

## **4. METODOLOGÍA.**

### **4.1. MUESTREO DE ESCUELAS.**

La población objetivo de este estudio son las escuelas públicas localizadas en la zona urbana de la ciudad de Cali que, de acuerdo con el listado de la Gobernación del Valle (2001), está compuesta por 197 unidades de muestreo o, en este caso, establecimientos educativos.

La distribución espacial de las escuelas y los recursos existentes para el desarrollo de este estudio, son los aspectos que determinaron la necesidad de hacer la selección de una población estudiada contenida en la población objetivo. Según Cochran (1980), la razón es que localizar un número definido de escuelas y desplazarse entre ellas genera mayores costos de campo (en tiempo, dinero y recursos humanos) que localizar el mismo número de establecimientos, si estos se encuentran concentrados en sectores específicos de la ciudad (un grupo de manzanas, un barrio, una comuna, etc.).

#### **4.1.1. Criterios para la selección de la población estudiada.**

La selección de la población estudiada se realizó aplicando la técnica de muestreo por conglomerados, que es la que más se adapta a las condiciones de este estudio. Para aplicar dicha técnica, Cochran (1980) plantea que aunque se cuente con una lista de unidades de muestreo, es recomendable, definir unidades conglomeradas mayores o grupos de escuelas, con base en características

específicas establecidas de acuerdo con la información disponible, buscando un refinamiento en el muestreo.

Una fuente de información es el listado de establecimientos educativos de la Gobernación del Valle (2001), que proporciona información sobre la dirección, barrio, comuna, número telefónico y el nombre del director o directora de cada establecimiento.

Adicionalmente, para la ciudad de Cali, se cuenta con una cartografía digital en desarrollo por el Observatorio Sismológico del Suroccidente (OSSO, 2002), compuesta por capas de información muy útiles dentro de un análisis de vulnerabilidad a gran escala; las capas de información son la distribución urbanística (área municipal, manzanas, barrios y comunas), la topografía, la geología, la ubicación de los establecimientos educativos, los drenajes y las vías.

Por consiguiente, las características consideradas para la selección de los conglomerados fueron el tipo de suelo, la geología, la topografía, la ubicación, teniendo en cuenta, también, la facilidad de acceso y los aspectos socioeconómicos del sector donde se encuentra cada escuela.

En relación con el tipo de suelo y la geología del lugar de emplazamiento de las escuelas, se crearon grupos de escuelas de acuerdo con las distintas formaciones presentes en la ciudad. De acuerdo con OSSO (2002), las formaciones geológicas superficiales de los terrenos donde están emplazadas las escuelas son: conos aluviales del río Cali, Cañaveralejo y Meléndez; estratos de arenas, limos y arcillas (Q1, Q2, Q4, Q5 y Q6), depósitos derivados del Terciario (Qc), depósitos torrenciales (Qd), depósitos de rocas sedimentarias (QvT), rocas sedimentarias (T) y diabasas parcialmente meteorizadas (Kv).

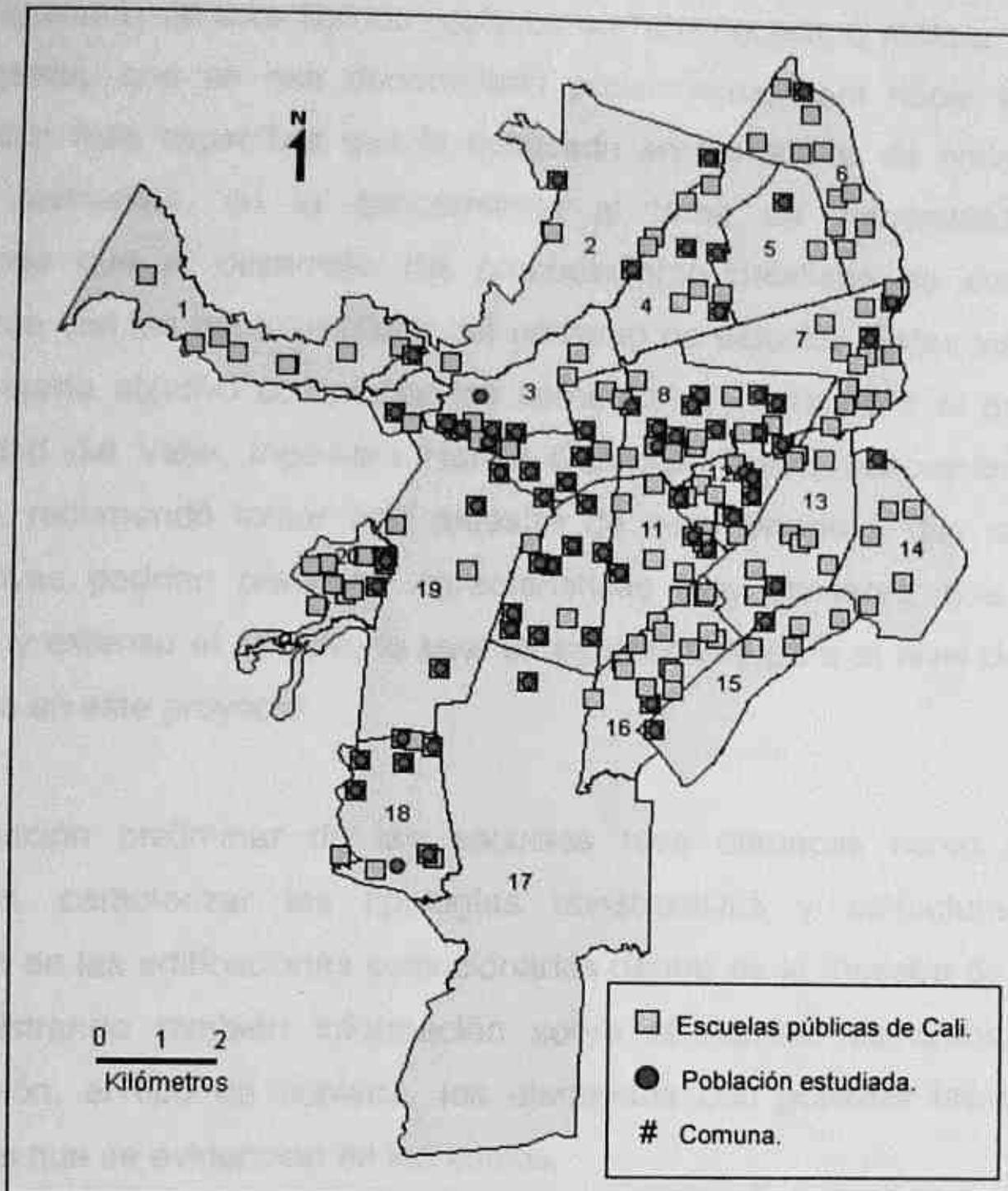
Con respecto a la topografía de las zonas donde se encuentran ubicadas las escuelas públicas urbanas de Cali, se formaron dos grupos, uno de ellos con las escuelas localizadas en el piedemonte de la Cordillera Occidental, con pendientes entre el 12 y el 30 %, y el otro con las escuelas de la zona plana de la ciudad, con pendientes inferiores al 3 %.

#### **4.1.2. Selección de las escuelas de la población estudiada.**

A partir del cruce de la información geológica y topográfica con la ubicación urbanística, se generó un listado de 150 escuelas públicas para iniciar las visitas y yendo a cada sector de la ciudad, se empezaron a descartar algunos establecimientos situados muy cerca de algunos que ya habían sido visitados, teniendo en cuenta que se tomaran elementos de todos los conglomerados formados. En otros casos, se descartaron establecimientos que se encontraban en zonas donde, según los comentarios de vecinos y vecinas, no era recomendable ingresar por su alta peligrosidad.

La población estudiada está constituida por 70 escuelas públicas, distribuidas dentro del conjunto de comunas de Cali, las cuales constituyen una muestra del 31,6 % del universo de escuelas oficiales de este municipio. En el Anexo 1 se presenta la lista de las escuelas seleccionadas y en la Figura 3 su distribución en la ciudad de Cali.

Previamente, se conocía una lista con 33 escuelas que han sido reportadas por la Secretaría de Educación Municipal, como las que se encuentran en las peores condiciones, y se incluyó una muestra de 13 de ellas para la evaluación preliminar, teniendo en cuenta también, los criterios de selección expuestos anteriormente. En el Anexo 2 se puede observar una lista de las 33 escuelas en riesgo.



Cartografía digital y SIG: OSSO (2002).

**Figura 3.** Escuelas públicas de la población estudiada.

#### 4.1.1. Diseño de la encuesta para la evaluación preliminar.

Al iniciar este trabajo de grado no existía recopilación de información sobre las escuelas aparte de la que se expone en el listado oficial de la Gobernación del Valle, la cual se limita a direcciones, teléfonos, barrios, núcleos, directores y directoras. No se ha podido encontrar un registro integrado o una base de datos que contenga los años de construcción, las tipologías constructivas y arquitectónicas de las escuelas públicas.

Ante la ausencia de este tipo de registros se hizo necesario realizar una serie de visitas cortas, que se han denominado preliminares, para hacer el acopio de información más específica que la publicada en los diarios de noticias o en los listados existentes, en lo concerniente al tema de vulnerabilidad sísmica, permitiendo que el desarrollo del procedimiento detallado de evaluación sea consistente con las características del universo de estudio. Estas visitas también tuvieron como objetivo comprobar los comentarios hechos por el profesor de la Universidad del Valle, Ingeniero Harold Cárdenas quien, conocedor de algunas escuelas, recomendó tomar una muestra de ellas debido a que sus tipologías constructivas podrían presentar características muy similares, que harían muy repetitivo y extenso el estudio, lo cual es injustificable para el nivel de detalle que se plantea en este proyecto.

La evaluación preliminar de las escuelas tuvo entonces como uno de sus propósitos, caracterizar las tipologías constructivas y estructurales que se presentan en las edificaciones seleccionadas dentro de la muestra de escuelas de Cali, registrando también información sobre el número de pisos, el año de construcción, el tipo de cubierta, los elementos con posibles fallas y tipos de problemas que se evidencian en los suelos.

El acopio de esta información se hizo por medio de una sencilla encuesta que se adaptó a partir del formato empleado por la Comisión Científica de Evaluación Post - terremoto de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, para la evaluación de daños realizada después del sismo del 25 de enero de 1999 ocurrido en el Eje Cafetero. La encuesta fue diseñada para inspecciones visuales cualitativas sobre el tipo de estructura, la cubierta, los elementos estructurales y no estructurales con evidencias de deterioro o fallas y los problemas asociados a los suelos, además de observaciones e información sobre localización, edad de la construcción y número de edificaciones de cada escuela. La adaptación a este estudio de dicha encuesta se muestra en la Figura 4.

Escuela: _____	
Dirección/teléfono: _____	
Director: _____	
Número de edificaciones: _____	
<b>1. Número máximo de pisos por edificación:</b> _____	
<b>2. Año de construcción:</b> _____	
a. Antes de 1984	_____
b. Entre 1984 y 1998	_____
c. Después de 1998	_____
<b>3. Tipo de estructura:</b>	
a. Pórtico de concreto	_____
b. Muros confinados	_____
c. Mampostería reforzada	_____
d. Estructura mixta	_____
e. Muros sin confinar	_____
f. Muros de bahareque	_____
g. Madera - esterilla	_____
h. Otro	_____
<b>4. Tipo de Cubierta:</b>	
a. Placa de concreto	_____
b. Teja de barro	_____
c. Teja de asbesto-cemento	_____
d. Otro	_____
<b>5. Elementos con posibles fallas:</b>	
a. Pórticos	_____
b. Losas	_____
c. Cubierta	_____
d. Pisos	_____
e. Cimentación	_____
f. Mampostería	_____
g. Escalera	_____
h. Muro de contención	_____
i. Arquitectónico	_____
<b>6. Suelos:</b>	
a. Asentamientos	_____
b. Grietas	_____
c. Deslizamientos	_____
e. Otros	_____
<b>OBSERVACIONES</b>	
_____	
_____	
_____	
_____	

Adaptada del formato empleado por la Comisión Científica de Evaluación Post-terremoto (Universidad del Valle, 1999).

**Figura 4.** Encuesta de evaluación preliminar.

#### 4.1.4. Análisis de la información recolectada en la visitas preliminares.

Por razones del desarrollo metodológico (conocimiento de campo de una muestra de escuelas, de sus características constructivas, localización, etc.) y para sentar las bases de la evaluación detallada, es necesario analizar la información de las 70 escuelas visitadas.

- **Número de edificaciones:**

De los 70 establecimientos visitados, 17 tienen una edificación (24,3 %), nueve tienen dos edificaciones (12,9 %), 24 tienen tres edificaciones (34,3 %), siete tienen cuatro edificaciones (10,0 %), nueve tienen cinco edificaciones (12,9 %) y cuatro tienen seis o más edificaciones (5,7 %).

**Tabla 2.** Distribución de las escuelas visitadas de acuerdo con el número de edificaciones.

No. de edificaciones	No. de escuelas	% del total
1	17	24,3
2	9	12,9
3	24	34,3
4	7	10,0
5	9	12,9
6 o más	4	5,7

- **Número máximo de pisos por edificación:**

La distribución del número máximo de pisos arrojó que, de las 70 escuelas visitadas, 37 (52,9 %) tienen solo edificaciones de un piso, 31 (44,3 %) tienen edificaciones máximo de dos pisos y dos (2,9 %) tienen una edificación de tres pisos.

**Tabla 3.** Distribución de las escuelas visitadas de acuerdo con el número de pisos.

No. de pisos	No. de escuelas	% del total
1	37	46,8
2	31	40,3
3	2	2,9

- **Año de construcción:**

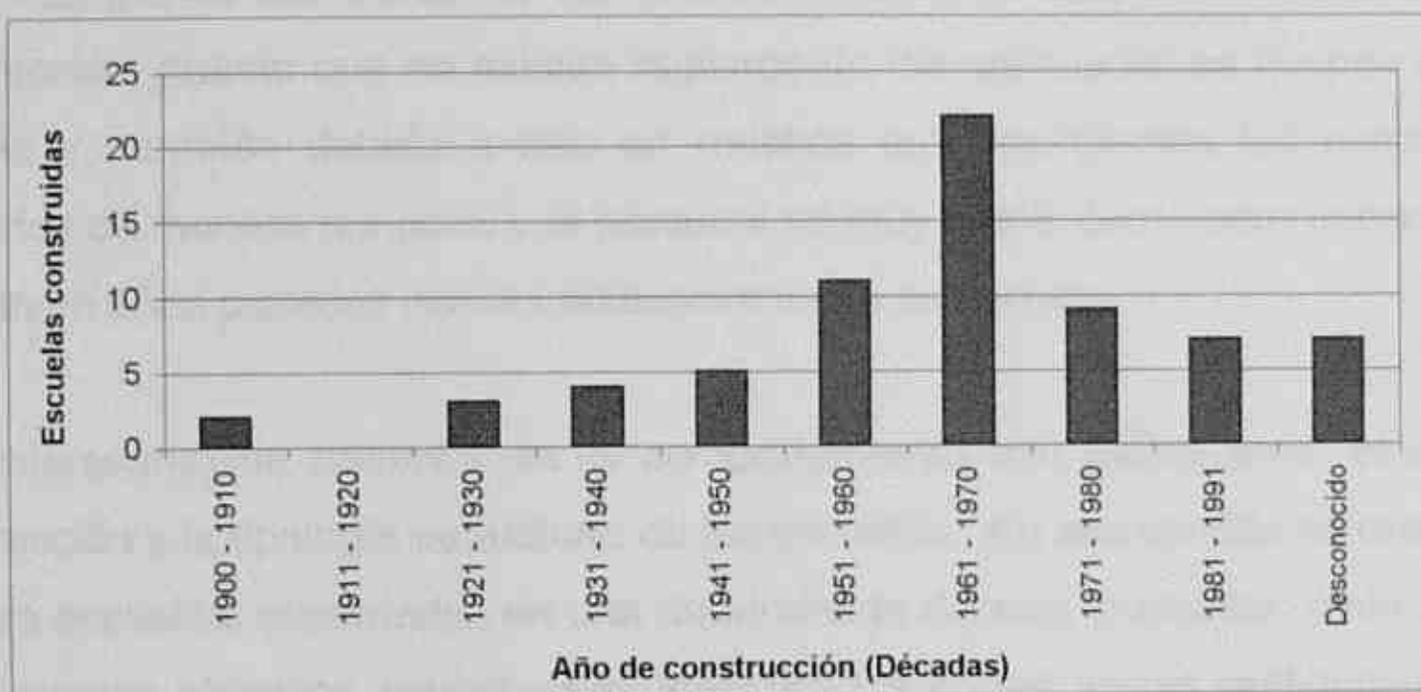
Para caracterizar este parámetro se establecieron inicialmente tres intervalos, de acuerdo con las fechas de expedición de la primera y segunda Norma Sismorresistente en Colombia, sin embargo, estos tres intervalos no fueron muy dicientes, pues de las 70 escuelas visitadas, 58 fueron construidas antes de 1984 y 5 fueron construidas entre 1984 y 1998. Para siete escuelas visitadas no se conoce el año de construcción porque no existen registros y, en otros casos, el personal docente y administrativo es nuevo; en estos casos solo fue posible suponer que fueron construidas antes de 1984 debido a la tipología constructiva observada y a los comentarios de los vecinos que pudieron entrevistarse.

Para optimizar esta clasificación se determinaron 9 intervalos por décadas desde 1901 hasta 1991, pero excluyendo del conteo las siete escuelas cuyo año de construcción exacto no fue posible conocer. Estos intervalos hicieron más clara la distribución de este parámetro, haciéndose evidente que la mayor concentración, el 31,43 %, se encuentra en el período comprendido entre 1961 y 1970. Le siguen las décadas de 1951 a 1960 y de 1971 a 1980 con concentraciones de 15,71 % y 12,86 %, respectivamente. Las décadas comprendidas entre 1931 y 1950 presentan 5,71 y 7,14 % cada una y la década de 1981 a 1991 10,0 %. Las décadas comprendidas entre 1900 y 1930 presentan concentraciones menores al 5,0 %.

En la Tabla 4 puede verse la distribución por décadas de los años de construcción de las 63 escuelas visitadas en las que se pudo conocer este parámetro con alguna precisión, y en la Figura 5 se puede observar el histograma de los datos.

**Tabla 4.** Distribución por décadas de los años de construcción de las escuelas públicas visitadas.

Intervalo	Cantidad	%
1900 - 1910	2	2,86
1911 - 1920	0	0,00
1921 - 1930	3	4,29
1931 - 1940	4	5,71
1941 - 1950	5	7,14
1951 - 1960	11	15,71
1961 - 1970	22	31,43
1971 - 1980	9	12,86
1981 - 1991	7	10,00
Se desconoce	7	10,00
<b>TOTAL</b>	<b>70</b>	<b>100</b>



**Figura 5.** Histograma de años de construcción de las escuelas públicas visitadas.

▪ **Estructura:**

Los sistemas estructurales encontrados en las 70 escuelas visitadas fueron: Pórtico en Concreto, Muros confinados, Muros sin confinar y la combinación de los anteriores. De la matriz se obtuvo que, de las escuelas visitadas, 16 (22,9 %) tienen solo Muros sin confinar y 19 (27,1 %) tienen solo Muros confinados. Las que tienen edificaciones con varias tipologías estructurales siguieron este

comportamiento: 16 (22,9 %) tienen edificaciones de Muros confinados con edificaciones de Muros sin confinar, cinco (7,1 %) tienen edificaciones de Muros sin confinar con una edificación de Pórtico en Concreto, 13 (18,6 %) tienen edificaciones de Muros confinados con una edificación en Pórtico y solo una (1,4 %) tiene una edificación en Pórtico en Concreto con edificaciones de Muros sin confinar y Muros confinados.

En todas las escuelas que tienen pórtico en concreto, este se presenta en una sola edificación y, por su apariencia y por los comentarios de algunos profesores, se estima que son construcciones muy nuevas (de 4 a 3 años de antigüedad), aunque en la mayoría de los casos no fue posible determinar con exactitud su año de construcción, puesto que no existen registros de las adecuaciones hechas a cada escuela y, también debido a que en muchos establecimientos los cargos son ocupados de manera temporal y el personal es muy nuevo como para conocer qué sucedió en años pasados con las edificaciones de su escuela.

Algo interesante de observar es el comportamiento que existe entre el año de construcción y la tipología estructural de las escuelas. En ese sentido se determinó cuántas escuelas, construidas en una determinada década, presentan cada uno de los diferentes sistemas estructurales identificados en las visitas preliminares. El comportamiento para cada década fue el siguiente:

De 1900 a 1910: De las dos escuelas visitadas en esta época...

De 1900 a 1910: De las dos escuelas visitadas que fueron construidas en este período, una tiene muros confinados y la otra tiene edificaciones con muros confinados y edificaciones con muros sin confinar.

De 1911 a 1920: No se visitó ninguna escuela construida en este periodo.

De 1921 a 1930: De las tres escuelas visitadas en este periodo...

De 1921 a 1930: De las tres escuelas visitadas que se construyeron en este período, una presenta muros sin confinar y dos presentan muros confinados.

De 1931 a 1940: De las cuatro escuelas que se cuentan en este intervalo, todas presentan muros sin confinar y una de ellas presenta adicionalmente una edificación con un pórtico. Cabe anotar que este pórtico muy posiblemente no fue construido en aquella época sino que es una construcción muy nueva, como se había anotado anteriormente.

De 1941 a 1950: De las cinco construidas en esta década, una presenta muros confinados, dos presentan muros sin confinar y dos tienen edificaciones con muros confinados y edificaciones con muros sin confinar.

De 1951 a 1960: En este intervalo se cuentan once escuelas. Cinco de ellas tienen muros confinados, cuatro muros sin confinar, dos presentan edificaciones de muros confinados y muros sin confinar. Dos de estas edificaciones tiene una edificación adicional con pórtico en concreto, construido recientemente.

De 1961 a 1970: De las escuelas visitadas, 22 fueron construidas durante este periodo. Nueve presentan muros confinados, seis muros sin confinar, siete la combinación de estos. Cuatro de estos establecimientos tiene una edificación con pórtico en concreto con edades no superiores a cuatro años.

De 1971 a 1980: De las nueve escuelas construidas en esta época, dos tienen muros sin confinar, cinco presentan muros confinados y dos tienen muros confinados y sin confinar. Al igual que en la década anterior, en esta época, se encontraron cuatro establecimientos que tienen una edificación adicional con pórtico en concreto construida recientemente.

De 1981 a 1991: Se visitaron siete escuelas. Seis de ellas presentan edificaciones con muros confinados, las cuales tienen una edificación con pórtico

en concreto de tres a cuatro años de edad y la otra, tiene solamente muros confinados.

En la Tabla 5 pueden observarse los datos del conteo realizado para este análisis. El total de escuelas analizadas fue de 63 porque no se conocen los años de construcción de las escuelas restantes.

**Tabla 5.** Distribución por décadas de los años de construcción de las escuelas visitadas en relación con las tipologías estructurales.

Intervalo	Cantidad	MC	MSC	MC + MSC
1900 - 1910	2	1		1
1911 - 1920	0			
1921 - 1930	3	2	1	
1931 - 1940	4		4	
1941 - 1950	5	1	2	2
1951 - 1960	11	5	4	2
1961 - 1970	22	9	6	7
1971 - 1980	9	5	2	2
1981 - 1991	7	7		
Desconocido	7	2	2	3
<b>TOTAL</b>	<b>70</b>	<b>32</b>	<b>21</b>	<b>17</b>

MC: muros confinados y MSC: muros sin confinar.

#### ▪ **Cubierta:**

Los tipos de cubierta encontrados fueron teja de barro, teja de asbesto – cemento y sistema residencial (teja de barro y asbesto – cemento). De las 70 escuelas visitadas preliminarmente, 30 (42,9 %) tienen cubierta de teja de barro, 13 (18,6 %) tienen cubierta de asbesto – cemento, siete (10,0 %) tienen sistema residencial, 14 (20,0 %) tienen edificaciones con teja de asbesto – cemento y edificaciones con teja de barro, cinco (7,14 %) tienen edificaciones con teja de asbesto – cemento y edificaciones con sistema residencial y en una escuela se desconoce el material de cubierta.

**Tabla 6.** Distribución de las escuelas visitadas de acuerdo con el tipo de cubierta.

Tipo de Cubierta	No. de	% de total
Teja de barro	30	42,9
Teja de asbesto cemento	13	18,6
Sistema residencial	7	10,0
Teja de barro y asbesto-cemento	14	20,0
Teja de asbesto-cemento y sistema residencial	5	7,1
Se desconoce el material de cubierta	1	1,4
<b>TOTAL</b>	<b>70</b>	<b>100,0</b>

▪ **Elementos con posibles fallas estructurales:**

En el Formulario Preliminar se consideró que dentro de los posibles elementos con fallas están los pórticos, las losas, la cubierta, los pisos, la cimentación, la mampostería, las escaleras, los muros de contención y los elementos arquitectónicos. De las 70 escuelas visitadas, cinco presentan fallas en los pórticos, cinco en las losas, cuatro en la cubierta, 41 en los pisos, tres en la cimentación, 45 en la mampostería, seis en las escaleras, una en el muro de contención y 42 en elementos arquitectónicos.

**Tabla 7.** Distribución de las escuelas visitadas de acuerdo con los elementos que presentan posibles fallas.

Elementos con posibles fallas	No. de escuelas	% del total
Pórticos	5	7,1
Losas	5	7,1
Cubierta	4	5,7
Pisos	41	58,6
Cimentación	3	4,3
Mampostería	45	64,3
Escaleras	6	8,6
Muro de contención	1	1,4
Elementos arquitectónicos	42	60,0

- **Suelos:**

Para clasificar los problemas en las edificaciones asociados al comportamiento del suelo, se evaluaron los siguientes aspectos: asentamientos, grietas y deslizamientos. De las 70 escuelas visitadas, 29 tienen problemas de asentamientos, 31 presentan grietas y en una se observó un pequeño deslizamiento.

**Tabla 8.** Distribución de escuelas de acuerdo con los problemas asociados al comportamiento del suelo.

Problemas en suelos	No. de escuelas	% del total
Asentamientos	29	41,4
Grietas	31	44,3
Deslizamientos	1	1,4

- **Otros problemas observados:**

En el Formulario Preliminar se pudo registrar, por medio de las Observaciones, información muy importante que será de gran utilidad en el análisis que comprenda la información tanto preliminar como detallada. La observación de estos aspectos se hizo desde el exterior de las instalaciones en cinco escuelas, debido a que no fue posible el ingreso. Esta información se resume en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Problemas generales observados en las edificaciones escolares.

Resumen de observaciones	No. de escuelas
Juntas inadecuadas	8
Columna corta	10
Ampliaciones	9
Vanos grandes	30
Culatas sueltas	17
Irregularidades en planta y en altura	9
No coincidencia en los niveles de las losas	20
No hay continuidad en viguetas y columnetas	6
Cielorraso deteriorado	8

#### 4.1.5. Selección de la muestra específica.

Para un estudio de vulnerabilidad sísmica a gran escala, con el nivel de profundidad que se planteó en este estudio, se consideró que no es necesario evaluar la totalidad de las escuelas de la población estudiada, dado que durante las visitas preliminares se constató que muchas edificaciones presentan la misma tipología estructural, al igual que problemas comunes que pueden incidir en la vulnerabilidad sísmica, lo que las hace muy similares y haría la evaluación muy repetitiva. Otro aspecto que fue posible sondear mediante las visitas preliminares fue el año de construcción que también tiene una distribución muy característica, con mayores concentraciones durante períodos muy definidos.

Partiendo de estos dos parámetros de selección de una muestra específica (tipología estructural y edad) se planteó un parámetro adicional: el lugar de emplazamiento de las edificaciones. Aunque Cali carece de un estudio de microzonificación, con base en estudios hechos en zonas específicas (Municipio de Cali, 1996; Villafañe y Coronado, 2000; Rosales, 2002), se han identificado daños asociados a las características de los suelos sin que haya ocurrido un sismo fuerte, constituyéndose este en un parámetro que podría ser determinante en el comportamiento de las edificaciones ante la ocurrencia de un sismo.

Cali se encuentra asentada sobre suelos que van desde muy firmes en las zonas más antiguas hasta suelos con alto potencial de licuación en las cercanías del río Cauca, pasando por arcillas contracto-expansivas, rellenos, humedales desecados, etc.. Por medio del inventario de daños en redes de acueducto en Cali (Municipio de Cali, 1996), se identificó que las redes más antiguas ubicadas en barrios como San Antonio con suelos más firmes han presentado menos daños que las más recientes, ubicadas en barrios como Alfonso López, con suelos más jóvenes. Los resultados de este estudio se resumieron en un plano de Cali que muestra las zonas de la ciudad donde se han registrado más daños en las redes de acueducto.

El cruce de la información de daños en las redes de acueducto y alcantarillado con el Estudio de Niveles potenciométricos (López y Vöckler, 1999), permitió identificar que las zonas donde se han presentado la mayor cantidad de daños corresponden a rellenos, humedales desecados y la existencia de paleo drenajes.

Al igual que en la selección de la población estudiada, la técnica de muestreo que más se adapta a las condiciones de la selección de la muestra específica, es el muestreo por conglomerados, teniendo en cuenta como características para la definición de los conglomerados, las recopiladas en las visitas preliminares como la tipología estructural y la edad y, adicionalmente, el lugar de emplazamiento.

En la muestra específica se buscó una distribución equilibrada de los sistemas estructurales presentes en las edificaciones escolares visitadas; en cuanto al año de construcción, se trató de seleccionar al menos una escuela por década y de acuerdo al lugar de emplazamiento se seleccionaron escuelas que se encontraran ubicadas sobre los diferentes tipos de terrenos característicos de Cali, como por ejemplo conos aluviales, antiguos humedales, zonas desecadas y rellenos de cauces y saprolito de diabasa, etc.

La muestra específica está conformada por 20 establecimientos escolares, compuestos por 58 edificaciones independientes. Los establecimientos se listan en la Tabla 10, con información del año de construcción, la tipología estructural y las características del lugar de emplazamiento.

Hay cinco escuelas, dentro de la muestra específica, que fueron construidas antes de 1960, nueve fueron construidas entre 1960 y 1970, tres entre 1970 y 1984 y tres después de 1984. En relación con las tipologías estructurales se encuentran tres escuelas tienen solamente edificaciones con muros sin confinar, cuatro tienen únicamente edificaciones con muros confinados, en ocho escuelas se presentan edificaciones con muros confinados y edificaciones con muros sin confinar, cuatro

escuelas presentan una edificación con pórtico en concreto y edificaciones con muros confinados, y en una escuela se observaron las tres tipologías.

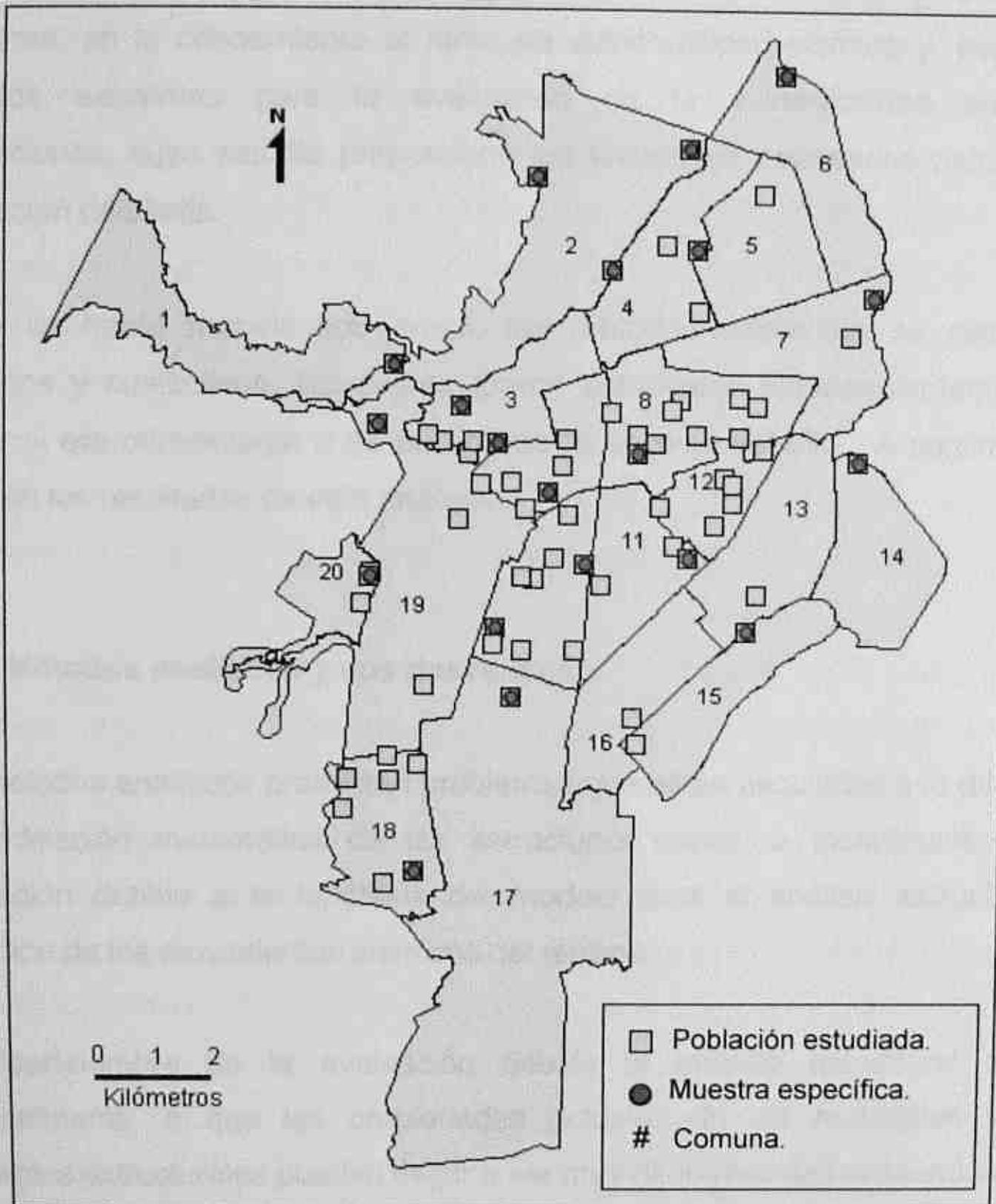
**Tabla 10.** Muestra específica para evaluación detallada.

Escuela	AC	Tipología Estructural	Características del lugar de emplazamiento	
			Perfil de Suelo	Formación geológica
Olga Lucía Lloreda	1960	MSC	S2	Cono de Cali
Mario Lloreda	1962	MC+MSC	S2	Cono de Cali
Luis Carlos Rojas Garcés	1991	PC+MC	S2	Cono de Cañaveralejo
General Anzoategui	1953	MC+MSC	S1	T, rocas sedimentarias
Santa Elena	1901	MC+MSC	S2	Cono de Cali
San Pedro Codenal	1972	MC+MSC	S3	Q5, antiguos humedales
Rufino José Cuervo	1962	PC+MC+MSC	S2	Cono de Meléndez
Francisco José de Caldas	1960	MSC	S1	Qd, saprolito de diabasa
Luis Carlos Peña	1942	MC	S2	Cono de Cali
Cristina Serrano de Lourido	1968	MC+MSC	S3	Q6, sedimentos en curvas de meandros
Fernando de Aragón	1962	MC+MSC	S2	Cono de Cali
Isaías Gamboa	1987	MC	S1	Kv, saprolito de diabasa
República de Francia	1970	MC	S2	Cono de Cali
República de Brasil	1950	MC	S2	Qc, saprolito de diabasa
José María Villegas	1965	MC+MSC	S3	Q4, sedimentos en curvas de meandros
Carlos Alberto Sardi Garcés	1953	MSC	S1	Qd, saprolito de diabasa
Las Américas	1984	PC+MC	S3	Q5, antiguos humedales
Francisco Montes Idrobo	1969	MC+MSC	S2	Cono de Cañaveralejo, sedimentos en curvas de meandros
José Ramón Bejarano	1985	PC+MC	S3	Q4, sedimentos en curvas de meandros
La Anunciación	1982	PC+MC	S3	Q4, canales y depósito de río.

Fuentes: Visitas preliminares; OSSO (2002) y López y Vöckler (1999).

En cuanto al lugar de emplazamiento, hay ocho escuelas que se encuentran sobre los conos aluviales de los ríos que atraviesan la ciudad de Cali, seis están sobre suelos conformados por estratos de arenas, limos y arcillas (Q4, Q5 y Q6) correspondientes a sedimentos en curvas de meandros, canales y depósitos de río y antiguos humedales, en dos escuelas se registran depósitos torrenciales con

estratos de gravas y arenas superpuestos a la topografía original de rocas diabásicas (Qd), una escuela se encuentra sobre rocas sedimentarias (T), una sobre saprolito de diabasa (Kv) y la otra escuela sobre depósitos de vertiente derivados de rocas del Terciario (Qc).



Cartografía digital y SIG: OSSO (2002).

Figura 6. Escuelas de la muestra específica.

## **4.2. EVALUACIÓN DETALLADA DE LA MUESTRA ESPECÍFICA.**

Para el desarrollo de un procedimiento de evaluación detallado adecuado a las condiciones de las escuelas públicas de Cali, se estudió cuidadosamente por un lado, la información recolectada en las visitas preliminares, pues su ejecución permitió un conocimiento de las características de la muestra de edificaciones escolares, en lo concerniente al tema de vulnerabilidad sísmica y, por otro, los métodos existentes para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones, cuyo estudio proporcionó los elementos necesarios para definir la evaluación detallada.

Como se había mencionado antes, los métodos existentes se clasifican en analíticos y cualitativos, los cuales fueron estudiados independientemente para decidir si era conveniente o no su aplicación en este estudio. A continuación se exponen los resultados de este análisis.

### **4.2.1. Métodos analíticos y sus desventajas.**

Los métodos analíticos presentan problemas que están asociados a la dificultad de la modelación matemática de las estructuras reales, e incertidumbres en la evaluación debido a la hipótesis del modelo para el análisis estructural y la selección de los movimientos sísmicos del terreno.

La incertidumbre de la evaluación debida al modelo estructural se debe, principalmente, a que las propiedades actuales de los materiales y de los elementos estructurales pueden llegar a ser muy diferentes de las asumidas para el análisis y, en la mayoría de los casos, desconocidas. Por otro lado, la dificultad para identificar las características del movimiento del terreno que describen la

capacidad destructiva de un terremoto, se convierte en un factor que influye directamente en los resultados de la evaluación realizada con un método analítico.

Otro inconveniente que se presenta, para la aplicación de un método analítico en los estudios de vulnerabilidad sísmica, está asociado a los indicadores de daño que usan estos métodos, los cuales solo tienen en cuenta el daño de los elementos estructurales, y a la dificultad de correlacionar dichos indicadores con el daño económico (Caicedo et al., 1994).

Por otro lado, se hicieron tres visitas a la Secretaría de Educación para evaluar si podía ser útil y justificable la realización de un inventario de los planos existentes de las escuelas, con el fin de hacer uso de dicha información en este proyecto. Lo que se pudo observar es que solo hay planos de algunas escuelas y colegios oficiales y la información que contienen es incompleta, desorganizada y, en muchos casos, de bajo nivel técnico, es decir, es insuficiente para hacer la evaluación de la vulnerabilidad sísmica por medio de un método analítico.

En conclusión, para usar estos métodos es necesario tener una información estructural detallada, la cual es difícil de conseguir debido a que, en su mayoría, los establecimientos educativos son muy antiguos y no disponen de planos. Además, debido a la cantidad de información que requieren los métodos analíticos, al análisis tan detallado que plantean y al volumen de establecimientos que van a estudiarse en este proyecto, se decidió no considerarlos en el desarrollo del procedimiento detallado que se utilizará para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones escolares.

Adicional a los métodos analíticos convencionales, en el marco teórico se expuso un método simplificado para la estimación de velocidades y aceleraciones en edificios (Miranda, 2001), cuyo estudio permitió conocer las limitaciones que su aplicación presenta en el estudio de vulnerabilidad propuesto en esta tesis. La

razón fundamental es que el método tiene en cuenta solamente los primeros tres modos de vibración de la edificación y, debido a que la mayoría de las escuelas públicas de Cali se han identificado como edificaciones de máximo dos pisos, el método no proporcionaría la información suficiente acerca del comportamiento dinámico de los edificios en estudio ante la ocurrencia de un sismo.

Por otro lado, las recomendaciones del profesor Eduardo Miranda (comunicación personal por correo electrónico) sobre la aplicabilidad del método en las escuelas de Cali, dadas las características que se han identificado en ellas, son muy claras al indicar que un modelo continuo no es apropiado para edificaciones de uno y dos pisos, lo cual se convierte en una razón más para no utilizar este método en el desarrollo de este trabajo de grado (Miranda, 2002).

#### **4.2.2. Aplicabilidad y parámetros propuestos por los métodos cualitativos.**

Durante el proceso de estudio de los métodos cualitativos no se pretendió hacer una selección de uno de ellos, sino un compendio de los parámetros propuestos en sus procedimientos de evaluación, que permitan identificar los indicadores más determinantes en la vulnerabilidad sísmica de una edificación. A continuación se hace un resumen de los parámetros de evaluación de los métodos revisados y se establece su aplicabilidad a este trabajo de grado.

- **Método del ATC – 21.**

La calificación de la edificación al ser evaluada por este método depende de la altura del edificio, su deterioro, las irregularidades geométricas, la existencia de pisos flexibles y de torsión en planta dentro de la edificación. Debido a que este método es considerado como una evaluación preliminar y sus parámetros de evaluación están implícitos en otros métodos cualitativos, no se realizó una

aplicación directa del método pero sus parámetros fueron tenidos en cuenta durante el desarrollo del procedimiento de evaluación detallado.

- **Método NAVFAC.**

La determinación de los parámetros requeridos demanda información detallada y cálculos matemáticos que acarrearán mucho tiempo en la evaluación, los cuales se consideran injustificables debido a que es un estudio que comprende muchas edificaciones, y por esta razón el método no se aplicó.

- **Métodos Japoneses.**

El método solo es aplicable a edificaciones de concreto reforzado de mediana y baja altura, y debido a que la mayoría de las escuelas se caracterizan por presentar muros confinados y sin confinar como tipologías estructurales, no es apta para utilizarse en este estudio. De los parámetros utilizados por el método se consideró la edad de la edificación, a diferencia de los parámetros que definen el uso de la estructura y la importancia de la edificación, ya que para el caso de las escuelas no son variables sino puntos de partida en el análisis.

- **Método Venezolano.**

Es aplicable a edificios bajos de concreto reforzado o de mampostería (Cardona, 1990; Jaramillo y Trujillo, 1999), y su aplicación requiere de información que no se pudo obtener, como las especificaciones de los elementos resistentes a fuerzas laterales. Sin embargo, el método plantea una amplia gama de parámetros de evaluación que fueron adaptados a la evaluación detallada mediante preguntas sobre cambios de uso, remodelaciones, la presencia de columna corta y el grado de deterioro de elementos estructurales y no estructurales.

- **Método FEMA-178 = FEMA-310.**

Requiere información muy detallada de la cantidad de refuerzo a flexión y a cortante pero en la mayoría de los casos no se cuenta con planos de despieces y la utilización de tecnología para determinar la ubicación del acero de refuerzo haría muy costoso el estudio, por lo que se decidió que este método no tiene aplicabilidad en este proyecto.

- **Método de la AIS.**

Las descripciones hechas en el desarrollo de este método se adaptan mucho a las características observadas en las visitas preliminares, por esta razón es uno de los métodos de los que más se extrajo información y se consideró necesario exponerlo con más detalle. Los aspectos que considera para la evaluación de las edificaciones se resumen a continuación.

Aspectos geométricos: En este parámetro se evalúa la irregularidad en planta de la edificación de acuerdo a la forma geométrica y dimensiones en planta; se evalúa la cantidad de muros en cada dirección principal de la edificación y la irregularidad en altura en relación con la continuidad de los muros verticalmente.

Aspectos constructivos: Presenta opciones que permiten evaluar, de manera visual, la calidad de las juntas de pega, el tipo y la disposición de las unidades de mampostería y la calidad de los materiales.

Aspectos estructurales: Evalúa el confinamiento de los muros, su espaciamiento, las culatas, los antepechos. También evalúa la disposición de las unidades de mampostería y la calidad del acero y el concreto. Inspecciona la existencia de vigas de amarre y vigas corona, las características de las aberturas, del entrepiso y de los amarres de la cubierta.

Cimentación: Evalúa la conformación y el amarre de la cimentación.

Suelos: Se examina la consistencia del suelo de la fundación y la presencia de hundimientos, árboles o postes inclinados o si se siente vibración cuando pasa un vehículo pesado cerca de la vivienda. También recomienda revisar las condiciones de las zonas y viviendas aledañas.

Entorno: Este parámetro evalúa el tipo de topografía que se presenta en la zona.

- **Método del índice de vulnerabilidad.**

La combinación de los parámetros más determinantes en el daño de las edificaciones, definidos en este método, permiten determinar un valor numérico llamado Índice de Vulnerabilidad. Estos parámetros son la organización y calidad del sistema resistente, la resistencia convencional de los materiales, la posición del edificio y de la cimentación, los diafragmas horizontales, la configuración en planta y en elevación, la distancia máxima entre muros, el tipo de cubierta, los elementos no estructurales y el estado de conservación del edificio (Caicedo et al., 1994).

Este método también fue una fuente importante para el procedimiento de evaluación detallado de este estudio, sin embargo, debido a que el método fue diseñado para edificaciones europeas construidas en condiciones y con tipologías muy distintas, se hizo necesario hacer adaptaciones de acuerdo con las características de las edificaciones de la muestra de escuelas en estudio y de la zona donde se encuentran ubicadas.

Organización del sistema resistente: Este parámetro evalúa el grado de organización de los elementos verticales sin tener en cuenta el tipo de material. El

criterio fundamental es la presencia y la eficiencia de la conexión entre las paredes ortogonales con tal de asegurar un comportamiento de "cajón" de la estructura.

Calidad del sistema resistente: Con este parámetro se determina el tipo de mampostería más frecuentemente utilizada, diferenciando, de modo cualitativo, su resistencia con el fin de asegurar la eficiencia del comportamiento de "cajón" de la estructura. La calificación de una edificación se realiza en función del tipo de material y de la forma de los elementos que constituyen la mampostería. Por otro lado, de la homogeneidad del material y de las piezas, por toda la extensión del muro.

Resistencia convencional: Con la hipótesis de un perfecto comportamiento de "cajón" de la estructura, la evaluación de la resistencia de un edificio de mampostería puede ser calculada con razonable confiabilidad. El procedimiento utilizado requiere del levantamiento de los datos como el número de pisos, el área total de la cubierta en  $m^2$ , el área total de los muros resistentes en los sentidos  $x$  e  $y$  respectivamente en  $m^2$  y la resistencia a cortante característica del tipo de mampostería presente de la edificación.

Posición del edificio y de la cimentación: Con este parámetro se evalúa, hasta donde es posible por medio de una simple inspección visual, la influencia del terreno y de la cimentación en el comportamiento sísmico del edificio. Para ello se tiene en cuenta aspectos como: la consistencia y la pendiente del terreno, la eventual ubicación de la cimentación a diferente cota y la presencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén.

Diafragmas horizontales: Evalúa la calidad de los diafragmas debido a su importancia para garantizar el correcto funcionamiento de los elementos resistentes verticales.

Configuración en planta y elevación: Evalúa la irregularidad en planta del edificio teniendo en cuenta las dimensiones externas y las protuberancias y también la irregularidad en altura.

Distancia máxima entre los muros: Con este parámetro se tiene en cuenta la presencia de muros maestros intersectados por muros transversales ubicados a distancia excesiva entre ellos.

Tipo de cubierta: Este parámetro evalúa la capacidad del techo para resistir fuerzas sísmicas, de acuerdo con la estabilidad de la cubierta y la existencia de vigas corona.

Elementos no estructurales: Se tiene en cuenta con este parámetro la presencia de elementos no estructurales que pueda causar daño a personas o cosas, evaluando la vinculación del elemento a la estructura. Se trata de un parámetro secundario, para fines de la evaluación de la vulnerabilidad.

Estado de conservación: Este parámetro evalúa el deterioro de los muros, mediante la inspección del estado de los materiales constitutivos y la presencia de fisuras.

#### **4.2.3. Definición de los parámetros de evaluación.**

El desarrollo del procedimiento de evaluación detallado se empezó a ejecutar tomando como bases, la información recopilada con las visitas preliminares y el estudio de los métodos cualitativos existentes para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones. Por medio de las visitas preliminares fue posible establecer qué podría encontrarse, al hacer una evaluación más detallada, dentro de las escuelas de la muestra, es decir, cuáles condiciones no incluir en el

estudio detallado y en cuáles características hacer énfasis para identificar si hay aspectos característicos en las edificaciones escolares evaluadas y poder determinar su influencia en el grado de vulnerabilidad.

Los parámetros de evaluación definidos en este estudio son el resultado de la integración de varios de los parámetros de evaluación de los métodos analizados anteriormente, teniendo en cuenta las condiciones específicas del universo de escuelas.

Cada parámetro se desarrolló por medio de preguntas, que integran los conceptos recogidos de los métodos que intervinieron en la definición de los parámetros de evaluación, con las observaciones hechas en la evaluación preliminar. A continuación, se explica la importancia de cada parámetro y en las Tablas 11 a 22 se indican las fuentes de las preguntas que conforman el desarrollo de cada parámetro. Las fuentes se clasifican en métodos existentes, visitas preliminares, asesoría y otros. Entre los métodos existentes se incluyeron los que plantean los parámetros que más se utilizaron en el desarrollo del procedimiento de evaluación detallado de la vulnerabilidad (métodos de la AIS y el índice de vulnerabilidad); también se designa como fuente a la actual Norma colombiana sismo resistente NSR-98. En la columna llamada otros, las preguntas cuya fuente se designa como asesoría fueron recomendaciones específicas hechas por el Ingeniero Gilberto Areiza tras haber realizado la revisión del desarrollo de los parámetros. También se relacionan otras fuentes como el método venezolano, los métodos japoneses, el método ATC-21 y un estudio de edificaciones escolares hecho en México (Gómez, 1987).

- Entorno y ubicación: El método de la AIS y el del índice de vulnerabilidad destacan la importancia de evaluar las condiciones del entorno de una edificación, para estimar su vulnerabilidad sísmica (AIS, 2001; Augusti et al., 1985). Mediante este parámetro se evalúan los aspectos relacionados con la

topografía de la zona donde se encuentra la escuela, su cercanía a una zona inundable, el estado del cerramiento y las condiciones de las viviendas y zonas aledañas a la escuela, los cuales pueden estar asociados a amenazas colaterales y a condiciones que afecten la funcionalidad de los establecimientos educativos.

**Tabla 11.** Desarrollo del parámetro de evaluación del Entorno y ubicación.

Preguntas	Parámetros fuente		
	Método de la AIS	Método índice de vulnerabilidad	Visitas preliminares
¿Cuál es la topografía de la zona donde se encuentra ubicada la escuela?	Entorno	Posición del edificio y de la cimentación	-
Si la pendiente es mayor a 30° ¿se ha estabilizado el terreno?	Entorno	-	-
¿Se encuentra en cercanías de un río?	-	-	Examen visual
¿Qué situación se presenta en las zonas aledañas a la escuela (vías, postes, árboles)?	Suelos	-	-
¿En qué situación se encuentran las viviendas aledañas a la escuela?	-	-	Examen visual
¿Qué tipo de estructura presentan las viviendas aledañas?	-	-	Examen visual
¿Si el cerramiento de la escuela tiene muros total o parcialmente, en qué estado se encuentran?	-	-	Examen visual

- **Suelos:** En el método del índice de vulnerabilidad se consideran las condiciones del suelo dentro de un parámetro denominado posición del edificio y de la cimentación y el método de la AIS lo considera como un parámetro independiente (AIS, 2001; Augusti et al., 1985). Para el caso de las escuelas, y de acuerdo a lo observado en las visitas preliminares, se consideró necesario evaluarlo de manera independiente para darle una incidencia específica dentro de la estimación del grado de vulnerabilidad y evaluar las condiciones del suelo y los problemas que pueda generar en la estructura. Adicionalmente, este aspecto se consideró para tener un indicador del efecto de sitio, pues debido a la diversidad de formaciones geológicas sobre las cuales se encuentra asentada

la ciudad de Cali y, en particular, las escuelas seleccionadas, se esperan diferentes comportamientos ante vibraciones sísmicas.

**Tabla 12.** Desarrollo del parámetro de evaluación de los Suelos.

Preguntas	Parámetros fuente		
	Método de la AIS	Método índice de vulnerabilidad	Visitas preliminares
¿Cuál es el perfil de suelo de la zona?	Suelos	Posición del edificio y de la cimentación	-
¿Se evidencian fallas de elementos estructurales y no estructurales debidas a asentamientos diferenciales?	-	-	Examen visual

- Seguridad y zonas de evacuación: Con este parámetro se busca determinar la existencia de elementos no estructurales que puedan representar un riesgo para la vida de las personas que circulan por las instalaciones en el momento en que ocurra un sismo. Además se intenta conocer la facilidad de evacuación en caso de emergencia y si se educa a la comunidad escolar acerca de la atención y prevención de desastres.

**Tabla 13.** Desarrollo del parámetro de evaluación de Seguridad y zonas de evacuación .

Preguntas	Parámetros fuente	
	Visitas preliminares	Otros
¿Existen elementos como lámparas, baffles o materas que puedan caer en una zona transitable?	Examen visual	-
Si la edificación tiene más de un piso y tiene barandas metálicas en los corredores de los pisos superiores, ¿estas se encuentran bien ancladas?	Examen visual	Asesoría
¿Los salones que se encuentran en malas condiciones han sido evacuados?	Examen visual	-
¿Existe facilidad en evacuar de las aulas hacia zonas libres con rapidez?	Examen visual	-
¿Se practican con frecuencia simulacros de evacuación en caso de sismo?	Examen visual	-

Los parámetros revisados anteriormente, se aplicaron a toda la escuela y los parámetros que se reseñan a continuación se emplearon para evaluar

independientemente las edificaciones que componen la planta física de la escuela, siempre y cuando presentaran tipologías estructurales como pórticos en concreto y muros confinados.

- **Edad:** Los métodos venezolano y japoneses le confieren importancia al año de construcción de la edificación en la estimación de su vulnerabilidad sísmica (Cardona, 1990). En el caso de los establecimientos escolares preseleccionados, las edades registradas durante las visitas preliminares permitieron analizar la relación entre las tipologías estructurales y constructivas y la época de construcción. Además, como se ha mencionado antes, debido a lo reciente de las Normas sismo resistentes en Colombia y a los desastrosos daños que se han registrado en eventos sísmicos pasados, se decidió considerar este parámetro dentro de la evaluación para establecer, como posible indicador de vulnerabilidad, si había alguna norma sismo resistente en vigencia, en el momento de la construcción de cada edificación escolar.
- **Número de pisos:** El método ATC-21 tiene en cuenta esta característica dentro de su análisis por filtro de peligros sísmicos potenciales en edificaciones existentes (Construweb, 2001). La influencia del número de pisos de la edificación en su comportamiento sísmico, y por lo tanto en su vulnerabilidad, se debe a que las fuerzas sísmicas son mayores en cuanto mayor sea la altura y el peso del edificio, incrementando la exigencia en la capacidad de sus elementos estructurales y no estructurales, de resistir los esfuerzos generados por un movimiento sísmico.

**Tabla 14.** Desarrollo de los parámetros de evaluación de Edad y Número de pisos.

Preguntas	Parámetros fuente
Número de pisos	ATC-21
Año de construcción	Métodos venezolano y japoneses

- **Cambios de uso y ampliaciones:** En el capítulo A.10 de la NSR-98 (AIS,1997) se establecen dos tipos de modificación a una estructura existente: adosada y en altura y se dan los requisitos que deben cumplirse en el diseño y ejecución de ampliaciones y modificaciones. En la misma Norma también se plantea la necesidad de evaluar las implicaciones de un cambio de uso en una estructura. Con base en esos principios, este parámetro evalúa el tipo de remodelaciones que se le han hecho a las edificaciones escolares, para entrar a identificar si se hicieron las adecuaciones requeridas o si, por el contrario, se generaron condiciones que incrementen su vulnerabilidad sísmica. Adicionalmente, se evalúa si se ha cambiado el uso de cada edificación, estableciendo si las condiciones de carga para las que fue diseñada la estructura han sido alteradas.

**Tabla 15.** Desarrollo del parámetro de evaluación de Cambios de uso y ampliaciones.

Preguntas	Parámetro fuente		
	NSR-98	Visitas preliminares	Otros
¿Se ha cambiado el uso de la edificación?	Capítulo A.10	-	Método venezolano
Si se cambió el uso ¿las cargas actuantes fueron incrementadas o reducidas?	Capítulo A.10	Examen visual	-
¿Se le han hecho ampliaciones a la edificación?	Capítulo A.10	-	Método venezolano
Condiciones de la remodelación en planta	Capítulo A.10	-	-
Consideraciones de la remodelación en altura	Capítulo A.10	-	-

- **Golpeteo:** Este parámetro busca identificar los problemas de colindancia que se presenten en las edificaciones escolares por su ubicación con respecto a edificaciones vecinas y que, en tal caso, ante la ocurrencia de un sismo puedan generar golpeteo, con consecuencias aún más graves si las alturas libres no coinciden (Gómez, 1987).

**Tabla 16.** Desarrollo del parámetro de evaluación de Golpeteo.

Preguntas	Parámetros fuente	
	Visitas preliminares	Otros
¿Qué situación presenta la edificación, de acuerdo a su ubicación en la escuela?	Examen visual	Asesoría y Gómez, 1987
¿Si tiene problemas de colindancia, hay coincidencia de las alturas libres?	Examen visual	Asesoría y Gómez, 1987

- **Cubierta:** Este parámetro es considerado para evaluar el tipo de material de la cubierta, su estructura, apoyos y el grado de deterioro de sus amarres. Las cubiertas muy pesadas se mueven como péndulos invertidos que causan esfuerzos y tensiones muy severas en los elementos sobre los cuales está apoyada (AIS, 2001).

**Tabla 17.** Desarrollo del parámetro de evaluación de las Cubiertas.

Preguntas	Parámetro fuente		
	Método de la AIS	Método índice de vulnerabilidad	Visitas preliminares
¿De qué material es la cubierta?	-	-	Examen visual
¿Cuál es la estructura de cubierta?	Amarre de cubierta	Tipo de cubierta	-
¿Sobre qué se encuentra apoyada la estructura de cubierta?	-	Tipo de cubierta	Examen visual
¿Si hay apoyos en los corredores, de qué material son?	-	-	Examen visual
¿Se presenta corrosión en los anclajes o amarres de la cubierta?	Amarre de cubierta	-	-

- **Aspectos geométricos:** La incidencia de este parámetro en la vulnerabilidad sísmica se debe a que la geometría de una edificación puede favorecer el incremento de los esfuerzos de torsión y la concentración de fuerzas en las esquinas, causando un mal comportamiento de la edificación cuando esta es sometida a fuerzas sísmicas (AIS, 2001).

**Tabla 18.** Desarrollo del parámetro de evaluación de los Aspectos geométricos.

Preguntas	Parámetro fuente		
	Método de la AIS	Método índice de vulnerabilidad	NSR-98
¿Qué irregularidades presenta en planta la edificación?	-	-	Figura A.36
¿Es simétrico?	Aspectos geométricos	Configuración en planta	-
¿Qué relación existe entre las dimensiones en planta?	Aspectos geométricos	-	-
Irregularidad en altura: ¿Hay continuidad en los muros verticalmente?	Aspectos geométricos	-	-
¿Qué proporción de muros estructurales existen en las dos direcciones principales de la edificación?	Aspectos geométricos	-	-
Midiendo el área en planta ( $A_p$ ), espesor ( $t$ ) y longitud de muros en ambos sentidos ( $L$ ). ¿Se cumple que la longitud de muros en cada dirección sea $L \geq (M_o \times A_p) / t$ ?	Aspectos geométricos	-	-

- Aspectos constructivos y grado de deterioro: En múltiples métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica se le otorga importancia a estos aspectos (métodos venezolano, ATC-21, del índice de vulnerabilidad y de la AIS). Adicionalmente, el estado de deterioro de las escuelas se evidenció notoriamente durante las visitas preliminares. El objetivo de este parámetro es identificar el grado de deterioro de los elementos no estructurales como paredes, pisos, canales y cielorasos y la calidad del mortero de pega y de los ladrillos.
- Estructura: Con este parámetro se evalúan algunos requerimientos de la Norma NSR-98 para los pórticos en concreto y, separadamente, sus elementos no estructurales como muros, antepechos y culatas en relación con sus elementos de confinamiento y las características de sus aberturas.

**Tabla 19.** Desarrollo del parámetro de evaluación de los Aspectos constructivos y el grado de deterioro.

Preguntas	Parámetros fuente			
	Método de la AIS	Método índice de vulnerabilidad	Visitas preliminares	Otros
¿Qué grado de deterioro presentan los siguientes elementos?	-	-	-	ATC-21
La superficie de las paredes	-	Estado de conservación	Examen visual	Método venezolano
Los cielorrasos	-	-	Examen visual	Método venezolano
Los pisos	-	-	Examen visual	-
Las canales	-	-	Examen visual	-
¿Qué se observa en las juntas de pega?	Aspectos constructivos	-	-	-
¿Qué aspecto tiene el mortero de pega?	Aspectos constructivos	-	-	-
¿El mortero presenta resistencia al punzonamiento?	Aspectos constructivos	-	-	-
¿En qué estado se encuentran los ladrillos?	Aspectos constructivos	-	-	-
¿Cómo están dispuestos los ladrillos en el muro?	Aspectos constructivos	-	-	-

**Tabla 20.** Desarrollo del parámetro de evaluación estructural para pórticos en concreto.

Preguntas	Parámetros fuente			
	Método de la AIS	NSR-98	Visitas preliminares	Otros
¿Cómo es la continuidad de los elementos estructurales?	-	-	Examen visual	-
¿Hay cambio de sección a lo largo de las columnas?	-	Capítulo C.7	-	-
¿Qué aspecto tiene el concreto de vigas, columnas y losas?	Calidad de materiales	-	-	-
¿Se ven manchas amarillas en el concreto?	-	-	-	Asesoría
¿Si hay exposición del acero de refuerzo, cuál es la razón?	-	-	Examen visual	-
¿Qué condiciones presentan los siguientes elementos estructurales?	-	-	Examen visual	-
Las vigas	-	-	-	Método venezolano
Las columnas	-	-	-	Método venezolano
La losa	-	-	-	Método venezolano
¿Cuáles son las dimensiones predominantes de las columnas y vigas?	-	Capítulo C.21	-	-
¿Qué proporción guardan las dimensiones de las columnas y vigas?	-	Capítulo C.21	-	Asesoría

En la Tabla 21 se exponen las preguntas que desarrollan la evaluación de los elementos no estructurales de los pórticos en concreto.

**Tabla 21.** Desarrollo del parámetro de evaluación de los elementos no estructurales para pórticos en concreto.

Preguntas	Parámetros fuente				
	Método de la AIS	Método del índice de vulnerabilidad	NSR-98	Visitas preliminares	Otros
¿Los muros se encuentran confinados con columnetas y viguetas de amarre?	Aspectos estructurales	Calidad del sistema resistente	-	-	-
¿Existe buen contacto entre los muros y elementos de confinamiento?	Aspectos estructurales	-	-	-	-
¿Cuál es el espaciamiento máximo entre elementos de confinamiento vertical?	Aspectos estructurales	-	-	-	-
¿Se evidencia pandeo en las columnetas?	-	-	-	Examen visual	-
¿Se evidencian deflexiones en las viguetas?	-	-	-	-	Método venezolano
¿Se presenta columna corta en alguna zona del bloque?	-	-	Capítulo A.9	-	Método venezolano
¿Si existen problemas de columna corta, cómo están distribuidos?	-	-	Capítulo A.9	-	Método venezolano
¿En qué estado se encuentran los muros?	-	Estado de conservación	-	-	-
¿Tienen confinamiento los antepechos?	Aspectos estructurales	-	-	-	-
¿En qué estado se encuentran los antepechos?	-	-	-	Examen visual	-
¿Tienen confinamiento las culatas?	Aspectos estructurales	-	-	-	-
¿Cuál es el área transversal de columnetas y viguetas?	Aspectos estructurales	-	-	-	-
¿Qué porcentaje de área total del muro tienen las aberturas y vanos?	Aspectos estructurales	-	-	-	-
¿Cómo es la longitud total de las aberturas con respecto a la longitud del muro?	Aspectos estructurales	-	-	-	-
¿Qué distancia existe desde el borde del muro hasta la abertura adyacente?	Aspectos estructurales	-	-	-	-

Las preguntas que evalúan los elementos no estructurales de los pórticos en concreto coinciden con la evaluación de las edificaciones con muros confinados. Sin embargo, para esta tipología se incluyeron algunas preguntas complementarias, mostradas en la Tabla 22.

**Tabla 22.** Preguntas complementarias para la evaluación estructural de las edificaciones con muros confinados.

Preguntas	Parámetros fuente			
	Método de la AIS	Método índice de vulnerabilidad	Visitas preliminares	Otros
¿Cómo es la continuidad de los elementos estructurales?	-	-	Examen visual	-
¿Qué aspecto tiene el concreto de viguetas y columnetas?	Calidad de los materiales	-	-	-
¿Se ven manchas amarillentas en la superficie del concreto?	-	-	-	Asesoría
¿Por qué razón se encuentra expuesto el acero?	-	-	Examen visual	-
¿Si los antepechos no tienen confinamiento en qué piso se encuentran?	-	-	Examen visual	-

#### 4.2.4. Diseño de los formularios de evaluación detallada.

Las preguntas que desarrollan los parámetros seleccionados se emplearon en el diseño de los formularios de evaluación. La razón por la cual se diseñaron varios formularios de evaluación fue facilitar la recolección de la información, especialmente cuando el establecimiento está conformado por varias edificaciones con diferentes tipologías estructurales y constructivas. La presentación de los formularios se puede observar en el Anexo 4.

El **Formulario 1** se utiliza para recoger la información general de toda la escuela clasificada en estas categorías: Entorno y ubicación, Suelos, un esquema de localización de la escuela y Seguridad y zonas de evacuación

El **Formulario 2** se utiliza para recoger la información general por cada edificación que compone el establecimiento educativo. Las categorías que se manejan en este formulario son: el Número de pisos, el Año de construcción, Cambios de uso y ampliaciones, Golpeteo, Cubierta, Aspectos geométricos y Aspectos constructivos y grado de deterioro.

Los **Formulario 3 y 4** se emplean para evaluar la conformación y la calidad del sistema estructural de cada edificación, ya sea pórtico en concreto o muros confinados, respectivamente. Para los pórticos en concreto se tienen en cuenta aspectos estructurales y no estructurales (muros, antepecho y culatas) y para las edificaciones con muros confinados se hace el mismo análisis hecho para los elementos no estructurales de los pórticos en concreto.

Finalmente se diseñó un **Formulario de mediciones** para consignar las dimensiones de columnas, vigas, columnetas y viguetas, las alturas de entrepiso, las luces entre elementos verticales, la longitud y el espesor de muros en cada dirección, al igual que las áreas de las aberturas y de los vanos.

Mediante las primeras tres visitas para la evaluación detallada, fue posible hacer los ajustes necesarios a los formularios diseñados y optimizar el acopio de la información y la forma de calificación.

#### **4.2.5. Estimación del grado de vulnerabilidad en la muestra específica.**

Existen dos tipos de preguntas en los formularios, las que podrían denominarse principales y otras que se derivan de estas. Para las principales cada respuesta tiene una calificación determinada y para las derivadas cada respuesta se asocia a un factor por el cual se multiplica la calificación de la pregunta principal, con el objetivo de mantener o incrementar su magnitud. Las respuestas a cada pregunta

de los formularios corresponden a dos o tres categorías, de acuerdo con el número de opciones que presente cada una. Cuando hay dos opciones de respuesta, las categorías representan la mejor y la peor condición y, cuando las opciones de respuesta son tres, se consideró adicionalmente una categoría intermedia entre la mejor y la peor.

En la mayoría de los casos, a cada categoría se le asignó una calificación que oscila entre 1 y 10, sin embargo, cuando el aspecto evaluado tiene una influencia considerable en el grado de vulnerabilidad, a la peores condiciones se asignaron calificaciones de 12, 20 y 40, tales como donde se inspecciona la presencia de columna corta en alguna zona de la edificación, las evidencias de fallas en los muros debidas a asentamientos diferenciales y el confinamiento de los muros. A las preguntas que evalúan la calidad del mortero de pega en las edificaciones con sistema estructural de muros confinados no se les asignó una calificación alta, a pesar de su importancia en la resistencia al cortante de los muros, debido a que en muchos casos las paredes estaban repelladas y no fue posible examinarlo. En estos casos se tomaron estimativos de acuerdo con el estado y apariencia de los muros.

Las calificaciones asignadas a cada respuesta de los formularios se presentan en el Anexo 5. Con estas calificaciones se obtuvieron dos valores para cada parámetro, los cuales corresponden al mínimo y al máximo valor que puede resultar en la evaluación de cada escuela. Para cada uno de estos intervalos se definieron cuatro subintervalos que representan los rangos de vulnerabilidad bajo, medio, alto y muy alto, dentro de los cuales se clasificó cada edificación, para cada parámetro de evaluación. La necesidad de definir un subintervalo muy alto se debe a que dentro de los establecimientos evaluados, se encontraron edificaciones que, además de presentar un alto grado de vulnerabilidad sísmica, también representan un riesgo aún sin la ocurrencia de un sismo, debido a sus características estructurales y estado de deterioro.

El grado de vulnerabilidad de cada edificación que compone una escuela se obtuvo mediante el ponderado entre los valores de los rangos de vulnerabilidad, asignando a cada cual un porcentaje de incidencia distinto, de acuerdo con la influencia de cada aspecto en la vulnerabilidad de la edificación. Inicialmente, se adoptaron los porcentajes de incidencia de acuerdo con la encuesta hecha a un grupo de ingenieros e ingenieras de la ciudad (Chavarría y Gómez, 2001). Esta encuesta se realizó para calificar la importancia de los parámetros que plantea el método del índice de vulnerabilidad y asignar un peso a cada uno, de acuerdo con los saberes y experiencias de las personas encuestadas, debido a que dicho método asigna pesos a cada parámetro en relación con los daños por sismo, observados en edificaciones de Italia. Los pesos asignados a cada parámetro por el método del índice de vulnerabilidad y por los ingenieros y las ingenieras encuestadas se presentan en la Tabla 23. Para adoptar dichos pesos como porcentajes de incidencia para los parámetros evaluados en este estudio, se hizo necesario hacer una equivalencia con los parámetros del método del índice de vulnerabilidad, que puede observarse en la Tabla 24.

**Tabla 23.** Pesos originales y modificados para cada parámetro del método del índice de vulnerabilidad.

Parámetro	Método del índice de vulnerabilidad		Ingenieros e ingenieras encuestadas	
	Peso	% del total	Peso	% del total
1. Organización del sistema resistente.	1,00	11,8	1,50	17,6
2. Calidad del sistema resistente.	0,25	2,9	1,00	11,8
3. Resistencia convencional.	1,50	17,6	1,00	11,8
4. Posición del edificio y cimentación.	0,75	8,8	0,75	8,8
5. Diafragma horizontales.	1,00	11,8	1,00	11,8
6. Configuración en planta.	0,50	5,9	1,00	11,8
7. Configuración en elevación.	1,00	11,8	1,00	11,8
8. Distancia máxima entre los muros.	0,25	2,9	0,50	5,9
9. Tipo de cubierta.	1,00	11,8	0,25	2,9
10. Elementos no estructurales.	0,25	2,9	0,25	2,9
11. Estado de conservación.	1,00	11,8	0,25	2,9
<b>Total</b>	<b>8,50</b>	<b>100,0</b>	<b>8,50</b>	<b>100,0</b>

Fuente: Chavarría y Gómez, 2002

En la medida en que se fueron evaluando las edificaciones escolares por medio del procedimiento detallado definido en este estudio, se hizo una calibración de los porcentajes de incidencia tomados inicialmente, de tal manera que se lograra obtener un grado de vulnerabilidad muy alto para aquellas escuelas que presentaban condiciones críticas en todos los aspectos evaluados y grado de vulnerabilidad bajo para aquellas escuelas que no presentaban problemas significativos, verificando para todos los establecimientos que el grado de vulnerabilidad fuera consistente con las condiciones observadas.

La asignación de los porcentajes definitivos se hizo de esta manera, porque no se contaba con la información necesaria para adecuarlos a las condiciones de daños en las escuelas del Valle del Cauca, ocurridos en sismos anteriores. Sin embargo, fue posible adaptar dichos porcentajes a las características particulares de las escuelas de la ciudad, al diferenciarlas de otro tipo de edificaciones, como por ejemplo las viviendas, a las cuales son aplicables las metodologías estudiadas y que presentan en general una cuantía de muros considerablemente mayor a la de edificaciones escolares, debido al requerimiento de áreas mayores para las aulas y los espacios comunes. De esta condición se deduce que para una vivienda y una edificación escolar con el mismo sistema estructural y la misma área en planta, es muy probable que la capacidad resistente de la primera sea mayor que la de la segunda, sugiriendo la necesidad de una mayor exigencia en las características estructurales de las edificaciones escolares. Por esta razón, se decidió asignar un porcentaje de incidencia al sistema estructural, mayor al planteado por los ingenieros y las ingenieras encuestadas.

Con los parámetros que evalúan los suelos y los aspectos constructivos se procedió de igual manera. Durante las visitas a los establecimientos educativos, fue muy evidente la presencia de fallas en la mampostería debidas a asentamientos diferenciales, la falta de mantenimiento de las edificaciones y la mala calidad de los materiales empleados en su construcción, lo que condujo a la

conclusión de que a estos parámetros se les debe asignar una mayor incidencia que la recomendada.

A los aspectos geométricos se les asignó una incidencia menor a la planteada por los ingenieros e ingenieras encuestadas, debido a que la configuración en planta de las edificaciones escolares se caracteriza, en general, por ser regular y por el contrario, se evidenció que los mayores problemas geométricos se asocian a la configuración en elevación, por la presencia de grandes aberturas y vanos.

En la Tabla 24 se presentan los porcentajes de incidencia resultantes en comparación con los porcentajes recomendados.

**Tabla 24.** Equivalencia de los parámetros del método del índice de vulnerabilidad con los planteados en este estudio.

Parámetros tesis	% de incidencia	Parámetros método del índice de vulnerabilidad	% de incidencia modificado
Aspectos Estructurales.	50	Organización del sistema resistente. Resistencia convencional. Diafragmas horizontales.	41,2
Suelos.	15	Posición del edificio y de la cimentación.	8,8
Aspectos Geométricos.	15	Configuración en planta. Configuración en elevación. Distancia máxima entre muros.	29,5
Cubierta.	2	Tipo de cubierta.	2,9
Seguridad y zonas de evacuación.	1	Elementos no estructurales.	2,9
Aspectos constructivos y grado de deterioro.	10	Calidad del sistema resistente. Estado de conservación.	14,7
Entorno y ubicación	1	-	-
Edad y número de pisos	2	-	-
Cambios de uso y ampliaciones	2	-	-
Golpeteo	2	-	-
<b>Total</b>	<b>100</b>	-	<b>100,0</b>

En el resto de parámetros, como la cubierta, entorno y ubicación, edad y número de pisos, cambios de uso, ampliaciones y golpeteo, se consideró que los problemas asociados a ellos se derivan de otros parámetros a los que se les dio mayor incidencia; por ejemplo, los problemas de cubierta, número de pisos, cambios de uso, ampliaciones y golpeteo pueden asociarse a problemas estructurales y los problemas asociados al entorno y ubicación a los de los suelos. Con este criterio se decidió evaluarlos independientemente para identificarlos y, en cuanto al porcentaje de incidencia, se procedió a distribuir el porcentaje restante entre ellos.

En la Tabla 25 se muestra un resumen de las calificaciones parciales obtenidas, los rangos definidos y los porcentajes de incidencia para cada parámetro. En ella pueden observarse, que los formularios y los parámetros difieren en la cantidad de preguntas y por lo tanto los puntajes obtenidos para cada parámetro de evaluación no se encuentran normalizados. Para normalizar las calificaciones se consideraron intervalos uniformes con valores para cada rango de vulnerabilidad, los cuales fueron tomados a partir de los valores que utiliza el método del índice de vulnerabilidad para las categorías A, B, C y D, con puntajes de 0, 5, 25 y 45, respectivamente. La facilidad de adaptación de los parámetros definidos en este estudio con los parámetros de evaluación que plantea el método del índice de vulnerabilidad, hizo posible su aplicabilidad en la definición de la forma de calificación de los parámetros. Fue necesario entonces, convertir los intervalos definidos en la Tabla 25 a una calificación comprendida en los intervalos mostrados en la Tabla 26, en la cual se muestran también las fórmulas que se determinaron para calcular el equivalente del valor "x", siendo este la calificación resultante del formulario, en el intervalo estandarizado. Con todos los puntajes convertidos a los intervalos estandarizados se procede a determinar el grado de vulnerabilidad total, calculando el promedio ponderado de todos los parámetros, de acuerdo con el porcentaje de incidencia que se definió para cada uno.

**Tabla 25.** Rangos de vulnerabilidad, calificaciones y porcentajes de incidencia.

Parámetros	Calific.		Rangos de vulnerabilidad								% de incidencia
	Mín	Máx	Bajo		Medio		Alto		Muy Alto		
			Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	
<b>FORMULARIO 1</b>											
Entorno y Ubicación	6	52	6	18	18	29	29	41	41	52	1
Suelos	2	30	2	9	9	16	16	23	23	30	15
Seguridad y zonas de evacuación	3	50	3	15	15	27	27	38	38	50	1
<b>FORMULARIO 2</b>											
Edad y número de pisos	2	20	2	7	7	11	11	16	16	20	2
Cambios de uso y ampliaciones	1	25	1	7	7	13	13	19	19	25	2
Golpeteo	1	12	1	4	4	7	7	9	9	12	2
Cubierta	4	45	4	14	14	25	25	35	35	45	2
Aspectos Geométricos	3	40	3	12	12	22	22	31	31	40	15
Aspectos Constructivos y Grado de deterioro	7	60	7	20	20	34	34	47	47	60	10
<b>FORMULARIO 3</b>											
Estructura: Pórtico en Concreto	8	85	8	27	27	47	47	66	66	85	30
Muros y Antepechos	7	109	7	33	33	58	58	84	84	109	20
<b>TOTAL 1</b>	<b>44</b>	<b>528</b>	<b>44</b>	<b>165</b>	<b>165</b>	<b>286</b>	<b>286</b>	<b>407</b>	<b>407</b>	<b>528</b>	<b>100</b>
<b>FORMULARIO 4</b>											
Estructura: Muros Confinados	9	143	9	43	43	76	76	110	110	143	50
<b>TOTAL 2</b>	<b>38</b>	<b>477</b>	<b>38</b>	<b>148</b>	<b>148</b>	<b>258</b>	<b>258</b>	<b>367</b>	<b>367</b>	<b>477</b>	<b>100</b>

Sup. e Inf. son límite superior e inferior del intervalo, respectivamente.

**Tabla 26.** Intervalos normalizados de acuerdo con el grado de vulnerabilidad.

Grado de vulnerabilidad	Intervalo normalizado	Fórmula de conversión(*)
Bajo	De 0 a 10	$\left(\frac{10}{Sup - Inf}\right) * (x - Inf)$
Medio	De 10 a 20	$10 + \left(\frac{10}{Sup - Inf}\right) * (x - Inf)$
Alto	De 20 a 30	$20 + \left(\frac{10}{Sup - Inf}\right) * (x - Inf)$
Muy Alto	De 30 a 40	$30 + \left(\frac{10}{Sup - Inf}\right) * (x - Inf)$

Sup. e Inf. son límite superior e inferior del intervalo no normalizado, respectivamente.

#### 4.2.6. Estimación del grado de vulnerabilidad en la población estudiada.

Inicialmente se había considerado hacer una proyección de los resultados obtenidos para la muestra específica a las 50 escuelas restantes de la población estudiada, sin embargo, después de la evaluación detallada se observó que se podría tener una mayor aproximación a la realidad, de la que se obtendría con una proyección directa de los resultados, utilizando la información preliminar en la estimación del grado de vulnerabilidad de estos establecimientos. Lo que sustenta lo anterior es que, mediante la evaluación detallada, se identificó que la mayoría de las características recopiladas en las visitas preliminares habían tenido una alta incidencia en la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones escolares de la muestra específica, que de acuerdo con los porcentajes de incidencia asignados a cada parámetro, equivalen al 84 % del valor del grado de vulnerabilidad. Lo interesante de este procedimiento es que se convirtió en una herramienta para plantear una validación metodológica del desarrollo detallado que se realizó para las escuelas de la muestra específica, en contraste con un procedimiento de evaluación, basado en aspectos similares, pero con un desarrollo muy breve y una ejecución mucho más rápida.

Tabla 17. Parámetros de vulnerabilidad y porcentajes de incidencia

La selección de los parámetros de este procedimiento simplificado de evaluación se hizo, como se mencionó antes, priorizando la información preliminar de acuerdo a su influencia en la vulnerabilidad de las escuelas de la muestra específica. Los parámetros establecidos son el sistema estructural, la calidad de los suelos de la zona, los aspectos geométricos de la edificación, el año de construcción, el número de pisos y el tipo de cubierta. A cada parámetro se le asignó un porcentaje de incidencia que para el caso del sistema estructural, suelos y aspectos geométricos, corresponde a los asignados en la evaluación detallada para cada uno, es decir que también se les está dando la mayor incidencia en el grado de vulnerabilidad de

Escuela específica de la muestra de la población estudiada

las escuelas de la población estudiada, de acuerdo a la calibración hecha durante la evaluación de las escuelas de la muestra específica.

Los demás parámetros se definieron a partir de la información preliminar disponible y son el año de construcción, el número de pisos y el tipo de cubierta, repartiendo el porcentaje restante entre ellos. A la cubierta se le asignó un 10 % y al año de construcción y el número de pisos se les asignó un 5 % a cada uno. La razón para priorizar entre ellos al tipo de cubierta es que la distancia entre muros determina la separación de los apoyos de la cubierta y, en la gran mayoría de los casos, esta distancia es mayor a la altura del entrepiso por los amplios espacios requeridos en este tipo de edificaciones. En caso de que ocurra un sismo con una componente vertical como la del sismo del Eje Cafetero en 1999, las estructuras de cubierta podrían fallar al no soportar la tracción generada por el movimiento en sentido vertical, peligro que se vería agravado si la distancia entre apoyos de cubierta es inadecuada y la cubierta clasifica como pesada. En cuanto a las calificaciones, se definió un rango que varía de 5 a 30, asignándolas a la mejor y a la peor condición, respectivamente.

**Tabla 27.** Parámetros de evaluación y porcentajes de incidencia.

Parámetro de evaluación	% de incidencia
Sistema Estructural	50
Suelos	15
Aspectos geométricos	15
Año de construcción	5
Número de pisos	5
Tipo de cubierta	10

- **Sistema estructural:**

En el Formulario Preliminar se consignaron las tipologías estructurales y los problemas identificados en las escuelas de la población estudiada y a partir de

dicha información se definieron las calificaciones para el sistema estructural de cada escuela. En el caso de las edificaciones con pórticos en concreto se dieron calificaciones de acuerdo los problemas evidenciados. Cuando se observó la presencia de columna corta se asignó una calificación de 25, si se evidenciaban daños en la mampostería 10, 7 cuando se observaron juntas inadecuadas y culatas sin confinamiento y 5 cuando no se observó ningún problema. Para las edificaciones con muros sin confinar se decidió asignar la peor calificación, equivalente a 30.

Para las edificaciones de muros confinados se asignaron las calificaciones mostradas en la Tabla 28, indicando que en las edificaciones en los que se detectaron problemas en la mampostería, donde se evidenció la presencia de columna corta, ausencia de juntas y culatas sin confinamiento se les asignó una calificación de 25; para los que presentaran solo daños en la mampostería se les asignó una calificación de 20; para los que presentaron problemas en las juntas y culatas sueltas o presencia de columna corta, se les asignó una calificación de 10 y en los que no se identificaron problemas aparentes en su estructura se les dio una calificación de 5.

Cuando se presentaron varias edificaciones con diferentes sistemas estructurales en una misma escuela, se ponderaron las calificaciones obtenidas para cada edificación, de acuerdo al número de edificaciones que presentaran distintas tipologías.

**Tabla 28.** Calificaciones asignadas a las edificaciones con muros confinados.

<b>Problemas identificados</b>	<b>Calificación</b>
Daños en mampostería, columna corta, ausencia de juntas, culatas sueltas.	25
Daños en mampostería.	20
Juntas inapropiadas, culatas sueltas o columna corta.	10
No presenta problemas.	5

- **Suelos:**

En este parámetro se consideraron el posible perfil de suelo que corresponde al terreno donde se encuentra emplazada la escuela y la presencia de fallas en los muros por posibles asentamientos diferenciales. Los posibles perfiles de suelo se tomaron de la base de datos de la información cartográfica digital en desarrollo por el Observatorio Sismológico del Suroccidente (OSSO, 2002) y las fallas en los muros fueron registradas durante las visitas preliminares, cuyo registro se presenta en el Anexo 3.

Para la calificación asignada a las fallas detectadas en los muros se consideró la magnitud de los problemas identificados mediante la evaluación preliminar. La calificación total de este parámetro es la suma de las calificaciones de los problemas asociados a asentamientos del terreno y el posible perfil de suelo. En la Tabla 29 se resumen las consideraciones hechas para la evaluación de este parámetro.

**Tabla 29.** Calificaciones asignadas al parámetro de evaluación de los Suelos.

<b>Problemas asociados a asentamientos del terreno</b>	<b>Opción</b>	<b>Calificación</b>
(a) No evidencian fallas en la mampostería ni asentamientos.	No	2,5
(b) Se observan asentamientos, aunque no se observan fallas en muros.	Si (b)	12,0
(c) Presenta problemas en la mampostería asociadas al comportamiento del suelo.	Si (c)	20,0
<b>Posible perfil de suelo</b>	S1	2,5
	S2	7,0
	S3	10,0

- **Aspectos geométricos:**

La calificación de la geometría de la edificación se basó en las irregularidades registradas durante las visitas preliminares y la existencia de grandes aberturas en

los muros. Las calificaciones establecidas para una condición geométrica regular es 5, y para las condiciones intermedia e irregular, se asignaron los valores 17 y 30, respectivamente. En la Tabla 30 se resumen los criterios para la asignación de una calificación general a los aspectos geométricos de la escuela.

**Tabla 30.** Calificaciones asignadas a los Aspectos geométricos.

Problemas identificados	Geometría	Calificación
No presenta irregularidades.	Regular	5
Tiene vanos grandes, discontinuidad de muros.	Intermedia	17
Presenta irregularidades en planta y en altura.	Irregular	30

▪ **Año de construcción y número de pisos:**

Los intervalos para asignar las calificaciones de este parámetro se definieron de acuerdo con las características comunes que presentaron algunas edificaciones en ciertas épocas, como por ejemplo, tipologías estructurales, configuraciones geométricas y la presencia de confinamiento en los muros, las cuales fueron mejorando, relativamente, a medida que avanzaba el siglo XX. El primer intervalo es de 1997 en adelante, con una calificación de 5, seguido del intervalo de 1997 a 1984, asignándole una calificación de 17 y finalmente el intervalo de años de construcción previos a 1984, con una calificación de 30.

Se le ha dado importancia al número de pisos en esta evaluación, porque fue notorio durante la inspección de las escuelas de la muestra, que en muchos casos el aumento del número de pisos en las edificaciones no estuvo acompañado de adecuaciones estructurales necesarias para un incremento de cargas de esta naturaleza, a excepción de algunos pórticos. Las calificaciones asignadas para las edificaciones de 1, 2 y 3 pisos son 5, 17 y 30, respectivamente.

- **Tipo de cubierta:**

La cubierta se calificó de acuerdo al peso de cada tipología; a las más livianas, con teja de asbesto-cemento, se les asignó una calificación de 5, a las de teja de barro 17 y a las que presentan sistema residencial 30.

Finalmente, una vez se determinó el grado de vulnerabilidad de las escuelas restantes de la población estudiada que no fueron evaluadas detalladamente, se decidió aplicar este mismo procedimiento simplificado a las escuelas pertenecientes a la muestra específica, con el objetivo de establecer una validación metodológica y unificar los resultados para su análisis. En el Capítulo 5, de resultados y discusión metodológica se hace el análisis de validación metodológica.

#### **4.2.7. Estimación de daños y pérdidas económicas.**

- **Edificaciones de mampostería.**

El procedimiento propuesto por Cardona y Hurtado (1990) permite determinar la categoría y el estado de daños de las edificaciones de mampostería de uno y dos pisos, mediante el cálculo de la demanda de ductilidad y se aplicó a las edificaciones escolares de mampostería de la muestra específica, ya que para el resto de las edificaciones de la población estudiada no se tienen las mediciones requeridas para emplear este procedimiento.

El procedimiento propuesto es el siguiente:

1. Determinar la longitud de muros en ambas direcciones.

2. Determinar la resistencia al cortante VR menos favorable, considerando la menor longitud de muros en una dirección en el primer piso de la edificación, calculándola con la ecuación:

$$VR = L * e * v$$

donde VR es la cortante resistente, L es la longitud de muros, e es el espesor de los muros y v es el valor de la resistencia a cortante de los muros, los cuales según ensayos de laboratorio para muros de mampostería han arrojado, para mampostería confinada un valor de  $v = 1.5 \text{ kg/cm}^2$  y para mampostería sin confinar un valor de  $v = 0.75 \text{ kg/cm}^2$ .

3. Calcular el peso de la edificación W, que es resistido por la estructura, multiplicando el área por el peso por metro cuadrado.
4. Calcular el coeficiente sísmico resistido CSR definido como el porcentaje del peso de la edificación que es resistido por la estructura, como cortante horizontal en la dirección más desfavorable. Esto resulta de dividir la resistencia a cortante menos favorable VR, por el peso promedio de la edificación, es decir,  $CSR = VR/W$ .
5. Calcular el coeficiente sísmico exigido CSE a la estructura a partir del espectro de respuesta escogido.
6. Calcular la demanda de ductilidad DD, como la relación entre el coeficiente sísmico exigido CSE y el coeficiente sísmico resistente CSR, es decir,  $DD = CSE/CSR$ .
7. Tomar como valor de referencia de la ductilidad disponible o capacidad de ductilidad el valor  $R_o$  recomendado en el Código, equivalente a 1.0 para mampostería no confinada y 1.5 para mampostería confinada.
8. Se pueden clasificar los daños de una manera cualitativa de acuerdo con la escala de la Tabla 31 presentada en Campos (1992).

**Tabla 31.** Relación entre la categoría de daños y la demanda de ductilidad.

<b>Categoría y estado de daños</b>	<b>Criterio con relación a la demanda de ductilidad (DD)</b>
1. Ninguno	$DD < 0,50 CD$
2. Menores	$0,50 CD < DD < 0,75 CD$
3. Moderados	$0,75 CD < DD < 1,00 CD$
4. Mayores	$1,00 CD < DD < 1,50 CD$
5. Totales	$1,50 CD < DD < 2,00 CD$
6. Colapso	$2,00 CD < DD$

Fuente: Cardona y Hurtado (1990), en Campos (1992).

Los efectos en la estructura para cada categoría de daño son:

1. Sin daños.
2. Daños menores en elementos arquitectónicos.
3. Daños generalizados en los elementos arquitectónicos y daños menores en los elementos estructurales.
4. Daños generalizados en los elementos estructurales y arquitectónicos.
5. Daños en la estructura no reparables, por lo tanto la edificación debe ser demolida y reemplazada.
6. Edificación parcial o totalmente colapsada por inestabilidad.

Para aplicar este procedimiento en este estudio se decidió modificar la ecuación de la cortante resistente mediante la inclusión de un factor de reducción. La razón para hacer esta adaptación es que dentro de las escuelas evaluadas que presentan muros confinados o sin confinar como sistema estructural, existe gran variedad de calidades y de grados de vulnerabilidad, lo cual se considera debe tenerse en cuenta para la determinación de la cortante resistente. Con la asesoría del ingeniero Gilberto Areiza se definieron los factores de reducción de la cortante resistente, de acuerdo con los grados de vulnerabilidad obtenidos para cada escuela. Dichos factores se muestran en la Tabla 32.

**Tabla 32.** Factor de reducción de la cortante resistente en relación con el grado de vulnerabilidad.

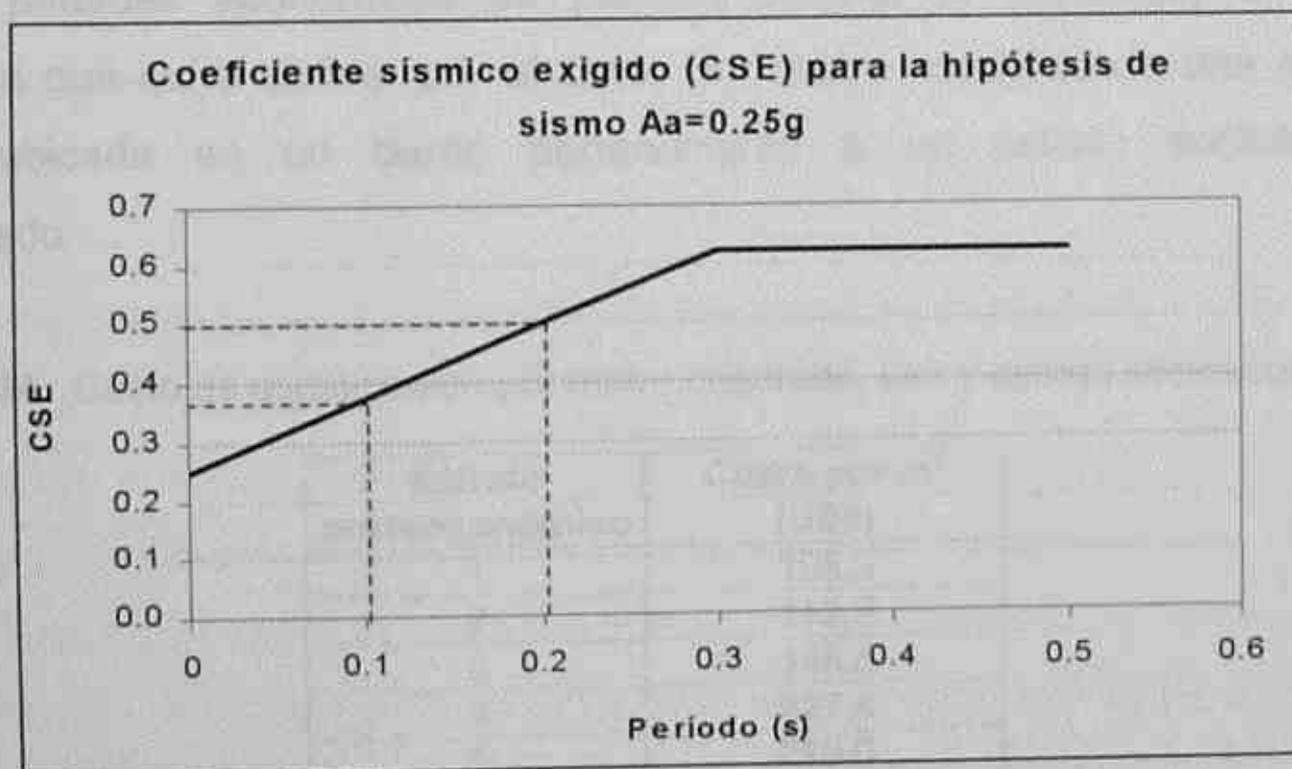
Grado de vulnerabilidad	Factor de reducción ( $f_r$ )
Bajo	1,00
Medio	0,95
Alto	0,85
Muy alto	0,80

De esta manera la ecuación de la cortante resistente quedaría expresada así:

$$VR = L * e * v * f_r$$

De acuerdo con el procedimiento de Cardona y Hurtado, al reducirse el valor de la cortante resistente, se reduce también el valor del coeficiente sísmico resistido y por lo tanto se incrementa el valor de la demanda de ductilidad y los daños esperados.

El valor del coeficiente sísmico exigido depende del período de la edificación y de la aceleración horizontal pico efectiva, y se puede obtener de gráficas que relacionan estos valores.



Fuente: Figura 20, en Campos (1992).

**Figura 7.** Curva para obtener el valor del coeficiente sísmico exigido para  $A_a=0.25g$ .

La determinación de las pérdidas económicas se hizo empleando el procedimiento propuesto por Whitman y Cornell (1976), en Campos (1992). Dicho procedimiento asocia a cada categoría o estado de daño un porcentaje de la edificación que sufre daños, lo cual se requiere para relacionarlos con las posibles pérdidas económicas. Los porcentajes asociados a cada categoría de daño se muestran en la Tabla 33.

**Tabla 33.** Categoría de daños y porcentaje de la edificación afectada.

<b>Categoría y estado de daños</b>	<b>Porcentaje de daños</b>
1. Ninguno	0,0
2. Menores	0,3
3. Moderados	5,0
4. Mayores	30,0
5. Totales	100,0
6. Colapso	100,0

Fuente: Whitman y Cornell (1976), en Campos (1992).

Para determinar cuántos metros cuadrados de cada edificación escolar sufre daños, se multiplica el porcentaje de daños con el área total construida. Así, las posibles pérdidas económicas se pueden obtener al multiplicar el área del edificación que sufre daños, por el costo por metro cuadrado de una edificación escolar ubicada en un barrio perteneciente a un estrato socioeconómico determinado.

**Tabla 34.** Costo de construcción por metro cuadrado, uso y estrato socioeconómico.

<b>Estrato socioeconómico</b>	<b>Costo por m<sup>2</sup> (US\$)</b>
1	126,5
2	112,2
3	146,8
4	227,4
5	219,0

Fuente: Construdata (2002).

- **Edificaciones con pórtico en concreto.**

Debido a que el procedimiento de Cardona y Hurtado (1990) no es aplicable a las edificaciones con sistema estructural pórtico en concreto, con la asesoría del ingeniero Gilberto Areiza, se decidió asumir que los daños de estas edificaciones se concentrarían en los muros, partiendo de que las edificaciones que se clasificaron dentro de esta tipología estructural cumplen con los requisitos de la Norma NSR-98.

Cabe anotar que no es posible hacer un análisis detallado de estas edificaciones porque se carece de información estructural más exacta y que el procedimiento propuesto solo pretende hacer un estimativo económico de las pérdidas. Estas pérdidas se obtuvieron multiplicando la cantidad de muros que se estima sufrirían daños por el costo aproximado de mampostería por metro cuadrado. La cantidad de muros que sufre daños se definió de acuerdo a la presencia de confinamiento con columnetas y viguetas, asignando un porcentaje de daños de 20 % sobre el área total de los muros cuando estén confinados y de 100 % cuando no lo estén. El costo por m<sup>2</sup> de mampostería se determinó de acuerdo a los valores recomendados en el Construdata (2002) y su cálculo se presenta en la Tabla 35.

#### **4.2.8. Estimación de las posibles pérdidas de vidas humanas.**

Las escuelas públicas manejan una población diaria bastante numerosa entre estudiantes, profesores y empleados. Es evidente la importancia de obtener un estimativo de las posibles pérdidas de vidas humanas en caso de ocurrencia de un evento sísmico. Whitman y Cornell (1976) proponen unos porcentajes de víctimas fatales y personas heridas, de acuerdo con las seis categorías de daño.

El cálculo de víctimas fatales se realiza a partir del porcentaje total de la población que se encuentra normalmente en las edificaciones y con el porcentaje restante se calcula el número de personas heridas. En la Tabla 36 se muestran los porcentajes propuestos por los autores de este procedimiento.

**Tabla 35.** Costo por metro cuadrado de muro en ladrillo tolete común de 10 cm de espesor.

Descripción	Un	Cantidad	Rto.	Precio unitario	Subtotal (\$)
Ladrillo tolete recocido	un	55,0	1,05	75	4 331
Mortero de pega 1.4	m <sup>3</sup>	0,026	1,05	11 000	300
Mano de obra	m <sup>2</sup>	-	-	6 200	6 200
Herramienta menor	%	0,100	-	-	1 083
<b>Total por m<sup>2</sup></b>					<b>\$11 914</b>

Un: unidad, Rto: rendimiento

**Tabla 36.** Porcentajes de posibles pérdidas de vidas humanas.

Categoría de daños	Victimas fatales (%)	Heridos y heridas (%)
1	0,0	0
2	0,0	0
3	0,0	1
4	0,25	2
5	1,0	10
6	20,0	100

Fuente: Whitman y Cornell (1976), en Campos (1992).

### 4.3. SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA.

Permite observar con claridad la secuencia de actividades ejecutadas y la forma como los resultados parciales logrados se convirtieron, a lo largo del proceso, en herramientas para realizar una validación metodológica, que condujo a la obtención de un procedimiento para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las escuelas de Cali, de manera rápida y económica y con resultados finales representativos para la población objetivo de estudio.

Figura 2. Síntesis de la metodología.

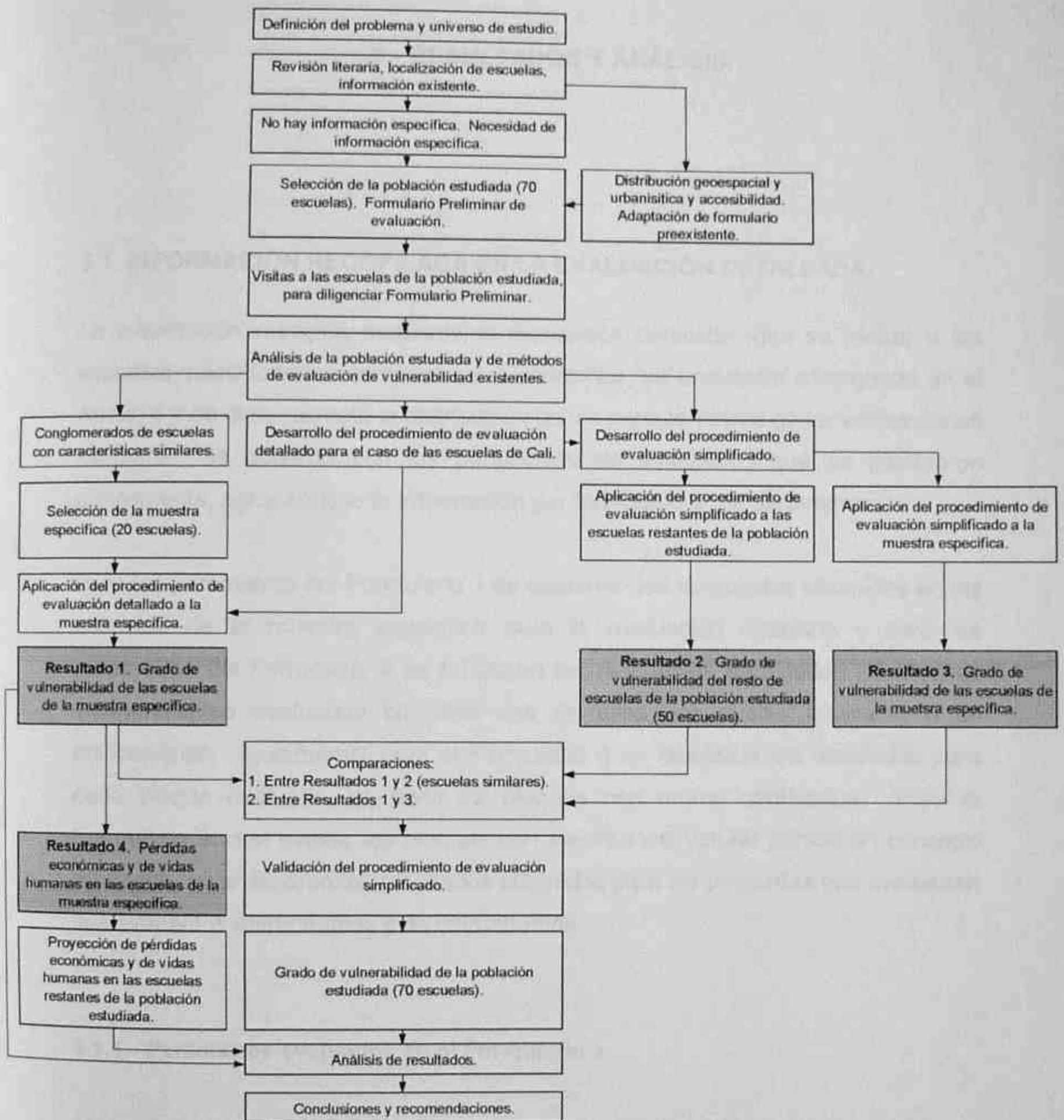


Figura 8. Síntesis de la metodología.