca de la superficie, amplifican los movimientos de terreno originados por terremotos (Figura 6). Es decir, se pueden producir aceleraciones del terreno significativamente mayores que en el área correspondiente al cono aluvial, donde predominan las gravas y el agua subterránea se encuentra a mayor profundidad.

Bodenbender, ya en 1894 determinó la influencia de la profundidad del nivel freático en la generación de estas estructuras de licuefacción y afirmó que estos efectos se producirían en los suelos de los valles y llanuras formados por depósitos modernos blandos de arenas, arcillas y rodados con el agua subterránea a poca profundidad.

La época del año de ocurrencia del sismo también es de suma importancia, ya que en los meses de enero a agosto, el nivel freático se encuentra a mayor profundidad que en los meses de septiembre a diciembre, época de los deshielos en cordillera donde la profundidad varía entre uno y tres metros, favoreciendo la licuefacción.

Atkinson (1984) considera que a partir de sismos de magnitud 5, bajo condiciones propicias, es posible encontrar estructuras de licuefacción. Cuanto mayor sea la magnitud del terremoto, a mayor distancia del epicentro se producirá licuefacción. Durante los sismos ocurridos en la provincia de San Juan, los efectos secundarios se produjeron a grandes distancias de los epicentros y afectaron extensas regiones si se compara con sus magnitudes. Es probable que, si están dadas las condiciones físicas necesarias en el terreno, aunque el movimiento no sea de gran intensidad, ocurra la licuefacción de los suelos.

## **Paleolicuefacción**

El reconocimiento de procesos de licuefacción en una secuencia lacustre en la quebrada del río Acequión, ubicados al sur de la provincia de San Juan y asociados a la neotectónica del área constituyen un aporte al estudio de los *efectos secundarios* de un terremoto. La preservación de estos fenómenos en el registro geológico son evidencias paleosísmicas de terremotos. Componen herramientas muy valiosas para el estudio de la sismicidad de un área que posee un corto registro histórico de los sismos más importantes. Este registro en la Argentina comienza aproximadamente a principios del siglo XVII, con la llegada de los primeros colonizadores españoles. Sin embargo, como la densidad poblacional en la región en esa época era muy baja o nula, sólo se registraron los eventos catastróficos ocurridos en los últimos años.

En el área de Acequión, Paredes y Perucca (2002) identificaron depósitos lacustres cuaternarios con un área aproximada de 6 km<sup>2</sup> y describieron numerosas estructuras de paleolicuefacción. El estudio de estas estructuras ha permitido discernir claramente la ocurrencia de dos paleosismos y la probable presencia de un tercer evento sísmico de magnitud superior a 5 que han quedado registrados en la secuencia sedimentaria de edad cuaternaria localizada en la quebrada del río Acequión.

La identificación en el área de estructuras asociadas a terremotos prehistóricos, permitiría extender el registro sísmico en la región de Mendoza y San Juan. Estos eventos sísmicos podrían estar asociados a las fuentes sismogénicas conocidas, tales como el Sistema de fallamiento Precordillera

Oriental y el denominado “Corredor tectónico Matagusanos – Maradona – Acequión- cerro La Cal. De esta manera, los estudios de paleosismicidad constituyen un aporte esencial para la determinación del riesgo sísmico en la región centro –oeste de la Argentina.

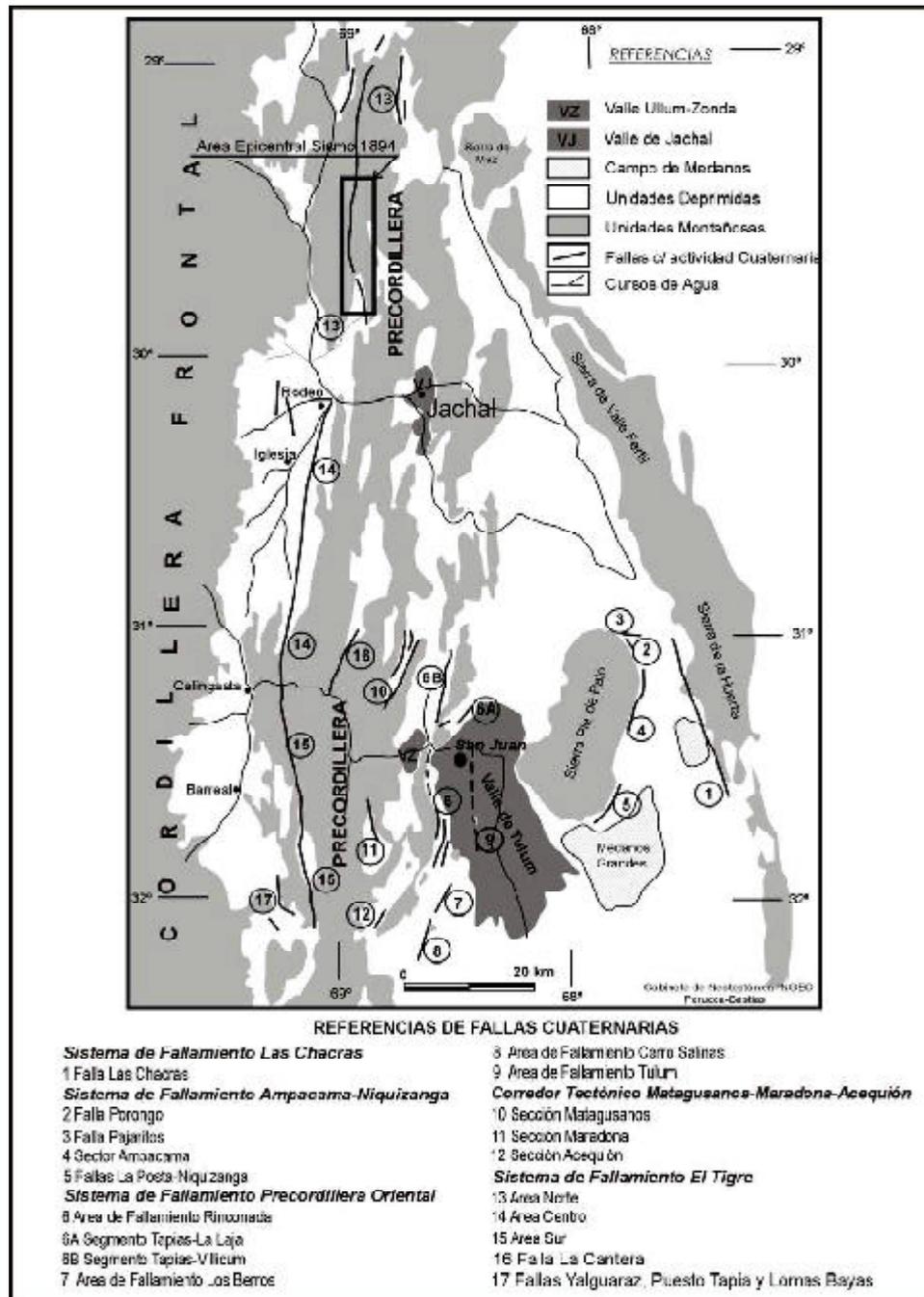


Fig. 7. Zona epicentral del terremoto de 1894 y ubicación de Fallas con actividad cuaternaria .

## Conclusiones

La provincia de San Juan, al igual que la mayoría de las ubicadas en las regiones sísmicas de nuestro país, tienen muy poca información histórica prehispánica y durante los trescientos años posteriores a sus respectivas fundaciones. Es probable que este blanco en la información histórica se debiera a la escasa densidad de la población, a momentos políticos que movieron a las corrientes fundadoras del este cordillerano y a la ignorancia de la cultura y costumbres de los indígenas de estas regiones por parte de los colonizadores.

La identificación en el área de Acequión de estructuras asociadas a terremotos históricos, permite extender el registro sísmico histórico en la región de Mendoza y San Juan

A los fines de realizar una correcta planificación urbana y rural, y minimizar los efectos de un sismo de magnitud mayor a 5, el cual es muy probable que ocurra en un futuro próximo, se deben considerar las áreas susceptibles a sufrir fenómenos de licuefacción. Estas son:

- Áreas que han experimentado licuefacción durante terremotos históricos
- Todas las áreas de rellenos no compactados que contienen materiales potencialmente licuefactables saturados, casi saturados o que se espera que estén saturados en un futuro.
- Aquellas áreas cuyos estudios geotécnicos existentes indican que los suelos son potencialmente licuefactables.
- Áreas donde los estudios geotécnicos son insuficientes.

En el valle del Tulum existe un franja de rumbo meridional susceptible a sufrir licuefacción, ubicada en la porción distal del abanico fluvial por lo que, aun cuando se construya bajo normas sismorresistentes, la falta de estudios de los suelos en los que se asientan nuestras poblaciones, puede provocar grandes pérdidas económicas, no sólo en las edificaciones sino también en las comunicaciones, pozos de agua, caminos, gasoductos, líneas eléctricas, etc. Un ejemplo reciente durante el terremoto de 1977, fueron los importantes daños ocurridos en el barrio Justo P. Castro, de Caucete, donde casas con construcción sismorresistente fueron hundidas debido a su construcción sobre un paleocauce saturado de agua.

Si bien se conocen numerosos casos en el mundo en los que sismos de magnitud 7 a 8 han originado fenómenos de licuefacción a distancias de hasta 100 km del epicentro, en nuestra provincia, los sismos registrados en épocas históricas, como los de 1894, 1944 y 1977 (con magnitudes 7.4 y 7.5) han producido licuefacción a distancias de más de 200 km de sus epicentros. Las condiciones físicas del terreno y la existencia de un nivel freático poco profundo, son factores de amplificación local y reafirman la necesidad de efectuar estudios de detalle en el área del valle de Tulum y en la región centro oeste del país cuyas ciudades se encuentran localizadas en áreas con características semejantes.

## Referencias

- Aceñolaza, F., 1972. Terremoto en La Rioja. *Revista Todo es Historia*, Nº 58: 32-42.
- Allen, J., 1977. The possible mechanics of convolute lamination in graded sand beds. *J. Geol. Soc. London*, 134: 19-31
- Atkinson, G., 1984. Simple computation of liquefaction probability for seismic hazard applications. *Earthquake Spectra*, 1 (1): 107-123.
- Audemard, A. y De Santis, F., 1991. Survey of liquefaction structures induced by recent moderate earthquakes. *Bulletin International Association Engineering Geol.*, nº 44: 4-16.
- Bastias, H. 1986. Fallamiento Cuaternario en la región sismotectónica de Precordillera. *Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan*, 154 pp. (Inédito).

- Bastias, H., Uliarte, E., Paredes, J., Sánchez, A., Bastias, J., Ruzycski, L. y Perucca, L. Neotectónica de la Provincia de San Juan. *Relatorio de Geología y Recursos Naturales de la Provincia de San Juan. Décimo Primer Congreso Geológico Argentino*: 228-244.
- Bodenbender, G., 1894. El terremoto argentino. Del 27 de octubre de 1894. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias en Córdoba*. Tomo XIV: 293-329.
- Castellanos, A., 1945. Cuatro Lecciones sobre terremotos. Parte B: El terremoto de San Juan. *Asociación Cultural de Conferencias de Rosario*. Publicación N° 6:77-243.
- Cortes, J. y Costa, C., 1993. La deformación cuaternaria pedemontana al norte de la Pampa Yalguaraz, margen occidental de la Precordillera de San Juan y Mendoza. *Duodécimo Congreso Geológico Argentino y Segundo Congreso de Exploración de Hidrocarburos*. Actas, Tomo III: 241-245.
- INPRES 1993. La verdadera dimensión del problema sísmico en la provincia de San Juan. *Publicación Técnica* N° 18, 46 pp. San Juan.
- La Unión (1894). *Diario de la tarde*. San Juan. Año XVI, Nros. 2 al 20 de noviembre de 1894.
- Moretti, M., Pieri, P., Tropeano, M. y Walsh, N., 1995. Tyrrhenian seismites in Bari area (Murge-Apulian foreland). *Atti dei Convegni Licenci*, 122. Terremoti in Italia. *Accademia Nazionale dei Lincei*: 211 – 216.
- Obermeier, S., 1994. Using liquefaction-induced features for paleoseismic analysis. En: Using ground-failure features for paleoseismic analysis (Ed. Obermeier, S. y Jibson, W.) *Geological Survey Open-File Report*, 94-633: A1-A98.
- Paredes, J. y Perucca, L., 2002. Evidencias de paleolicuefacción en la quebrada del río Acequión, Sarmiento, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 55 (4): 394-397.
- Perucca, L., 1995. Fallamiento Activo en la sierra de La Punilla. San Juan-La Rioja. Argentina. *Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan*, 135 pp. (Inédito).
- Perucca, L. y Paredes, J., 2004. Descripción del Fallamiento activo en la provincia de San Juan. *Tópicos de Geociencias. Un volumen de Estudios Sismológicos, Geodésicos y Geológicos en Homenaje al Ing. Fernando Séptimo Volponi*: 269-309.
- Rodríguez Pascua, M., 1997. Paleosismicidad en emplazamientos nucleares. Estudio en relación con el cálculo de peligrosidad sísmica. Consejo de Seguridad Nuclear. *Colección Otros documentos*. 286pp.
- Seed, H., 1968. Landslides during earthquakes due to solid liquefaction. *Proc. Am. Soc. Civil Eng., Soil Mech. Fdns. Div.*, 94: 1053-1122.
- Tello, G. y Perucca, L., 1993. El Sistema de Fallamiento de Precordillera Oriental y su relación con los sismos históricos de 1944 y 1952, San Juan, Argentina. *Duodécimo Congreso Geológico Argentino y Segundo Congreso de Exploración de Hidrocarburos*. Actas, Tomo III: 246-251.
- Volponi, F. y Sisterna, Jorge., 1980. *Informe de la renivelación de la línea N° 23 de IGM entre los PF 29 y PF 39. Instituto Sismológico de Zonda*. Universidad Nacional de San Juan. 8 pp. (Inédito).

**Recibido:** 1 de setiembre de 2004  
**Aceptado:** 4 de noviembre de 2004

