

Zonificación de amenaza por licuefacción, caso de estudio Bhuj, India.

Cees van Westen (E-mail : westen@itc.nl)*

P.K.Champati ray (IIRS) (E-mail: champati_ray@iirs.gov.in)**

*International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, ITC

P.O. Box 6, 7500 AA Enschede, The Netherlands

** Indian Institute of Remote Sensing. Kalidas Road, Dehradun, Uttaranchal, India

Iniciando

- Situado en Windows explorer cree un directorio de trabajo en el disco duro
- Extraiga los datos del archivo *Datos caso estudio Bhuj India.ZIP* desde el directorio: \Casos de estudios SIG\04 Amenaza y Riesgo sismica\Caso de estudio Bhuj India\Datos SIG ILWISA el nuevo directorio
- Haga doble-click en el icono del programa ILWIS y vaya al directorio de trabajo que creo.

1 Objetivos:

El objetivo de este ejercicio es evaluar la amenaza por licuefacción para la ciudad de Bhuj utilizando técnicas de modelamiento en un S.I.G. El ejercicio esta basado en la metodología presentada en el manual técnico HAZUS elaborado por FEMA, USA.

2 Introducción

En enero 26, 2001, un sismo de magnitud 7.7 destruyo la ciudad de Bhuj causando la muerte de 20,000 personas y destruyendo edificaciones, presas y las instalaciones portuarias.

El epicentro del sismo se localizo 70 kilómetros al nor-este de la ciudad de Bhuj. El terremoto probablemente se origino en la falla Kachchh Mainland. Los esfuerzos compresivos causantes



del sismo están relacionados con el choque entre India y Asia, y el consecuente levantamiento de los Himalayas en el nor-este.

La parte de la región de Kachchh, que se localiza al norte de la falla “Kachchh Mainland” incluye las planicies de Banni y las salinas de Kachchh (Rann of Kachchh). Es una cuenca baja, plana caracterizada por pequeñas salinas y zonas de marismas (salt pans and mud flats). Las sales se forman en la “salinas” de “Rann of Kachchh” debido a la evaporación de aguas con alto contenido de minerales. Durante el sismo, la fuerte vibración sísmica causó licuefacción en los limos y arenas localizadas bajo el nivel freático de la Salina de Kachchh (Rann of Kachchh). Esto provocó el asentamiento de los depósitos y la expulsión del agua intersticial hacia la superficie. Investigaciones de campo han encontrado abundantes evidencias de volcanes de lodo, erupciones de arena (sand boils), y fisuras a través de las cuales se filtró agua subterránea salada sobre un área que supera los 10,000 kilómetros cuadrados.

El destructor sismo de enero 26 de 2001, día que se celebra el 51 aniversario de la República India, estuvo acompañado de grandes descargas de agua subterránea lo que provocó el incremento del nivel de las aguas en el mítico río Saraswati o río Indus. La alta capacidad de “re-visita” de las imágenes obtenidas por el IRS WiFs ha demostrado ser muy útil para el estudio, en condiciones cercanas a tiempo real, de la persistencia (persistence) de las aguas liberadas. Tres imágenes IRS previas a la ocurrencia del sismo fueron analizadas conjuntamente con una serie de imágenes post-sismo para obtener conclusiones significativas con respecto a la extensión y la duración del incremento del nivel de las aguas (water surges). Imágenes WiFs también resultaron ser útiles en el estudio de la continuidad lateral de las descargas de agua debido a su mayor cubrimiento (swath) comparadas con las imágenes LISS-III.

El incremento del nivel de las aguas es conocido como un fenómeno temporal asociado con la ocurrencia de sismos. Las imágenes WiFs del 26 de enero de 2001, adquiridas escasamente 100 minutos después de ocurrido el sismo, muestran la aparición de gran cantidad de “nacimientos de agua” y canales. En la imagen WiFs del 29 de enero se observa, en algunos lugares, un incremento relativo en el volumen del agua (comparado con la imagen del 26 de enero). Después de esto se observa una disminución regular en el volumen del agua, la cual parece haber desaparecido por completo en las imágenes WiFs del 4 y 13 de febrero. Imágenes WiFs del 20 y 23 de enero 2001 y el 7 de enero de 1999, fueron utilizadas para evaluar la superficie del agua en condiciones pre-terremoto. En términos generales, después de un terremoto se puede observar la ocurrencia de grietas en el suelo a través de las cuales puede fluir el agua subterránea. El hecho de que estos fenómenos son de carácter temporal ha sido claramente demostrado utilizando imágenes IRS WiFs.

Fig. 1: Imágenes WiFs FCC del 26th Enero de 2001, ilustrando la localización de los sitios utilizados para el análisis detallado. Site-2 imágenes para distintas fechas son mostradas a continuación.

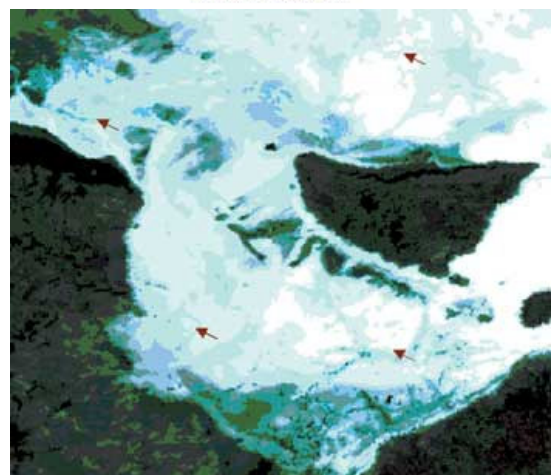
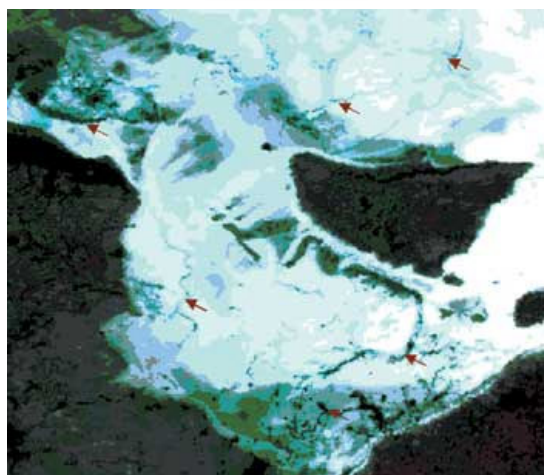
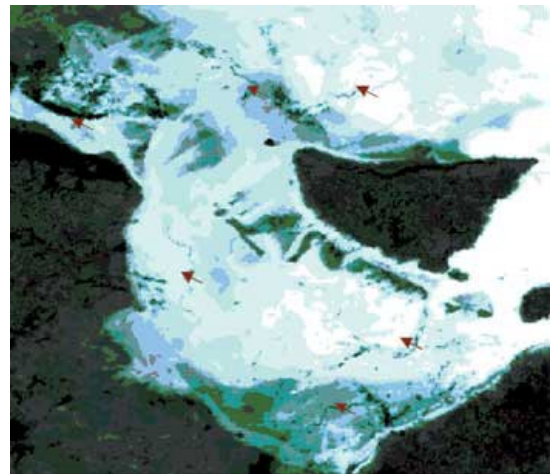
Figure 1 ilustra la imagen WiFs del 26 de enero. La serie de imágenes WiFs para un conjunto de fechas , antes y después del sismo (es decir 23rd Enero, 2001, 26th Enero 2001, 29th Enero 2001, y 4th de Enero, 2001) para uno de los tres sitios indicados en la Figura-2. Todas la imágenes representan una composición de dos bandas en falso color: la banda B4 (near infra red) asignada al canal rojo y la banda B3 (red) asignada a los canales verde y azul. Los canales de agua y los “nacimientos” aparecen en color oscuro (negro), mientras que los canales secos aparecen en cyan, como resultado del incremento en rojo de la banda (B3) sobre el nivel de gris de la banda infrarrojo cercano (B4). El nivel mas bajo de gris de la banda infrarrojo cercano esta asociado a la presencia de humedad.

Fig. 2a: Imagen WiFs 23 Enero de 2001, antes del sismo

Fig. 2b: Imagen WiFs 26 Enero de 2001 (Primera imagen después del sismo).

Algunos de los sitios que experimentaron incremento de los niveles de agua están indicados por la flechas en rojo

Fig. 2c: Imagen WiFs 29 de enero de 2001. Esta imagen muestra, entre todas las imágenes WiFs analizadas, la máxima extensión del agua . Las flechas rojas indican canales. Fig. 2d: Imagen WiFs del 4 de febrero de 2001 ilustrado la presencia de canales de agua que ya han sido desecados.



Fuente:

<http://www.gisdevelopment.net/magazine/gisdev/2001/mar/mws.shtml>

Otros paginas web de interés:

Reporte de danos por EERI:

<http://www.eeri.org/Publications/pub.html>

SRTM imágenes de Bhuj área:

http://www.jpl.nasa.gov/srtm/india_radar_images.html

http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=4810

3 Evaluación de los datos disponibles

Los datos disponibles consisten de una serie de mapas en formato vectorial y raster.

Datos disponibles

- Mapa de localización: **LOCATION** –muestra lugares de importancia en la zona de estudio
- Magnitud del sismo: 7.7
- Epicentro: disponible como el mapa de puntos **usgsepi**
- Mapa geológico: **Geology** y la tabla de atributos **Geology**
- Mapa de municipalidades (villas): **VIL_BND** y tabla de atributos con información sobre daños
- Imágenes raster **bhuj misr jan 15 2001 true color** y **bhuj misr jan 31 2001 true color**

Por favor inicie el ejercicio explorando todos los datos disponibles. Despliegue los mapas utilizando los diferentes atributos disponibles en las tablas respectivas.



- Despliegue el mapa geológico (mapa de polígonos) utilizando el atributo *formation* de la tabla asociada. Identifique las diferentes formaciones geológicas. En la representación seleccione *litho*
- Verifique el contenido del mapa utilizando la opción Pixel Information window.

Rocas sedimentarias de edad mesozoica y terciaria, y basaltos (“Deccan Traps”) constituyen el basamento rocoso en esta zona. Mas importante aun, esta área esta cubierta con residuos salinos (Rann, i.e. residuos salinos; gran extensión de terrenos bajos cubiertos con sal, lo que da una impresión de zona desértica). Otro rasgo importante es la extensión de la planicie sujeta a la influencia de las mareas situada en el margen sur y sur oriental del área a lo largo de las zonas costeras bajas.

El mapa de polígonos (geología) suministra un poco de extra información para áreas por fuera de la zona de estudio, la cual es eliminada en el mapa raster. Para desplegar el mapa raster, seleccione la columna apropiada de atributos y sus respectiva *representación*.

Despliegue ahora el mapa de localización, **location**, y el mapa de puntos que localiza el epicentro del sismo, **usgsepi**, sobre el mapa geológico



- Seleccione *Layer, Add data layer, Point Map LOCATIONS*
- Seleccione *attribute Name* y asegúrese que la opción *Text* esta seleccionada
- Mueva el cursor alrededor del mapa y estudie la geología alrededor del zona de estudio.

4 Cálculo de PGA (Aceleración Máxima del Suelo)

La Aceleración Máxima del Suelo (Peak Ground Acceleration, PGA) es calculada tomando como referencia la distancia al epicentro y la ley de atenuación (especifica para el área de estudio o de carácter general). En este ejercicio se utilizara la formula de atenuación de Joyner y Boore (1981), modificada como:

$$\text{Log PGA} = 0.249 * M - \text{Log}(\text{SqrtD}) - 0.00255 * (\text{SqrtD}) - 0.8 \quad \text{Eq 1}$$

En primera instancia, el mapa de distancia desde el epicentro debe ser calculado.



Recuerde, todas las operaciones relevantes en el SIG y las operaciones relacionadas con el procesamiento de imágenes están disponibles a través del botón derecho del mouse (clic sobre el archivo específico)



- Para iniciar rasterice el mapa de puntos que contiene el epicentro del sismo (**usgsepi**). Utilice la georeferencia *Bhuj*
- Utilice el mapa raster que acaba de crear para calcular el mapa de distancia (distancia desde el epicentro). Seleccione la opción *distance* en el menú *raster operation*. Asigne el nombre **epibuf** al mapa que creara.
- Una vez calculado, despliegue el mapa **epibuf** y explore los valores de distancia (en metros) alrededor del epicentro.

Finalmente el valor de PGA es calculado utilizando la ecuación 1.



- Escriba la siguiente expresión en la línea de comando de la ventana principal

$$\text{PGA} = 10^{(0.249 * 7.7 - \log(\text{sqrt}(\text{epibuf}/1000)) - 0.00255 * (\text{sqrt}(\text{epibuf}/1000)) - 0.8)}$$

- Despliegue el mapa PGA y analice los valores obtenidos, recuerde que dichos valores son calculados de acuerdo a una ley de atenuación específica (Joyner and Boore, 1981)

Incorporaremos ahora la información sobre geología y suelos como un factor de amplificación, lo que nos permitirá estimar su influencia sobre el valor de PGA.



- Abra la tabla de atributos **geology**, estudie los valores de la columna *ampli*, compare los valores con las unidades geológicas principales, Usted encontrara lo siguiente (ver tabla 1):

Tabla 1. Factor de amplificación del suelo

Major rock type (unidad geológica)	Soil type (tipo de suelo)	Soil amplification factor (factor de amplificación)
Quaternary	Soft soil	1.4
Tertiary	Rock	1
Deccan Traps	Hard rock	0.8
Mesozoics	Hard rock (excepto para formaciones que contienen areniscas poco consolidadas (soft) tales como Bhuj, Khadir, Wagad y Kaladonger Formation, las cuales reciben un valor de 1)	0.8
Mud Flat	Saturated soil (suelo saturado)	1.5
Rann	Soft soil (suelo no consolidado)	1.4



- El mapa de amplificación es creado a partir de la tabla de atributos, utilizando la siguiente formula en la línea de comando de la ventana principal

Ampli=geology.geology.ampli

- Despliegue el mapa *ampli* y verifique los valores de amplificación
- Podemos calcular ahora el mapa final de PGA, multiplicando el mapa **ampli** con el mapa **PGA**. La formula a utilizar es la siguiente.

PGAF= PGA * Ampli

- Al chequear el mapa PGAF, usted debe haber notado que algunos de los valores cerca al epicentro son mayores que 1. Con el propósito de tener 1 como el valor máximo de PGA, convierta los valores mayores de 1 en 1. Use la formula siguiente en la línea de comando.

PGAFF=iff(PGAF >1,1, PGAF)

PGAFF es el mapa final de PGA considerando las amplificaciones generadas por las condiciones locales de geología y suelo.

5 Cálculo de la probabilidad de licuefacción

La probabilidad de licuefacción se calcula con base en los valores de PGA y susceptibilidad de licuefacción

$$P[\text{Liquefaction}_{SC}] = \frac{P[\text{Liquefaction}_{SC} | \text{PGA} = a]}{K_M \cdot K_w} \cdot P_{ml} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$P[\text{Liquefaction}_{SC} | \text{PGA} = a]$ es la probabilidad condicional de licuefacción para una categoría específica de susceptibilidad y un nivel específico de Aceleración Máxima del suelo (ver Tabla)

K_M = Es el factor de corrección para el valor de magnitud moment magnitude (M)

K_w = es la corrección asociada al factor agua subterránea (nivel freático)

P_{ml} = proporción de la unidad mapeada susceptible de ser afectada por licuefacción (Tabla 3)

Factor de corrección para la ecuación (1):

$$K_m = 0.0027M^3 - 0.0267M^2 - 0.2055M + 2.9188$$

M representa la magnitud del evento sísmico = 7.7 en este caso

So $K_m = 0.986046$

$$K_w = 0.022d_w + 0.93$$

d_w representa la profundidad del nivel freático en pies

En la tabla 2 se presenta, para las categorías de susceptibilidad dadas, las relaciones entre la probabilidad de licuefacción y la aceleración máxima (pico) del suelo (PGA). Estas relaciones han sido definidas con base procedimientos empíricos, así como también en el modelamiento estadístico del catálogo de licuefacción empírica (empirical liquefaction catalog) presentado por Liao, et. al. (1988) para valores representativos de la resistencia a la penetración de suelos dentro de cada categoría de susceptibilidad.

Tabla 2. Relación entre probabilidad de licuefacción y aceleración máxima (pico) del suelo (Liao et al. 1988)

Susceptibility Category	P [Liquefaction PGA = a]
Very High	$0 \leq 9.09a - 0.82 \leq 1.0$
High	$0 \leq 7.67a - 0.92 \leq 1.0$
Moderate	$0 \leq 6.67a - 1.0 \leq 1.0$
Low	$0 \leq 5.57a - 1.18 \leq 1.0$
Very Low	$0 \leq 4.16a - 1.08 \leq 1.0$
None	0.0

Tabla 3. Proporción de la unidad mapeada que sufriría licuefacción en caso de un sismo

Soil type	Liquefaction Susceptibility Liq_sc	Proportion of map unit pml
Saturated soil	Very high	0.25
Soft soil	High	0.2
Rock	Moderate	0.1
Hard rock	Very low	0.02

Antes de calcular la probabilidad de licuefacción, se deben calcular los mapas requeridos. Ya que la probabilidad condicional se calcula para cada categoría de susceptibilidad, debemos preparar un mapa categorías de susceptibilidad a partir de la tabla de atributos del mapa geológico.

☞

- Revise la tabla de atributos **geology** . Las columnas *liq_sc* y *pml* indican los valores de acuerdo a la tabla 3
- Use los valores disponibles en estas columnas para crear los respectivos mapas de atributos. Use la siguiente expresión
pml=geology.geology.pml
liq_sc=geology.geology.liq_sc
- Abra los mapas de atributos y verifique los valores
 - Para calcular la probabilidad condicional de licuefacción utilizaremos los valores presentados en la tabla 2. El cálculo es implementado en ILWIS utilizando la expresión indicada a continuación en la línea de comando de la ventana principal. Los valores *liq_sc* en la formula corresponden a los códigos de las diferentes clases del dominio *liq_sc*, los cuales deber ser revisados antes de proceder con los cálculos.

Liq_pcf= iff (liq_sc="1", 9.09 * pgaff – 0.82, iff(liq_sc="2", 7.67 * pgaff – 0.92, iff (liq_sc= "3", iff(liq_sc="3", 6.67 * pgaff –1.0, 4.16* pgaff-1.08))))

- Despliegue el mapa resultante y explore los valores de probabilidad condicional de licuefacción

Una vez mas revise la tabla de atributos **geology** y busque la información sobre la profundidad del nivel freático, la cual es presentada en la columna *dw*. Dado que no se dispone de información real de perforaciones o pozos, se presentan solo valores aproximados:

Tabla 4. Nivel freático representativo

Geological region	Groundwater table depth in feet (dw) (profundidad nivel freático en pies)
Mesozoics, Deccan Traps & Tertiaries, mostly comprising high ground	200
Rann	10
Mud flat	1
Recent deposits (alluvium)	50



- a partir de la columna dw , una nueva columna kw es creada:

$$Kw = 0.022 * dw + 0.93$$

- Un mapa de atributos es creado a partir de dicha columna kw

$$Kw = \text{geology.geology.kw}$$

- Despliegue el mapa kw y revise la distribución de valores

Dado que ahora disponemos de todos los datos requeridos, como mapas, podemos proceder con el cálculo de la probabilidad de licuefacción



- Escriba la siguiente fórmula en la línea de comando de la ventana principal del ILWIS

$$Liq_prob = (liq_pcf * pml) / (0.986 * kw)$$

- El resultado puede ser clasificado como un mapa de clases que expresa la **probabilidad de Licuefacción** usando la operación *slicing*
- Despliegue el mapa y verifique los valores de la probabilidad de licuefacción en la región, usted observara que en la región pantanosa Rann (mudflat Rann) los valores son mayores indicando una probabilidad mayor, lo que concuerda con lo observado en la zona.
- Esto puede ser verificado desplegando las imágenes satelitales pre y post evento sísmico IRS-IC/ID-LISS-III y observando con cuidado la descarga de agua (liquid venting) en lugares tales como Rann y Kandla en la zona pantanosa (mudflat)

6 “Desplazamiento” Lateral

El desplazamiento permanente del suelo esperado debido al fenómeno de “desplazamiento lateral” puede ser determinado utilizando la siguiente ecuación:

$$E[PGD_{SC}] = K_{\Delta} \cdot E[PGD|(PGA / PL_{SC}) = a] \quad \text{Ecuación (3)}$$

$E[PGD|(PGA / PL_{SC}) = a]$ es el desplazamiento permanente del suelo esperado para una categoría de susceptibilidad específica y un nivel específico de vibración del suelo normalizado ($PGA/PGA(t)$) (Figura 1, Tabla 5)
 $PGA(t)$ es el valor límite de aceleración del suelo requerido para inducir licuefacción (Tabla 5)
 K_{Δ} es el factor de corrección del desplazamiento

Esta ecuación para estimar “desplazamiento lateral” fue desarrollada combinando el Índice de severidad de Licuefacción (Liquefaction Severity Index, LSI) presentado por Youd y Perkins (1987) con la ecuación de atenuación del movimiento del suelo desarrollada por Sadigh, et. al. (1986), tal

cual es presentada en Joyner and Boore (1988). La ecuación es modificada y adaptada para el área de estudio en cuestión (ecuación 1). El nivel de vibración del suelo ha sido normalizado utilizando el valor límite de la aceleración máxima del suelo $PGA(t)$ (Threshold) que corresponde al valor de probabilidad de licuefacción cero (0) para cada categoría de susceptibilidad (Tabla 5).

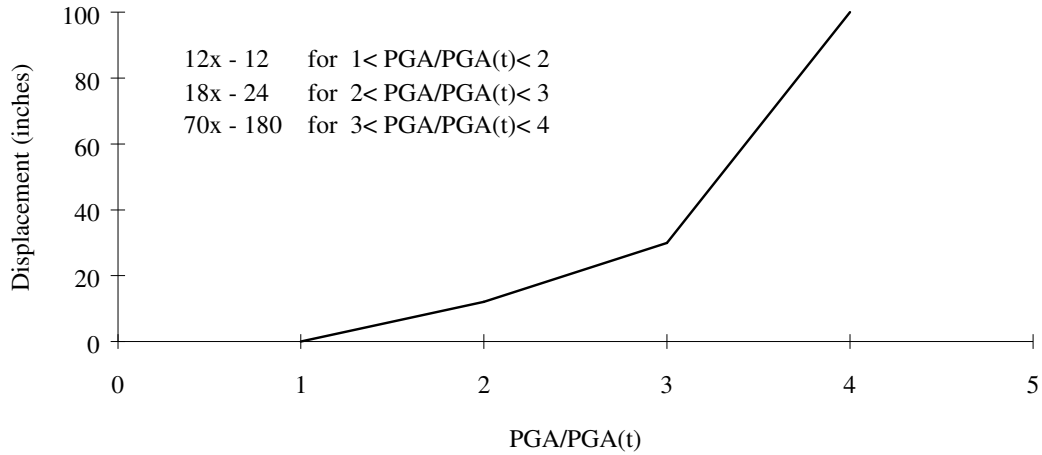


Figure 2. Desplazamiento del suelo esperado para una categoría de susceptibilidad específica y un nivel específico de vibración del suelo normalizada ($PGA/PGA(t)$)

Tabla 5. Valor límite de aceleración del suelo ($PGA(t)$) Correspondiente a una probabilidad de licuefacción cero (0)

Susceptibility Category	$PGA(t)$
Very High	0.09g
High	0.12g
Moderate	0.15g
Low	0.21g
Very Low	0.26g
None	N/A

Factor de corrección para la ecuación (3):

K_{Δ} es el factor de corrección del desplazamiento

$$K_{\Delta} = 0.0086M^3 - 0.0914M^2 + 0.4698M - 0.9835$$

M es moment magnitude = 7.7 en este caso,

$$K_{\Delta} = 1.141$$



- Revise la tabla de atributos **geology**, la columna PGA_t , la cual muestra los valores de acuerdo a la tabla 5:
- Cree el mapa de atributos **pgat**

Pgat=geology.geology.pgat

- Calcule la cuociente de PGA y PGA(t)::

Pgapgat =pgaff/pgat

- Calcule el desplazamiento del suelo (en pulgadas):

gdisp= iff (pgapgat < 1,0, iff (pgapgat < 2, 12*pgapgat-12, iff(pgapgat<3, 18*pgapgat-24, iff (pgapgat <4, 70*pgapgat-180,100))))

- Aplicando el factor de corrección, se obtiene

Gdispf = 1.141 * gdisp

- Despliegue el mapa, el cual puede ser reclasificado utilizando la operación *slicing*. El resultado es un mapa con diferentes clases que representan niveles de desplazamiento del suelo

7 Cálculo del mapa de Intensidad

La intensidad puede ser calculada a partir de los valores de PGA utilizando La Escala de Intensidad Modificada de Mercali de Trifunac and Brady ,1975(MMI) :

$$\text{MMI} = (\text{Log}(\text{PGA} * 980) - 0.014) / 0.3$$



- Para calcular MMI, escriba la siguiente formula en la línea de comando:

$$\text{MMI} = (\log(\text{pgaff} * 980) - 0.014) / 0.3$$

- Despliegue el mapa y verifique los valores de intensidad alrededor del área de estudio

8 Estimación de daños

Calcularemos ahora el promedio del valor de Intensidad para cada población (municipalidad) para estimar el daño esperado en el área.



- Rasterice le mapa de municipalidades **VIL_BND** . Use la georeferencia **bhuj**
- Cruce (operación Cross) el mapa raster **VIL_BND** con el mapa **mmi**. Solo la tabla es requerida, denomínela **vil_mmi**. No se requiere generar el mapa

- Abra la tabla *vil_mmi*, usted puede observar que cada municipalidad tiene diferentes valores de MMI. Calcularemos el valor promedio de MMI para cada municipio. Esta operación puede realizarse en la tabla directamente, pero para este ejercicio, los valores son importados en la tabla *VIL_BND* con el propósito de compararlos con otros atributos. Para ello usamos la operación *join*.
- Para unir el valor de promedio de MMI: abra la tabla *VIL_BND*, seleccione *Column/join*; seleccione *source table vil_mmi* y *source column, function average* y *group by VIL_BND*, asigne el nombre *mmi* a la nueva columna
- Ahora usted tiene la nueva columna *mmi* en la tabla *VIL_BND*. Como puede apreciar algunos de los valores están expresados en decimales (precisión 0.1), estos pueden ser aproximados al valor entero utilizando la expresión

Mmif=round (mmi)

Podemos ahora, para los diferentes valores de MMI, calcular el porcentaje de daño esperado para construcciones tipo Pucca (Casa en argamasa sin diseño estructural casa = RES2 del método Radius) y Kucha (Casa de barro = RES1 del método Radius).

Tabla 6. Relación entre MMI y daños

MMI	Predicted damage (in %) for Kuchha houses (mud)	Predicted damage (in %) for Pucca houses (concrete)
10	80	60
9	62	40
8	35	25
7	15	5
6	4	2



- Para el cálculo en ILWIS, utilice las siguiente formulas en la línea de comando:

Edampucca= iff(mmif=6,2,iff(mmif=7,5,iff(mmif=8,25,iff(mmif=9,40,60))))

Edamkuchha=iff(mmif=6,4,iff(mmif=7,15,iff(mmif=8,35,iff(mmif=9,60,82))))

Las columnas *P_c*, *Kutchha_h* en la tabla *VIL_BND* indican respectivamente el porcentaje real de edificaciones tipo Pucca y Kuchha con nivel de daño de acuerdo con una investigación decampo realizada por el gobierno de Gujarat. El valor 101 en dichas columnas indica no data. El valor real y el estimado pueden ser comparados. Los resultados pueden parecer desalentadores, no se preocupe. Según observaciones de campo, los valores reales no son confiables. Nuestras observaciones indican que el nivel de daño se corresponde con los valores estimados, pero son principalmente de mayor orden.

Podemos calcular un mapa de atributos para observar la distribución de los valores de MMI en cada municipio utilizando la expresión:

Vil_mmi=vil_bnd.vil_bnd.mmiF

Este ejercicio puede ser usado para cualquier terremoto, tan solo minutos después de haber ocurrido, si se conocen el epicentro y la magnitud. Obviamente se debe disponer de toda la información requerida lista (formato raster) para realizar el análisis: mapa geológico, suelos, nivel freático, división administrativa. También puede ser aplicado para simular escenarios previo a la ocurrencia del sismo utilizando una localización del epicentro y una magnitud hipotéticas.